



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ**

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**SMĚSNÝ RECYKLÁT DO PODLOŽÍ VOZOVEK  
POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ**

WASTE BUILDING MATERIAL TO SUBGRADE PAVEMENT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Daniel Masař

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

**BRNO 2021**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav pozemních komunikací

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Daniel Masař
<b>Název</b>	Směsný recyklát do podloží vozovek pozemních komunikací
<b>Vedoucí práce</b>	doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2020
<b>Datum odevzdání</b>	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

---

doc. Dr. Ing. Michal Varaus  
Vedoucí ústavu

---

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

## PODKLADY A LITERATURA

bakalářské, diplomové a doktorské práce 2010-2020

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

platné normové a rezortní předpisy

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Rešeršní přehlednou formou zpracovat dostupné informace o využití směsných recyklátů do podloží vozovek pozemních komunikací, zejména jako účinná úprava nevhodného podloží vozovky. 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, apod.

Požadované výstupy:

Úvod se specifikací cílů práce

Teoretická část zahrnující široké aktuálně dostupné informace na dané téma.

Praktická část – zkoušení laboratorních vzorků směsných recyklátů zaměřené na mechanickou úpravu a zpevňování nevhodných zemin v podloží vozovek, případně výměnu materiálu.

Zhodnocení výsledků práce

Závěr (odpověď na stanovené cíle práce)

Literatura

Přílohy

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## ABSTRAKT

Teoretická část diplomové práce rešeršní formou zpracovává produkci stavebních a demoličních odpadů a jejich následnou proměnu ve výsledný recyklát a jeho možné využití v pozemních komunikacích. Pozornost je soustředěna na využití směsného recyklátu do podloží vozovek a charakteristiku zkoušek, které je nutné provést před jeho zabudováním do vozovek. Další kapitoly jsou věnovány problematickým vlastnostem recyklátů, zahraničním zkušenostem s využitím směsného recyklátu při výstavbě a možnostem vývoje jeho vlastností. Praktická část ověřuje vhodnost směsného recyklátu do podloží vozovek pomocí laboratorních zkoušek. Zkoušky jsou provedeny na jednotlivých směsích směsného recyklátu s cementem, vysokopeční struskou nebo cementovými odprašky v různém procentuálním zastoupení. Výsledky jsou poté porovnány a je vyhodnoceno, které směsi vykazují nejlepší vlastnosti. Součástí praktické části je také ekonomické zhodnocení těchto směsí vůči běžně užívaným materiálům.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Stavební a demoliční odpad, směsný recyklát, podloží vozovky, aktivní zóna, zemní těleso, proctorova zkouška, míra namrzavosti, pevnost v příčném tahu, pevnost v tlaku, triaxiální zkouška

## ABSTRACT

The theoretical part of the diploma thesis searches the production of Construction and demolition waste and their subsequent transformation into the final recycle and its possible use in roads. Attention is focused on the use of mixed recycled material into subgrade of the pavement and the characteristics of tests that must be performed before its used to the road. The next chapters pay attention to the problematic properties of recycles, foreign experience with the use of mixed recycle in Construction and the possibilities of its development. The practical part verifies the suitability of mixed recycled material into subgrade of the pavement using laboratory tests. The tests are performed on individual mixtures of mixed recycled material with cement, blast furnace slag or cement dust in various percentages. The results are then compared and it is evaluated which mixtures show the best properties. Part of the practical part is also the economic evaluation of these mixtures against commonly used materials.

## KEYWORDS

Construction and demolition waste, mixed recycled material, subgrade of the pavement, capping layer, embankment, Proctor compaction test, frost heave test, tensile strength, compressive strength, triaxial compaction test

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Daniel Masař *Směsný recyklát do podloží vozovek pozemních komunikací*. Brno, 2020. 118 s., 3 s. příl. Diplomová 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 diplomové práce s názvem *Směsný recyklát do podloží vozovek pozemních komunikací* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 3. 11. 2020

---

Bc. Daniel Masař  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Směsný recyklát do podloží vozovek pozemních komunikací* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 3. 11. 2020

---

Bc. Daniel Masař  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Dušanu Stehlíkovi, Ph.D. za poskytnuté materiály, odborné vedení a cenné rady při vypracovávání práce. Děkuji také Pavlu Strakovi za rady a odbornou pomoc při provádění zkoušek v laboratoři ústavu pozemních komunikací. Rád bych poděkoval také rodině a svým blízkým za podporu po celou dobu studia.

# OBSAH

1	ÚVOD A CÍLE PRÁCE .....	10
2	TEORETICKÁ ČÁST .....	12
2.1	STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPAD .....	12
2.2	RECYKLÁTY V POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH .....	14
2.2.1	Produkce recyklátů.....	15
2.2.2	Výrobní proces a uskladnění recyklátů .....	17
2.2.3	Typy drtících jednotek.....	18
2.2.3.1	Čelistový drtič.....	19
2.2.3.2	Odrazový drtič .....	19
2.2.3.3	Kuželový drtič.....	20
2.2.4	Použití recyklátů v pozemních komunikacích .....	21
2.2.5	Cenové zhodnocení.....	24
2.3	SMĚSNÝ RECYKLÁT .....	26
2.3.1	Podloží vozovky pozemních komunikací .....	26
2.3.2	Stanovení typu podloží.....	31
2.3.3	Zkoušení směsných recyklátů.....	33
2.3.3.1	Zrnitost .....	34
2.3.3.2	Zhutnitelnost – Proctorova zkouška.....	34
2.3.3.3	Kalifornský poměr únosnosti CBR .....	35
2.3.3.4	Stanovení míry namrzavosti přímou metodou .....	36
2.3.4	Problematické vlastnosti .....	37
2.3.4.1	Obsah škodlivých látek.....	37
2.3.4.2	Odolnost proti drcení .....	38
2.3.4.3	Namrzavost .....	38
2.4	ZAHRANIČNÍ ZKUŠENOSTI .....	40
2.4.1	Čína.....	40
2.4.2	Španělsko .....	42



2.4.3	Švédsko .....	43
2.4.4	Německo .....	44
2.5	MOŽNOSTI VÝVOJE POUŽITÍ SMĚSNÉHO RECYKLÁTU .....	45
2.5.1	Vrstevnatý násyp .....	45
2.5.2	Ztužující a drenážní žebra .....	45
2.5.3	Vláknobeton .....	45
3	PRAKTICKÁ ČÁST .....	47
3.1	POUŽITÉ MATERIÁLY .....	47
3.2	ZKOUŠKY .....	48
3.2.1	Stanovení zrnitosti .....	48
3.2.2	Proctorova zkouška .....	52
3.2.3	Zkouška pevnosti v tlaku .....	59
3.2.4	Pevnost v příčném tahu .....	69
3.2.5	Míra namrzavosti zemin .....	79
3.2.6	Odolnost kameniva proti zmrazování a rozmrazování .....	86
3.2.7	Experimentální cyklická triaxiální zkouška .....	88
3.3	EKONOMICKÉ SROVNÁNÍ PŘI POUŽITÍ DO PODLOŽÍ VOZOVKY .....	95
3.4	UPLATNĚNÍ SMĚSI V KONSTRUKCI VOZOVKY .....	96
3.4.1	Konstrukce vozovky pro třídu dopravního zatížení IV .....	97
3.4.2	Konstrukce vozovky pro třídu dopravního zatížení V .....	98
3.4.3	Ekonomické srovnání při použití do spodní podkladní vrstvy vozovky .....	99
4	ZÁVĚR .....	100
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	105
	SEZNAM TABULEK .....	110
	SEZNAM GRAFŮ .....	112
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	113
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....	116
	PŘÍLOHY .....	119

# 1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

V současné době rychlého rozvoje stavebního průmyslu vzrůstá množství odpadů, které významně ovlivňuje kvalitu životního prostředí. Dlouhá léta probíhalo jejich ukládání na skládkách, které však nejsou kapacitně neomezené. Spotřeba přírodních materiálů roste a je zřejmé, že jejich zásoby nejsou nekonečné. Tuhle skutečnost si společnost uvědomuje a hledá možná řešení, jak efektivně přírodní materiály nahradit. Možnost, jak jejich spotřebu snížit lze nalézt právě ve využití odpadních materiálů, které mohou často svými vlastnostmi tvořit plnohodnotnou náhradu. Největší zastoupení mezi odpadními materiály, a to přibližně 45-55 %, zaujímá stavební a demoliční odpad. A právě v silničním odvětví lze pro tento typ odpadního materiálu, přeměněného na recyklát, nalézt široké uplatnění. Jedním z nich může být využití těchto recyklovaných materiálů pro budování zemních těles nebo aktivní zóny pozemních komunikací. Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část, které postupně shrnují poznatky této oblasti.

Cílem teoretické práce je shrnout dostupné informace o využití směsného recyklátu zejména do podloží vozovek a zemního tělesa pozemních komunikací. Postupně je popsána produkce stavebního a demoličního odpadu, výroba, uskladnění, cenové zhodnocení a obecné využití recyklátů ze stavebního a demoličního odpadu do pozemních komunikací. Hlavní pozornost je věnována směsnému recyklátu a jeho možnému využití do podloží vozovek, kde jsou také zmíněny postupy pro stanovení typu podloží. Dále bude zaměřena pozornost k problematickým vlastnostem a zkouškám, které je nutné před použitím směsného recyklátu provést, a ověřit jimi výsledné vlastnosti směsi pro kvalitu stavby. V závěru teoretické části bude uvedeno několik zahraničních zkušeností s využitím směsného recyklátu při výstavbě nebo se stavebním a demoličním odpadem a náležitostmi, které musí být splněny, aby mohl být znovu využit. Zmínka o možném budoucím vývoji směsného recyklátu a zvýšení o jeho povědomosti teoretickou část uzavírá.

Cílem praktické části práce je ověřit možnost použití směsného stavebního recyklátu frakce 0/32 jako stabilizace podloží vozovky pomocí předepsaných zkoušek. Směsný recyklát bude upravován pojivy za účelem zlepšení jeho vlastností a na takto připravených směsích bude probíhat zkoušení k zjištění, zda může nahradit běžně užívané materiály v těchto vrstvách. Mezi prováděné zkoušky patří stanovení zrnitosti materiálu dle ČSN EN ISO 17892-4. Poté budou zhotoveny směsi se 3 % nebo 5 % hm. zastoupením pojiva. Pro zkoušení byly vybrány portlandský cement I 42,5 R, vysokopecní struska a odprašky z výroby cementu v Mokré. Na takto

zhotovených směsích bude stanovena objemová hmotnost a vlhkost podle Proctorovy modifikované zkoušky předepsané v ČSN EN 13286-2, pevnost v příčném tahu a stanovení pevnosti v tlaku na směsích stmelých hydraulickými pojivy dle ČSN EN 13286-42, stanovení míry namrzavosti zemin dle ČSN EN 72 1191, zkoušení odolnosti kameniva proti zmrazování a rozmrazování dle ČSN EN 1367-1 a modul pružnosti cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji dle ČSN EN 13286-7. Na závěr praktické části bude provedeno srovnání jednotlivých směsí a ekonomické zhodnocení při použití těchto směsí do podloží vozovek.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPAD

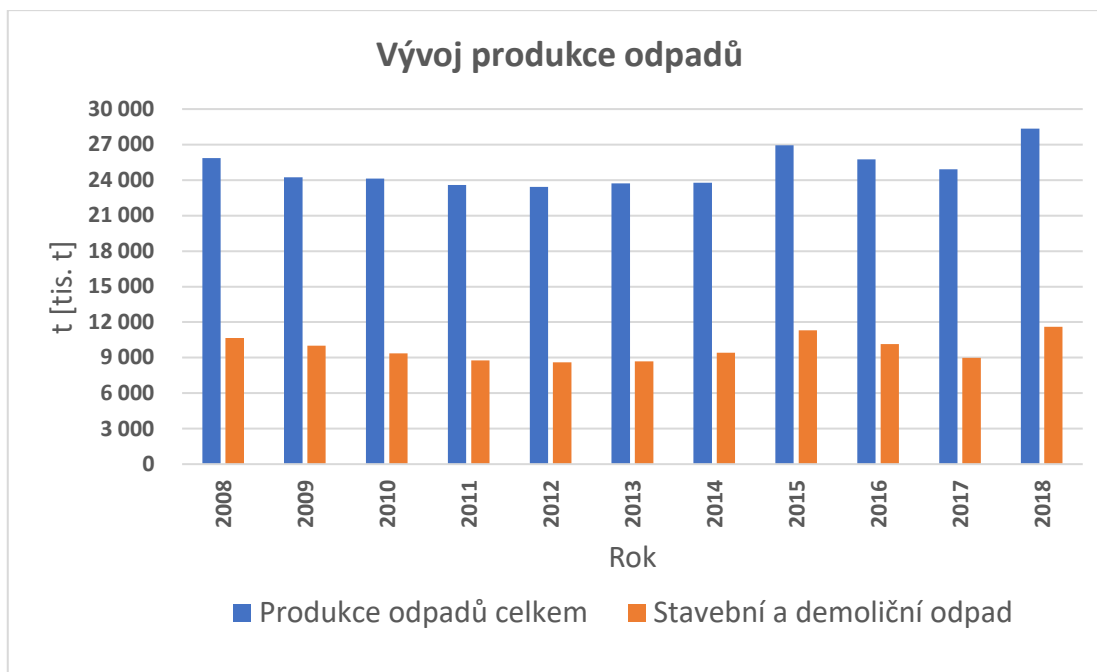
Stavební a demoliční odpad (dále také „SDO“) je odpad vznikající při provádění staveb, jejich údržbě nebo při změnách a odstraňování staveb již dokončených. SDO nemusí být získán pouze demolicí nebo rekonstrukcí budov, ale může se jednat také o stavby pozemních komunikací, drah, vodních cest, letišť, vodních nádrží apod. Je potřeba si uvědomit, že takto znovuzískaný materiál může být plnohodnotně znovu využit a podle toho je potřeba přizpůsobit chování k těmto materiálům. [1]

Informace o nakládání s SDO je poskytována v ČR ze strany dvou institucí. Jedná se o:

- CENIA – česká informační agentura životního prostředí
- Český statistický úřad (ČSÚ)

Data v oblasti vzniku a nakládání s SDO jsou ze strany obou institucí volně přístupné veřejnosti pouze v omezeném množství. Detailnější informace v databázi CENIA podléhají schválení a jsou zpoplatněny. Obdobně je tomu také u ČSÚ s tím rozdílem, že detailnější informace týkající se recyklace SDO jsou dostupné bezplatně. Důležitým rozdílem mezi jednotlivými databázemi je také odlišnost prezentovaných výsledků. Údaje v databázi CENIA se jeví jako přesnější a jsou o cca 30 % vyšší než údaje udávané ČSÚ. Rozdíl mezi prezentovanými výsledky vzniká z důvodu, že ČSÚ nesleduje všechny ekonomické subjekty, které mají povinnost evidovat nakládání s SDO. Které výsledky použít může být těžké rozhodnout, avšak pro porovnání s členskými státy evropské unie využívá Eurostat výsledků získaných Českým statistickým úřadem (ČSÚ). [2]

Z výsledků zjišťování je patrné, zda Česká republika splňuje reportingové povinnosti vydané Evropským parlamentem či nikoliv. Dle tohoto průzkumu lze vyzorovat vývoj produkce odpadů v jednotlivých letech, podíl jednotlivých odpadů dle odvětví a také průměry produkce odpadů na jednoho obyvatele. [3] Z pozorování provedeného za posledních 10 let lze vidět, že SDO zaujímá přibližně 35–45 % z celkové produkce odpadů, což lze považovat za velmi významný podíl, a je tedy nutnost věnovat se jeho opětovnému využití. Konkrétní produkci odpadů v jednotlivých letech a podíl SDO z celkové produkce mezi lety 2008–2018 lze vidět na příloženém grafu 2.1 níže. Dle uvedeného grafu bylo za rok 2018 vyprodukováno přibližně 28 mil. tun odpadu, což je přibližně o 3,4 mil. tun více než za předešlý rok. Přibližně 41 % tvoří SDO, což je v posledních 10 letech nejvyšší roční produkce. Z grafu je ovšem patrné, že produkce odpadů v jednotlivých letech neroste a udržuje stálý trend. [4]



*Graf 2.1 - Podíl SDO z celkové produkce odpadů za rok 2008-2018 [4]*

Stavební a demoliční odpad je důležitý materiálový tok, který lze opětovně využít. Způsobů, jak s SDO zacházet je hned několik. Nejméně ekologickým a zároveň nejméně ekonomickým způsobem je ukládání materiálu na skládkách, které byly určeny zejména pro nebezpečné a znovu nepoužitelné odpady. Tento způsob využití SDO je pro původce však ekonomicky nevýhodný, neboť dle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, ve znění pozdějších předpisů, činí sazba základního poplatku 500 Kč/t. Poplatek odpadá ve chvíli, kdy se materiál použije na technologické zabezpečení skládky. V současné době se na skládky ukládá velmi omezené množství odpadních materiálů – přibližně 1–2 %, na technologické zabezpečení skládek je to poté přibližně 5 % z produkovaného SDO. Možným způsobem je také nelegální skladování na místech, které ke skládkování nebyly určeny. Vhodnějším a zároveň šetrnějším způsobem je úprava SDO a jeho využití na terénní úpravy. Tímto způsobem je využíváno přibližně 40–45 % SDO, přičemž se jedná zejména o zeminu, kamení a vytěženou hlušinu. Nejeftivnějším a nejvyužívanějším způsobem je recyklace SDO, čímž se z odpadního materiálu může stát plnohodnotná surovina srovnatelná s materiály získanými z přírodních surovinových zdrojů. Tímto způsobem je využito přibližně 45–50 %. Recyklace navíc obsahuje spoustu výhod, mezi které lze zařadit ochranu životního prostředí, úsporu přírodních zdrojů, úsporu investic nebo také úsporu energie a pracovních sil. [2][5] Vzhledem k širokému spektru materiálů, které se považují za SDO, lze vytvořit základní rozdělení do skupin podle toho, zda jsou vhodné k recyklaci.

- **Bezproblémové materiály vhodné k recyklaci** – jedná se o materiály, které jsou po získání ihned vhodné k recyklaci bez jakékoli další úpravy. Jedná se například o zeminu a písky, cihly, betony, plasty, asfaltové směsi neobsahující dehet, štěrk z běžné těžby, materiály na bázi sádky, tašky a keramické výrobky.
- **Problematické odpady, které obsahují nebezpečné látky** – obsažené látky je nutno před úpravou oddělit nebo odstranit. Jedná se například o asfaltové směsi obsahující dehet, vytěženou hlušinu obsahující nebezpečné látky, izolační materiál obsahující nebezpečné látky, SDO obsahující rtuť nebo PCB.
- **Nebezpečné odpady nevhodné k recyklaci** – Jedná se o materiály nevhodné k jakémukoli použití. Jedná se o izolační a stavební materiály obsahující azbest. [5][6]

Vzhledem k množství produkovaného SDO a jeho důležitosti vznikl metodický návod odboru odpadů Ministerstva životního prostředí. Aktuálně platný metodický návod pro řízení vzniku stavebních a demoličních odpadů a pro nakládání s nimi vstoupil v platnost v srpnu roku 2018. Cílem dokumentu je především omezit množství nebezpečných odpadů vznikajících jak při zřizování staveb, tak jejich údržbě a minimalizovat tak riziko při nakládání s SDO. Důležitým bodem je také sjednotit postup přiřazování kategorie odpadu a jednoznačně vymezit podmínky pro přejímku odpadů do zařízení k jejich využívání. Vymezením těchto pracovních postupů vznikl metodický návod, jež slouží zejména pro osoby, které vykonávají činnost při přípravě a provádění staveb nebo také pro pracovníky veřejné správy. [7]

## 2.2 RECYKLÁTY V POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH

Recyklovaný stavební materiál – recyklát (RSM) vzniká mechanickou úpravou drcením a následným roztříděním stavebního a demoličního odpadu. Vzhledem k produkovanému množství SDO je dnes recyklace nezbytnou součástí environmentální politiky všech členských států evropské unie. Pro lepší uchopení a rozlišitelnost může být recyklát, jako výsledný výrobek, prezentován v několika formách:

- **Recyklované kamenivo** – jedná se o stanovený výrobek s prohlášením o vlastnostech a označením CE stejně jako u přírodního kameniva
- **Štěrková sypanina** – výrobek, který nesplňuje požadavky na kamenivo, ale lze jej použít jako náhradu běžně užívané zeminy pro stavbu zemního tělesa
- **R-materiál** – lze použít do asfaltových směsí nebo jako nestmelené kamenivo [8][9]

Hlavním problémem, který brzdí využívání recyklátů, je špatná informovanost o jeho vlastnostech a možnostech použití. To má za následek také převážné využití recyklátů ve formě down-cyclingu, což označuje proces zpracování SDO, při kterém dojde ke snížení jeho kvality. [10] Takto nazývané produkty se poté využívají za účelem zásypů inženýrských sítí nebo jako zpevněný provizorní podklad na stavbách. [11] Za účelem zlepšení využitelnosti SDO a recyklátů vznikl technický předpis TP 210 Užití recyklovaných stavebních a demoličních materiálů do pozemních komunikací. Tyto technické podmínky zpracovávají možnosti využití recyklovaných materiálů a stavebních a demoličních odpadů do zemního tělesa, podloží vozovek nebo konstrukčních vrstev pozemních komunikací. Sjednocení těchto podmínek a informací by mělo vést k lepší spolupráci projektantů, investorů a dodavatelů za účelem hospodárně a šetrně využívat recykláty jako náhradu přírodních zdrojů kameniva. [12] Částečně napomoci k tomu může také vydaný „katalog výrobků a materiálů z druhotných surovin z SDO“, kde jsou vypsány materiály s potenciálem využití ve stavebnictví a výrobky, které obsahují druhotné suroviny. [10]

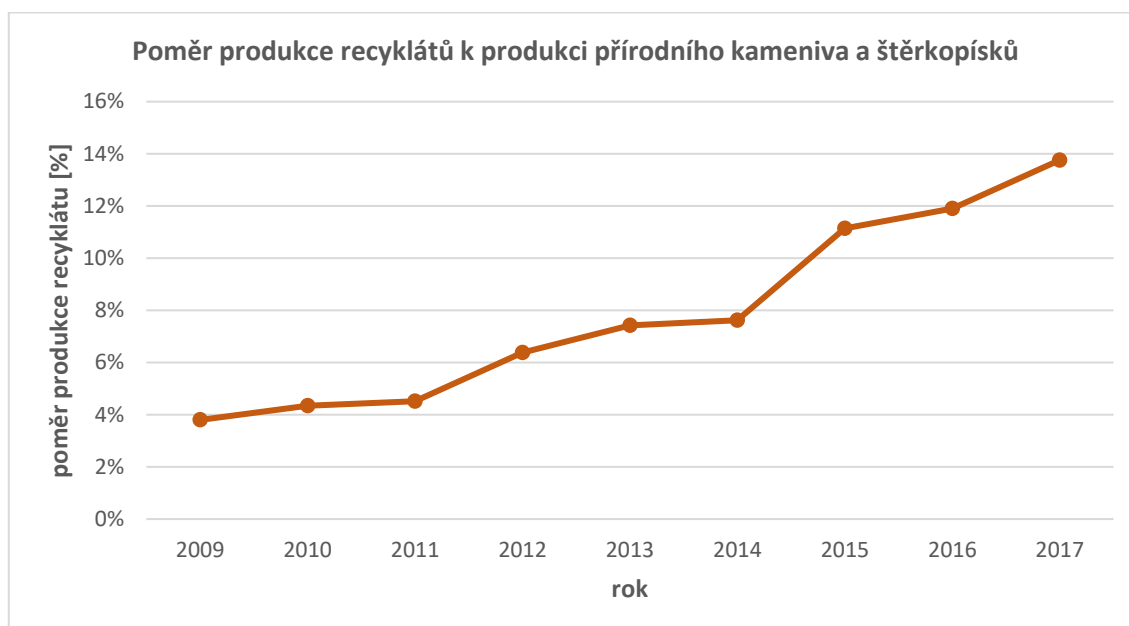
### 2.2.1 Produkce recyklátů

Jak již bylo zmíněno výše, v České republice dnes převládají dva způsoby využití SDO. Jedná se zejména o využití pro terénní úpravy a recyklaci. Pokud se vezme v potaz celá kategorie SDO, je míra recyklace v ČR v posledních letech na hranici přibližně 45-50 %. Je potřeba si uvědomit skutečnost, že největší zastoupení mezi SDO představuje výkopová zemina a hlušiny, které z celkového množství zabírají přibližně 60-70 %. [13] Takto velké množství výkopové zeminy vytváří dojem, že recyklace nedosahuje příliš vysokých hodnot. Důležité je však podívat se na míru recyklace v kategorii minerálních inertních odpadů, což jsou odpadní materiály, které vznikly z již jednou zpracované suroviny jako například beton, cihelné zdivo nebo keramika a jejich směsi. Dále to mohou být odpady z rekonstrukcí komunikací, kde můžeme zařadit asfaltové směsi bez obsahu nebezpečných látek. K tomu lze přičíst i skupinu, která obsahuje směsi výše uvedených složek. V těchto skupinách dosahuje míra recyklace v posledních letech cca 70 %. [11] Ve srovnání s údaji z roku 2010 se jedná o nárůst míry recyklace o přibližně 30 %, což lze považovat za velmi významný nárůst. [2]

Inertní minerální stavební materiál nahrazuje přírodní stavební kámen a štěrkopísky. Rozhodující hodnotou, pro zhodnocení úspěšnosti rozvoje recyklace SDO, je poměr vyprodukovaných recyklovaných minerálních odpadů a produkcí stavebního kamene a štěrkopísků. Porovnání dostupných údajů z jednotlivých let lze vidět v tabulce 2.1 a grafu 2.2 níže. [2]

Tabulka 2.1 – Měrná produkce recyklátů vůči těžbě kamene a štěrkopísků [2]

Údaj	rok 2009	rok 2010	rok 2011	rok 2012	rok 2013	rok 2014	rok 2015	rok 2016	rok 2017
Měrná produkce recyklátů [%]	3,80	4,35	4,51	6,38	7,42	7,62	11,14	11,90	13,76



Graf 2.2 – Poměr produkce recyklátů k produkci přírodního kameniva a štěrkopísků [2]

Z grafu lze vidět postupný nárůst měrné produkce recyklátů z inertních minerálních odpadů k 14 %, přičemž se tato hodnota od roku 2009 více než ztrojnásobila. Na tento růst mělo vliv zejména schválení Surovinové politiky druhotných surovin a také novela vyhlášky č. 294/2005 Sb. O ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. Vzestupný trend lze očekávat i v dalších letech, jelikož zásoby těžebních prostor klesají a ceny přírodního kameniva a štěrkopísků rostou. [2] [11]

Postupné nahrazování přírodního kameniva recykláty má i svou horní hranici, kterou lze přibližně stanovit dle výsledků jiných evropských zemí. Dle výsledků z Rakouska lze tuto hranici uvažovat okolo 30-35 %. Je to dáno zejména tím, že určité výrobky vyžadují větší kvalitu, kterou je schopno splnit pouze kamenivo z přírodních zdrojů. Tato aktuálně horní hranice se však může v budoucnu posunout z důvodu vývoje nových technologií užívaných ve stavebnictví. [2]



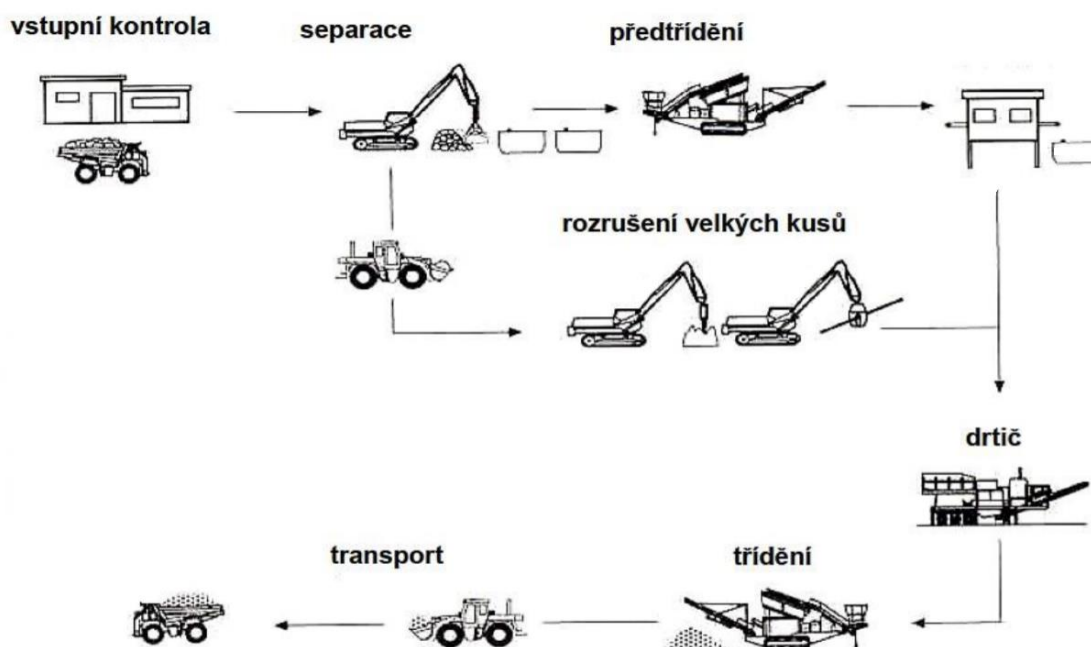
## 2.2.2 Výrobní proces a uskladnění recyklátů

Kvalita výrobního procesu a technologie hraje ve výsledné kvalitě recyklátu zásadní roli. Jednoznačně platí, že kvalita recyklátu je tím vyšší, čím kvalitněji jsou provedeny demoliční práce, respektive třídění materiálů ihned v místě jejich vzniku. Možnosti třídění však do značné míry závisí na možnostech, které jsou dostupné v místě demolice a také na nákladech a příjmech z tříděných materiálů. [14] Vzhledem k recyklaci je vhodné volit takový postup demoličních prací, který umožní využití celých stavebních prvků a tím pádem jejich následné přímé znovuvyužití. Při běžných demoličních pracích bylo zjištěno, že provádění třídění již na stavbě je ekonomicky výhodnější a taky efektivnější než provedení později u výrobce recyklátu. Je to způsobeno zejména tím, že na stavbě lze lépe oddělit cizorodé materiály od minerální sutě, které by mohly značně zhoršit kvalitu výsledného výrobku a tím pádem způsobit problémy při jeho využití. [15] Pro získání kvalitního výsledného recyklátu platí v ČR osvědčený způsob, který obsahuje následující etapy:

- **Vstupní kontrola SDO**, dovezeného na recyklační linku, včetně dokumentace
- **Hrubá separace nečistot** – např. dřevo, plast, sádrokarton, lepenka atd. V případě čisté inertní minerální sutě lze tuto část přeskočit
- **Předtřídění** – cílem je odstranit jemnou frakci před drcením, případně provést odhlinění
- **Zdrobňování předtříděné inertní minerální sutě** – nejčastěji za použití čelistových jednovzpěrných drtičů nebo odrazových drtičů s horizontální osou rotace
- **Oddělení feromagnetických komponent** – nejčastěji zbytky ocelové výztuže z betonu. Separace probíhá za pomoci elektromagnetů umístěných nad výstupním pásem drtiče
- **Třídění ve vibračním třídíči na jednotlivé frakce** – probíhá dle zkušenosti provozovatele nebo dle přání zákazníka
- **Manipulace hotového recyklátu do skladových boxů**
- **Pravidelné zjišťování obsahu škodlivin**
- **Provedení certifikace hotového výrobku** – Probíhá pomocí externí firmy [2]

Je samozřejmostí, že v ČR lze spatřit recyklační zařízení, které vybočují z technologického postupu uvedeného výše. Pro výrobu kvalitního recyklovaného materiálu se však výroba neobejde bez technologických kroků, kterými jsou předtřídění – drcení – třídění. K těmto třem krokům lze ke zvýšení kvality připojit další technologickou operaci – separaci lehkých a prachových částic. Tento krok může probíhat suchou nebo mokrou cestou. S tímto krokem se lze běžně setkat v zemích EU a s postupným certifikováním vybraných recyklovaných produktů

bude jejich přítomnost na recyklačních linkách nutná také v ČR. Možným důvodem, proč separaci lehkých materiálů a částic většina linek v ČR neprovádí, jsou vysoké pořizovací náklady, přičemž pro jejich návratnost se udává roční výkon linky min. 500 tis. Tun/rok. [15] [16] Možné uspořádání recyklačního střediska lze vidět níže na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1 - Technologické schéma uspořádání recyklačního střediska [2]

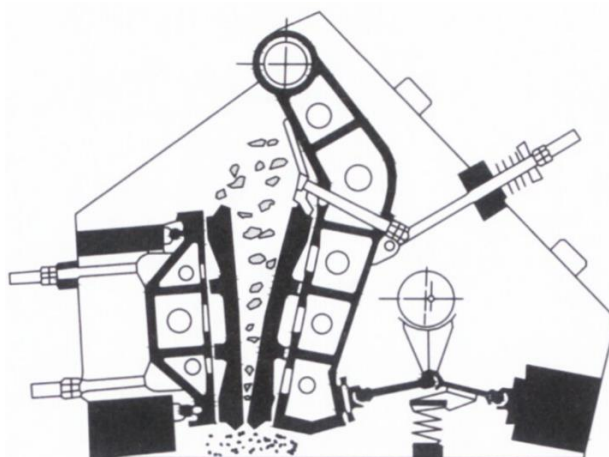
Důležitou roli ve výsledné kvalitě recyklovaného materiálu hraje způsob skladování. Jednotlivé materiály by měly být skladovány odděleně podle druhu (betonový recyklát, asfaltový recyklát, směsný recyklát, ...) a jakosti. Také je potřebné, aby byl materiál uložen na zpevněné ploše, kde nebude docházet k jeho znečištění nebo smíchání s jinou zeminou. Při pravidelném užívání recyklátu je nutné provádět kontrolní zkoušky, jako je sledování homogenity a stejnorodosti z důvodu dodržení výsledné kvality materiálu. [12] Nutností je splnění takového uskladnění, při kterém nevznikne riziko poškození lidského zdraví a životního prostředí. [14]

### 2.2.3 Typy drtících jednotek

Drtící jednotky jsou základní a nejdůležitější částí recyklačních linek. Volba drtiče závisí na vlastnostech drceného materiálu. Jedná se zejména o fyzikální vlastnosti nebo účel použití výsledného recyklátu. Nejčastěji využívané drtiče jsou čelistové a odrazové. Ostatní drtiče jsou využívány méně a pouze pro určité materiály, protože ne všechny drtiče jsou vhodné pro úpravu stavebních a demoličních odpadů. [17]

### 2.2.3.1 Čelistový drtič

Jedná se o primární drtič určený pro hrubé a střední drcení. Drcení materiálu probíhá mezi dvěma čelistmi z tvrdé oceli, přičemž jedna je pevná a druhá pohyblivá. Pohyblivá část se vzdaluje a přibližuje k části pevné, čímž dochází k drcení materiálu. Drcený materiál postupně propadá níže a při určité minimální velikosti vypadne z drtiče. Čelistový drtič je vhodný zejména pro drcení tvrdšího kamene, betonu, cihelné suti, vápence nebo žuly. Vstupní materiál je běžně ve velikosti do 1200 mm, po průchodu drtičem bývá ve velikosti do 300 mm. Tento typ drtiče lze rozdělit na jednovzpěrné a dvouvzpěrné. Jednovzpěrné zpracovávají materiál na menší frakci s lepší tvarovou hodnotou. Výhodou dvouvzpěrných je schopnost drcení extrémně pevných materiálů a velká výkonost. Dnes však jejich využitelnost klesá vzhledem k neustálému zdokonalování drtičů jednovzpěrných. Hlavní výhodou je jejich spolehlivost s nízkými náklady na opravu. Důležitý je také vysoký výkon a nízká hlučnost a prašnost, což je vhodné při použití přímo v místě demolice. Nevýhodou jsou horší tvarové vlastnosti recyklátu než u drtiče odrazového. Mezi další nevýhody lze zařadit neschopnost zpracovat železobeton a nedokonalé zpracování tenkých betonových desek. [18][19]

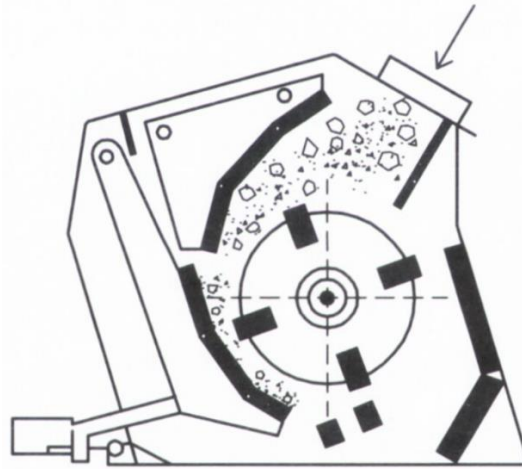


Obrázek 2.2 - Schéma čelistového drtiče [19]

### 2.2.3.2 Odrazový drtič

Slouží jako sekundární drtič pro jemnější drcení. Drtič je složen z pohyblivé části, kterou tvoří otáčející se válec s výčnělky, na kterém se zachytí drcený materiál, a vrhá jej proti části nepohyblivé. Ta je zpravidla tvořena pancéřovými deskami. Tento typ drtiče je vhodný zejména pro beton, železobeton nebo asfaltové kry. Vstupní materiál je běžně ve velikosti 300 mm, po průchodu drtičem bývá velikost přibližně 25 mm. Hlavní výhodou odrazového drtiče je jeho vysoký výkon s jednoduchou údržbou a obsluhou. Mezi další výhody patří samotná technologie

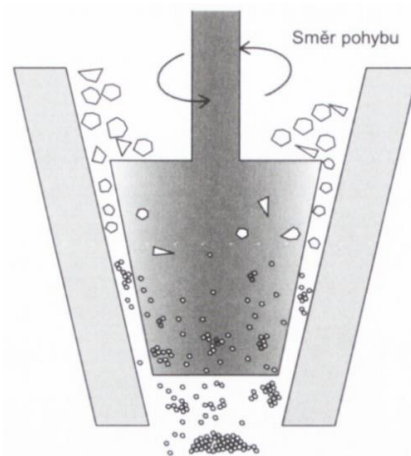
drcení, při níž se zrna rozpadají v místě nejmenší soudržnosti a tím vzniká kamenivo s výborným tvarovým indexem. Nevýhodou naopak je jejich vysoká hlučnost a prašnost. [18][19]



Obrázek 2.3 - Schéma odrazového drtiče [19]

### 2.2.3.3 Kuželový drtič

Používá se převážně pro drcení velmi tvrdých materiálů jako je křemen. Je vhodný také pro drcení pískovce, vápence apod. Pro stavební a demoliční odpad však příliš vhodný není. Drtič je proveden z konstrukčního ocelového pláště a drtícího kužele, který může být hladký nebo rýhovaný. Kužel vykonává krouživý a kývavý pohyb, při kterém dochází k přiblížování a vzdalování se ocelovému plášti. Drcení se tak děje po celém obvodu kužele, přičemž nejúčinnější je v místě s nejmenší štěrbinou. Velikost vstupního materiálu je od 5 do 25 cm, a proto je vhodný především jako sekundární drtič. Hlavní výhodou je schopnost vysokého stupně zdrobnění a vysoká kvalita výstupního materiálu. Mezi výhody patří také spolehlivost a nízké náklady na údržbu a provoz. Nevýhodou je snadné uchycení měkkých materiálů na drtících částech. [18][19]



Obrázek 2.4 - Schéma kuželového drtiče [19]

## 2.2.4 Použití recyklátů v pozemních komunikacích

Použití recyklovaných stavebních materiálů – recyklátů (dále také „RSM“) do konstrukčních vrstev a spodní stavby pozemní komunikace je podmíněno jejich složením, které je specifikováno technickými podmínkami TP 210. Recykláty jsou zde rozděleny dle procentuálního zastoupení hlavní složky na následující typy:

„**Recyklát z betonu** – recyklované kamenivo získané drcením a tříděním betonu a betonových výrobků, obsah složky Rc  $\geq$  90% hmotnosti, obsah (Ru + Rb)  $\leq$  6 %, maximální obsah složky Rg  $\leq$  1 % hmotnosti. Maximální obsah jiných, ostatních a plovoucích částic (X+Y+FL) je 3% hmotnosti. FL se stanovuje objemově dle ČSN EN 933-11, přičemž maximální množství těchto částic je 1 %.“

„**Recyklát z vozovek** – recyklované kamenivo získané drcením a tříděním betonu, vrstev stmelených asfaltem nebo hydraulickým pojivem případně nestmelených vrstev a hrubozrnných zemin s celkovým obsahem složek Rc+Ra+Ru  $\geq$  95 % hmotnosti. Maximální obsah složky Ra je 30 % hmotnosti. Maximální obsah jiných, ostatních a plovoucích částic (X+Y+FL) je 5 % hmotnosti.“

„**Recyklát ze zdiva** – recyklované kamenivo získané drcením a tříděním pálených a nepálených zdících prvků a betonu s celkovým obsahem složek Rc+Ra+Ru  $\geq$  90 % hmotnosti. Maximální obsah jiných, ostatních a plovoucích částic (X+Y+FL) je maximálně 10 % hmotnosti.“

„**Recyklát směsný** – recyklát získaný drcením a tříděním SDO, který se nepovažuje za kamenivo dle 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 % hmotnosti.“

„**Recyklát asfaltový** – recyklát z vozovek, kde je podíl  $30 \% < Ra \leq 95 \%$  hmotnosti. [12]

Použití výše zmíněných recyklátů do pozemních komunikací shrnují v tabulce technické podmínky TP 210, kde jsou oblasti použití označeny patřičným znaménkem. Vhodnost použití je vysvětlena v tabulce 2.2 níže.

Tabulka 2.2 – Oblast použití jednotlivých typů RSM dle podílu základního materiálu [12]

Typ RSM	Konstrukční vrstvy pozemní komunikace									Podloží, zemní těleso <sup>1)</sup>
	AB	CB	Nestmelené podkladní vrstvy (NV)				Stmelené podkladní vrstvy (SV)	Prolévané podkladní vrstvy (PV) a VŠ		
			MZK	ŠD <sub>A</sub>	ŠD <sub>B</sub>	MZ		Kostra	Výplň	
Recyklát z betonu	+	0/-	+	+	+	+/0	+	+/0	+/0	+/0
Recyklát ze zdiva	-	-	-	0/-	+	+/0	+	0/-	+/0	+
<b>Recyklát směsný</b>	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+
Recyklát z vozovek	+	+/0	+	+	+	+/0	+	+/0	+/0	+/0
Recyklát asfaltový	+	-	+/0	+	+	0/-	+	0/-	0/-	0/-

Vysvětlivky k použitelnosti jednotlivých typů recyklátů:

+ doporučuje se používat

- nedoporučuje se používat

0 podmíněně lze použít – omezení z hlediska technologických, ekonomických či ekologických důvodů

<sup>1)</sup> Zrnitý materiál do podloží vozovek, vrstevnatých násypů (ztužující vrstva), případně nepevněných krajnic vozovky PK [12]

Recykláty ze SDO se smí použít stejně jako běžně užívané materiály a výrobky z primárních surovin. Recyklované materiály by měly mít, stejně jako přírodní kamenivo, deklarované vlastnosti dle příslušných harmonizovaných norem, které jednoznačně předepisují jejich využití.

Jedná se zejména o:

- ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu
- ČSN EN 13043 Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch
- ČSN EN 13139 Kamenivo pro malty
- ČSN EN 13242+A1 Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace
- ČSN EN 13450 Kamenivo pro kolejové lože

Jestliže výrobek z recyklovaného materiálu splňuje požadavky uvedené v některé z těchto norem, může získat v určitých opatřeních také označení CE s dalšími požadovanými údaji. Takové

označení říká, že výrobek splňuje stanovené technické požadavky a při posuzování shody byl dodržen stanovený postup. Existují však také recyklované materiály, které je obtížné zařadit do podmínek definovaných výše uvedenými normami. Jedná se například o asfaltové, betonové nebo směsné recykláty a také recykláty ze zdiva nebo betonových částí staveb. Tyto materiály označení CE získat nemusí a způsob jakým budou ověřeny vlastnosti těchto materiálů závisí na dohodě mezi výrobcem a odběratelem. Obvykle je požadováno, aby vlastnosti recyklátu byly podepřeny protokolem o průkazní zkoušce od akreditované laboratoře a vystavením prohlášení o shodě na základě provedených zkoušek. [20] Na takto vyhotovených prohlášeních o shodě musí být vždy uvedeno, pro jaké použití je recyklovaný materiál vhodný. [9]

Nejčastěji bývá recyklát využíván jako recyklované kamenivo, kde je rozsah zkoušek deklarován podle zamýšleného použití nebo původu kameniva. Základní požadavky na prokazování vlastností jsou následující:

- 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

Je samozřejmostí, že provedení zkoušek nestačí pro zajištění bezpečného použití recyklovaného kameniva. Důležitou roli hraje také kontrola kvality původního materiálu jako například sledování pevnosti, stupně chemického, fyzikálního nebo mechanického znečištění a stáří materiálu. [21]

## 2.2.5 Cenové zhodnocení

Vzhledem k tlaku, který dnes sílí na využití recyklovaných materiálů, je důležitým aspektem také cena. Důležité je zmínit, že kalkulace ceny v případě recyklátů není jednoduchá jako u běžných přírodních materiálů. Cenu recyklátu ovlivňují dva hlavní faktory. Prvním je cena, kterou musí uhradit původce materiálu výrobci recyklátu při předání. Tuto položku ovlivňuje kvalita dovezeného materiálu. Jedná se zejména o jeho čistotu a kusovitost. Nejvyšší částku zaplatí původce za materiál, který je znečištěný. Nejedná se o látky nebezpečné, ale o látky, které musí být před recyklačním procesem odděleny, aby byla zajištěna výsledná kvalita recyklátu. Lze mezi tyto látky zařadit dřevo, papír, plasty nebo sklo. Za takto znečištěné materiály si výrobce účtuje příplatky, které začínají obvykle na 100kč/t, ale lze najít výjimky, kde jsou poplatky mnohonásobně vyšší. Materiál s obsahem nebezpečných látek obvykle výrobce nepřijímá vůbec, nebo si účtuje tak vysoké poplatky, že je pro původce materiálu návoz ekonomicky nevýhodný. Důležitým faktorem ve výsledné ceně je také kusovitost materiálu. Aby materiál nemusel být dělen jinými prostředky před vstupem do drtících jednotek, přijímají recyklační zařízení materiály do velikosti 400-600 mm. Pokud je kusovitost materiálu větší, podléhá zvýšením ceny pomocí poplatku v rozmezí 100-600 Kč/t. [2] Cena za předání recyklátu závisí také na vzdálenosti recyklačního střediska od místa, kde je SDO produkován. Obvykle se jako maximální vzdálenost uvažuje 35 km a pokud nejsou přepravovány SDO ve velkých objemech po železnici nebo loděmi, není větší vzdálenost ekonomická. Při větších vzdálenostech se navíc snižuje přínos recyklace. [15] Druhým faktorem je prodejní cena stanovená výrobcem recyklátu. Prodejní ceny recyklovaných materiálů nemají takový rozptyl jako náklady spojené s jejich výrobou, které platí původce při předání. Nejlevněji se nabízí recykláty směsné a recykláty ze zdiva, které jsou nabízeny za 30-135 Kč/t podle jakosti. Lze se setkat s případem, kdy je směsný recyklát vzhledem k nízké kvalitě nabízen pouze za náklady spojené s naložením. Nejčastějším a nejkvalitnějším nabízeným materiálem je recyklát betonový. Zde se cena pohybuje dle jakosti od 115-195 Kč/t. Obdobně jako u kameniva roste jejich cena s jemností drcení a snižující se šířkou frakce. Recykláty asfaltové se na recyklačních linkách vyskytují méně, také díky tomu, že se přivážejí nejčastěji ve formě ker získaných při demolici vozovky. Ceny asfaltových recyklátů mají velký rozptyl v závislosti na kvalitě a pohybují se v rozmezí 30-210 Kč/t. [2] Srovnání cen recyklovaných materiálů a přírodního kameniva lze vidět v tabulce 2.3. Pro porovnání byly využity platné ceníky pro rok 2020-2021 významných recyklačních středisek vybraných krajů České republiky.



Tabulka 2.3 - Srovnání prodejních cen jednotlivých materiálů

Typ materiálu	Název recyklačního centra								
	DUFONEV R.C., a.s.	LIKOL, spol. s.r.o.	LUMOS s.r.o.	RESTA s.r.o.	ENVISTONE spol. s.r.o.	BAUSET CZ, a.s.	RECYKLÁČ s.r.o.	KARE Praha, s.r.o.	ECO RETEL s.r.o.
recyklát směsný 0/8	35,-	20,-	50,-	10,-	-	-	59,-	30,-	-
recyklát směsný 0/16	35,-	50,-	-	-	-	-	-	-	-
recyklát směsný 0/32	35,-	-	-	-	40,-	-	-	-	-
recyklát směsný 0/63	35,-	-	50,-	10,-	40,-	115,-	-	-	100,-
recyklát směsný 32/63	35,-	50,-	50,-	-	60,-	-	-	30,-	-
recyklát betonový 0/8	-	-	-	70,-	-	-	79,-	-	100,-
recyklát betonová 0/16	150,-	-	-	70,-	-	-	-	-	-
recyklát betonový 0/32	115,-	-	155,-	70,-	-	-	149,-	115,-	-
recyklát betonový 0/63	150,-	100,-	145,-	70,-	195,-	160,-	139,-	85,-	170,-
recyklát betonový 32/63	160,-	-	165,-	70,-	-	-	169,-	115,-	210,-
přírodní kamenivo 0/32	225,-	-	-	-	-	-	-	325,-	-
přírodní kamenivo 0/63	255,-	-	-	-	-	250,-	-	325,-	-
přírodní kamenivo 32/63	265,-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Poznámka:** Ceny jsou uvedeny bez DPH v českých korunách za tunu. Veškeré ceny jsou získané z internetových stránek recyklačních center nebo komunikací se zaměstnanci.

## 2.3 SMĚSNÝ RECYKLÁT

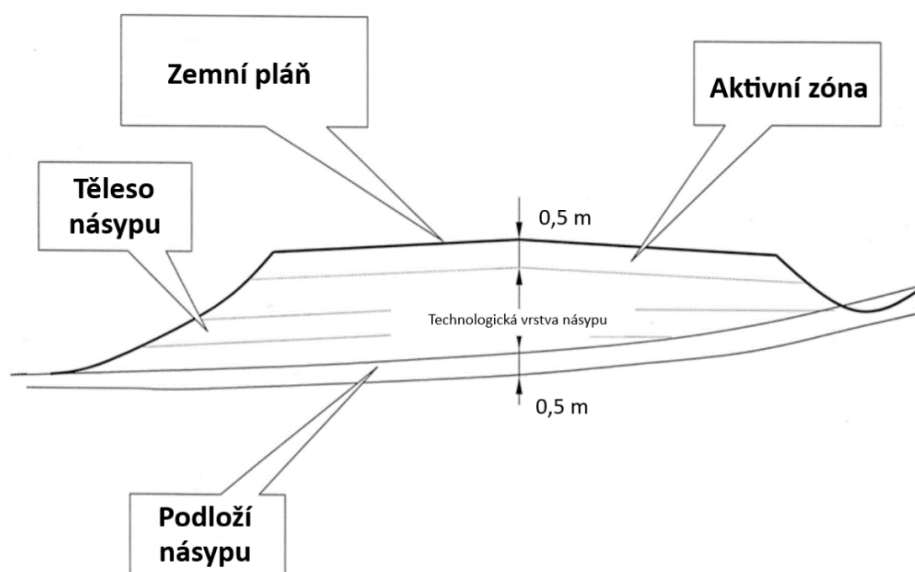
Směsný recyklát, který nemá pevně definované složení, je těžké zařadit do jedné kvalitativní kategorie. Z toho důvodu lze směsný recyklát rozdělit dle čáry zrnitosti, obsahu prachových částic nebo plnění technických požadavků na zeminy do několika kategorií, dle kterých lze uvažovat jeho oblast použití. Toto rozdělení lze přehledně shrnout do tabulky 2.4. Níže uvedené značení směsných recyklátů se dnes prakticky neobjevuje. Zřídka lze u výrobců vidět pouze označení římskou číslicí. Lze říct, že kvalitu recyklátu lze odhadnout také podle prodejní ceny. Nelze předpokládat, že recyklát k dostání za cenu ve výši nutných nákladů s jeho nakládáním, bude splňovat požadavky na použití do podkladních vrstev vozovek. [22]

Tabulka 2.4 - Použití směsného recyklátu v konstrukci vozovky [22]

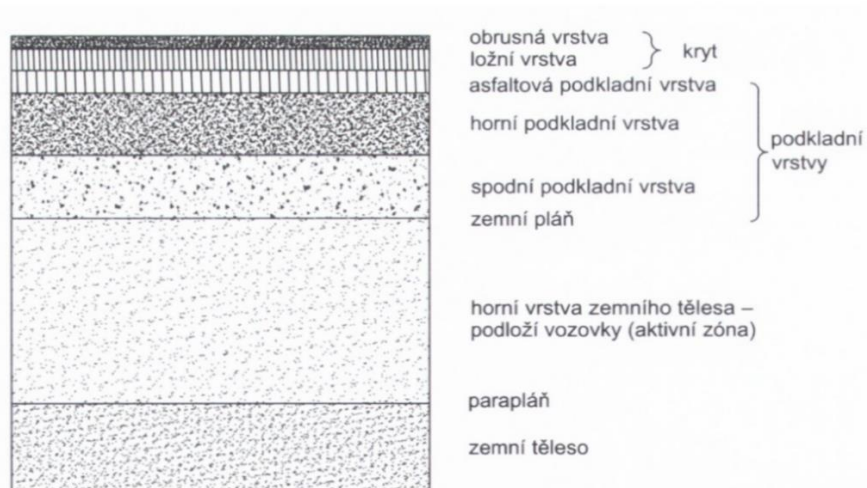
Typ směsného recyklátu	Oblast použití
směsný recyklát I – SR I	podkladní vrstvy vozovky
směsný recyklát II – SR II	stabilizované podkladní vrstvy vozovky; podloží vozovky
směsný recyklát III – SR III	stabilizované podkladní vrstvy vozovky; zemní těleso
směsný recyklát IV – SR IV	zemní těleso

### 2.3.1 Podloží vozovky pozemních komunikací

Podloží vozovky (aktivní zóna) je horní vrstva zemního tělesa na násypu nebo také zářezu, která se zpravidla provádí v tloušťce 0,5 m. Zřizuje se za účelem přenesení vlivu dopravního zatížení a klimatických vlivů. Horní líc této plochy se nazývá zemní pláň vozovky. [23] Umístění aktivní zóny lze názorně vidět na přiložených schématech zemního tělesa a konstrukce vozovky.



Obrázek 2.5 - Příčný řez zemním tělesem pozemní komunikace [24]



Obrázek 2.6 - Schéma vozovky na zemním tělese a umístění konstrukčních vrstev [19]

Recyklované stavební materiály se mohou pro stavbu zemního tělesa použít za stejných podmínek jako každá jiná zemina nebo kamenitá sypanina. Předpokladem je, že materiály neobsahují nežádoucí látky, které mohou mít vliv na životní prostředí a látky, které mění své vlastnosti působením klimatických vlivů. Takto bezvadné recyklované stavební materiály lze poté zatřídit, zpracovat a zkoušet stejným způsobem jako zeminy. [19] Použití běžných i recyklovaných stavebních materiálů do zemního tělesa a podloží vozovek pozemních komunikací upravuje norma ČSN 73 6133.

Nejvhodnějším recyklátem pro použití do zemního tělesa a aktivní zóny je svými vlastnostmi směsný recyklát. Jelikož je směsný recyklát směs především betonu, cihel a kameniva, používá se nejčastěji jako náhrada zeminy nebo mechanická úprava nevhodné zeminy. Pro násyp tělesa komunikace je svými vlastnostmi nejvhodnější směsný recyklát frakce 0/16, 0/32 nebo 16/32. Pro budování aktivní zóny je poté nejvhodnější střední frakce směsného recyklátu 0/32 nebo 16/32. Hrubší frakce, jako například 32/63 nebo 63< jsou vhodné zejména při budování obslužných lesních a polních cest, kde je nutné dočasné nebo trvalé zpevnění a odvodnění do spodních vrstev. [25]

Jak už bylo zmíněno výše, recyklované materiály se posuzují stejně jako běžné materiály, a proto je nutné před použitím zatřídit materiál dle tabulky 2.5. do skupiny, která určuje vhodnost a způsob jeho použití. Zařazení zeminy do této skupiny je nezbytné, protože použití zeminy bez jakékoliv zkušenosti může vést k chybným závěrům. Většina zemin je dle níže uvedené tabulky zařazena do skupiny podmíněčně vhodné, což znamená, že se její vlastnosti musí laboratorně ověřit a finální verdikt z těchto zkoušek musí znít jasně, a tedy vhodná nebo nevhodná.

Tabulka 2.5 - Použitelnost zemin pro výstavbu zemního tělesa [23]

	<b>NEPOUŽITELNÉ</b> <sup>a)</sup> k jakémukoli použití	<b>NEVHODNÉ</b> k přímému použití bez úpravy	<b>PODMÍNEČNĚ VHODNÉ</b> k přímému použití bez úpravy	<b>VHODNÉ</b> k přímému použití bez úpravy
<b>Podmínky použití</b>	Nelze upravit běžnými technologemi, použití se zpravidla vylučuje	Musí se vždy upravit <sup>c)</sup>	Podle dalších vlastností se rozhodne, zda lze použít přímo bez úpravy nebo zda se musí upravit	Lze použít přímo bez úpravy
<b>aktivní zóna</b>	Organické zeminy s obsahem organických látek větším než 6 % <sup>b)</sup> ,	ML, MI, CL, CI MH, MV, CH, CV	S-F MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC	SW, GW G-F
<b>násyp</b>	bahna, rašelina, humus, ornice, CE, ME	MH, MV, CH, CV	MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC ML, MI, CL, CI	SW, GW G-F S-F
<sup>a)</sup> Netýká se podloží násypu a svahů zářezu. <sup>b)</sup> Obsah 6 % je hranice pro středně organické zeminy dle ČSN EN ISO 14688-2. <sup>c)</sup> Neplatí pro poddajnou vrstvu vrstevnatého násypu.				

Pouze posouzení dle výše uvedené tabulky by však bylo nedostatečné, a proto je vhodné použít spolehlivější postup, který vhodnost použití zeminy upřesní:

- 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. Požadavek na maximální objemovou hmotnost neplatí pro materiály, které slouží pro vylehčení zemního tělesa a pro zeminy upravené pojivy.
- 2) Musí se upravit objemově nestabilní zeminy a horniny, jako jsou bobtnavé jíly nebo jílovité břidlice, u nichž bude i při běžných klimatických podmínkách v zemním tělese docházet k objemovým změnám větším než 3 %.
- 3) Jestliže zeminu nelze zpracovat, protože její vlhkost není optimální a tuto vlhkost nelze ovlivnit nebo se jedná o zeminu stejnozrnou (vátý písek), musí se zemina upravit. Může se stát, že optimální vlhkost zjištěná při zkoušce Proctor standard, bude z hlediska reálné hutnicí práce na stavbě příliš vysoká. V takové situaci lze interval přípustné vlhkosti upravit do požadovaných mezí. Je také důležité, aby množství vzduchových pórů v zemině nebylo po zhutnění vyšší než 12 %. Vyšší množství pórů může způsobit nadměrné samovolné dohutňování zemního tělesa a snadnou saturaci vlhkosti.
- 4) Další posouzení lze provést podle užití do zemního tělesa nebo aktivní zóny:
  - a) Při použití do aktivní zóny se zeminy dále posuzují podle únosnosti CBR. Zemina se může použít bez úpravy, jestliže je hodnota CBR rovna min. 15 % pro podloží P III,

30 % pro podloží P II nebo 50 % pro podloží P I. Pokud návrh vozovky počítá s podložím o vyšší únosnosti, než je požadované minimum, požadavky na CBR rostou. Typ podloží se zjišťuje dle zvláštního předpisu TP 170 a požadavky na něj jsou uvedeny v tabulce 2.7 níže.

- b) Při použití do násypu se zeminy dále posuzují podle IBI. Zemina se může použít bez úpravy, jestliže je hodnota IBI rovna min. 10 % pro násyp a 5 % pro podloží násypu. V případě použití zeminy do ztužující vrstvy vrstevnatého násypu se posuzuje podle CBR. Pro ztužující vrstvu musí být hodnota CBR min. 10 %. [23]

**POZNÁMKA:** V některých zemích se aktivní zóna zahrnuje do konstrukce vozovky, a proto se vlastnosti zemín pro podloží vztahují až na materiál ležící pod aktivní zónou. V takových případech jsou požadavky a návrhové postupy zcela odlišné. [19]

K předešlým posudkům je nutné doplnit také posouzení na filtrační kritérium. To musí být dodrženo, pokud se při stavbě zemního tělesa použijí vrstvy z odlišných materiálů ležících nad sebou, aby nedocházelo k pronikání materiálu jedné vrstvy do druhé. Tato situace nastává zejména na rozhraní konstrukce vozovky s podložím, kde pronikání jemného materiálu z podloží do nestmelené vrstvy může způsobit její postupné znehodnocení. Požadavek na filtrační kritérium musí být dodržen také při provádění první vrstvy násypu a podloží násypu. Posudek na filtraci se posuzuje dle níže uvedeného vztahu.

$$\frac{d_{15} \text{ nestmelené vrstvy}}{d_{85} \text{ zeminy}} < 5$$

Jestliže zeminy ve vzájemném kontaktu tomuto kritériu nevyhovují, je nutné zrnitost zeminy jedné vrstvy upravit do přijatelných mezí. Úprava se provádí promísením jemnější frakce s hrubozrnnou frakcí kamenité sypaniny nebo vložení separační geotextílie navržené dle zvláštních předpisů TP 97 Geosyntetika v zemním tělese pozemních komunikací. [23]

Pokud zeminy splňují výše uvedené požadavky, lze je použít bez jakékoliv úpravy. Pokud však dojde k nesplnění některé z podmínek, je nutné tyto zeminy upravit. Úprava se provádí přidáním pojiva nebo mechanickým mísením s odlišnou zeminou, která vykazuje jiné granulometrické složení. Výsledkem takové úpravy je zlepšení zpracovatelnosti, snížení vlhkosti, namrzavosti a zvýšení pevnosti. Každý ze zmíněných způsobů úpravy je vhodný pouze pro určité druhy zemín, a proto je důležité tyto způsoby správně aplikovat.

**Mechanická úprava** se provádí mísením granulometricky nevhodné zeminy s jinou zeminou za účelem zlepšení zrnitosti, čímž selepší zpracovatelnost a mechanické vlastnosti. Mechanická úprava je vhodná zejména pro stejnozrnné šterky a písky nebo zeminy bez značného podílu

plastických příměsí. Může se stát, že vhodná zemina vznikne také smísením dvou granulometricky nevhodných zemin. Mechanická úprava nemusí být vhodná u jemnozrnných zemin, kde dojde pouze k obalení přidaného materiálu bez znatelných změn vlastností. Z tohoto důvodu se jemnozrnné zeminy upravují chemicky nebo kombinací mechanické a chemické úpravy.

**Chemická úprava** se provádí přidáním pojiva. Pro úpravu jemnozrnných zemin s nízkou a střední plasticitou, spraší a sprašových hlín je vhodné vzdušné vápno. Pro úpravu písčito-hlinitých zemin a stejnozrnných písčitých nebo štěrkovitých zemin je vhodný cement nebo hydraulické silniční pojivo. V případě výskytu nehomogenních úseků lze použít směsná hydraulická silniční pojiva, která obsahují jak vápno, tak složky podobné cementu jsou vhodná pro širší oblast různých druhů zemin. Přidání pojiva ihned snižuje vlhkost a plasticitu zeminy a tím zvyšuje její únosnost. Nedochází však pouze k okamžitým účinkům, ale také dlouhodobým, které se u vápna projevují tzv. pucolánovou reakcí a u ostatních hydraulických pojiv hydratačním procesem. [19] [23]

Požadavky na únosnost upravených zemin v aktivní zóně předepisuje ČSN 73 6133 a lze je shrnout přehledně do tabulky 2.6 uvedené níže.

*Tabulka 2.6 - Požadované hodnoty únosnosti CBR pro upravené zeminy v aktivní zóně [23]*

Způsob použití		Požadované hodnoty <sup>a)</sup>		
		CBR <sup>c)</sup>	Minimální vlhkost směsi	Okamžitý index únosnosti
Aktivní zóna <sup>b)</sup>	Podloží P III	CBR <sub>15</sub>	W <sub>0,9</sub>	IBI <sub>DV</sub>
	Podloží P II	CBR <sub>30</sub>	W <sub>0,9</sub>	IBI <sub>DV</sub>
	Podloží P I	CBR <sub>50</sub>	W <sub>0,9</sub>	IBI <sub>DV</sub>
<sup>a)</sup> Kategorie podle ČSN EN 14227-10, 11, 12, 13 a 14 <sup>b)</sup> P I, P II, P III jsou typy podloží dle technických podmínek TP 170 <sup>c)</sup> Zhotovení a zrání zkušební tělesa se provádí podle příslušné ČSN EN 14227-10 až 14				

Vzhledem k tomu, že směsný recyklát nemá přesně určené složení, lze se setkat také se směsným recyklátem, který má zvýšený obsah cihelných střepek. Takový recyklát je vhodný jak pro stavbu zemního tělesa, tak pro zhotovení podloží vozovky. Obecně je cihelný střepek velmi vhodný k mechanickému zlepšení vlastností jemnozrnných zemin v podloží pozemní komunikace. Jeho přítomnost snižuje vlhkost zeminy v podloží a upraví výslednou zrnitost do požadovaných mezí. Při nadměrném množství cihelných střepek ale může docházet k problematickým vlastnostem. Jedná se zejména o snížení odolnosti proti drcení a zvýšení namrzavosti. Ve stavu přirozené vlhkosti je namrzavost dobrá, ale při nasycení vodou s obsahem soli se odolnost proti namrzání výrazně snižuje. [26]

## 2.3.2 Stanovení typu podloží

Jak je patrné z výše uvedených tabulek, rozeznáváme tři typy podloží dle únosnosti, a to P I, P II a P III. Pro určení typu podloží je nutné znát následující charakteristiky, určené v TP 170: **Modul pružnosti** je základní návrhovou charakteristikou únosnosti podloží a značí se  $E_d$ . Tato hodnota se mění během ročních období v závislosti na vlhkosti a působení mrazu a tání. Modul pružnosti závisí také na působícím napětí. Přímé měření modulu pružnosti je proto velmi komplikované, a proto se pro jeho stanovení využívají nepřímé metody nebo se modul odvodí empiricky ze zatřídění zemin podloží dle klasifikace.

**Poměr únosnosti CBR** se stanovuje dle ČSN EN 13286-47. Pro zhotovení zkušebních těles se využívá Proctorovy standardní hutnicí práce při optimální vlhkosti. Takto připravený vzorek se poté sytí ve vodě po dobu 96 hodin pro získání výsledné hodnoty  $CBR_{sat,96}$ .

**Zatřídění zeminy podloží dle klasifikace** se provádí dle ČSN 73 6133

Návrhové charakteristiky podloží se poté při návrhu vozovky určí jedním z následujících postupů: **Obvyklý postup – stanovení typu podloží** jedná se o jednoduchý postup využívaný při návrhu vozovky prostým výběrem konstrukce z katalogu nebo při standardním výpočtu, kdy se typ podloží použije jako vstupní údaj do výpočetního programu. Typ podloží se určí dle přiložené tabulky 2.7 zatříděním zeminy podloží dle klasifikace nebo z poměru únosnosti CBR zeminy podloží. [27]

Tabulka 2.7 - Určení typu podloží v závislosti na hodnotě CBR a zatřídění zeminy podloží [27]

Typ podloží	min. CBR <sup>1)</sup>	Zatřídění zeminy podloží podle klasifikace			Minimální kontrolní modul přetvárnosti $E_{def2}$ <sup>2)</sup>	Návrhový modul pružnosti $E_d$
		Vhodné	Podmínečně vhodné	Nevhodné (upravit vždy)		
P III	15 %	G-F, SW	S-F, MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC	ML, MI, MH, MV, CL, CI, CH, CV	45 30 <sup>3)</sup>	50
P II	30 %	G-F, GW	-	-	60	80
P I	50 %	GW, kamenitá sypanina	-	-	90	120

<sup>1)</sup> Stanovení typu podloží podle CBR se nepožaduje v případě vozovek s třídou dopravního zatížení IV až VI, kde se doporučuje vycházet ze zatřídění zeminy podloží dle klasifikace.

<sup>2)</sup> Modul přetvárnosti  $E_{def2}$  podle ČSN 72 1006. Pro vozovky s třídou dopravního zatížení IV až VI je možno typ podloží stanovit dle  $E_{def2}$ .

<sup>3)</sup> Platí pro vozovky v návrhové úrovni porušení D1 třídy dopravního zatížení VI a všechny vozovky v návrhové úrovni porušení D2.

Jestliže se stanovuje podloží dle zatřídění zeminy podle klasifikace musí se zeminy nevhodné upravit vždy a zeminy vhodné a podmíněčně vhodné se musí posoudit dle skutečných podmínek s ohledem na zpracovatelnost a jejich vlhkost. Jestliže jsou tyto podmínky nepříznivé nebo neznámé, musí se pro zeminy vhodné (G-F, GW) zvolit typ podloží s nižšími parametry únosnosti a zeminy podmíněčně vhodné se musí upravit. Při odvození typu podloží z CBR může nastat situace, že požadavek CBR je splněn, ale zemina nevyhoví jinému požadavku dle ČSN 73 6133. Prokázání minimálních hodnot CBR pro uvedené typy podloží také nemusí znamenat dosažení kontrolního modulu přetvárnosti  $E_{def2}$ . [27]

**Individuální postup – stanovení návrhového modulu pružnosti podloží  $E_d$**  – postup používaný v případě potřebné podrobné optimalizace návrhu vozovky výpočtem s ohledem na konkrétní podmínky stavby a dopravní význam komunikace. Modul pružnosti  $E_d$  lze získat dvěma způsoby:

- Stanovením z tabulkových hodnot CBR
- Stanovením ze zatřídění zeminy dle klasifikace

Jestliže se stanovuje modul pružnosti  $E_d$  stanovením hodnot CBR využije se tabulky 2.8. Pro mezilehlé hodnoty se modul pružnosti stanoví lineární interpolací. Pro hodnoty CBR > 50 % nelze provádět extrapolaci. Jestliže se na části nebo celé aktivní zóně předpokládá CBR > 50 %, odvodí se modul pružnosti dle zatřídění zeminy podle klasifikace, viz tabulka 2.9. [27]

*Tabulka 2.8 - Stanovení návrhového modulu pružnosti dle hodnot CBR [27]*

CBR	Návrhový modul pružnosti $E_d$ (MPa)	Součinitel příčného přetvoření
15 %	50	0,40
30 %	80	0,35
50 %	120	0,30

*Tabulka 2.9 - Stanovení návrhového modulu pružnosti ze zatřídění zemin [27]*

Zemina (dle ČSN 73 6133)	Modul pružnosti pro vlhkost (MPa)		Součinitel příčného přetvoření	
	po sycení	mírně nad optimem	po sycení	mírně nad optimem
GW, GP nebo kamenitý násyp a skalní podloží	150	150	0,30	0,30
SW	120	120	0,35	0,35
SP, G-F, GC, GM	70	80	0,35	0,35
SC, S-F, SM, CG, MG	40	50	0,40	0,40
MS, ML, MI, MH, MV CS, CL, CI, CH, CV	25	45	0,40	0,40



Důležité je dávat pozor, aby nedošlo k záměně hodnot návrhového modulu pružnosti  $E_d$  a statického modulu přetvárnosti  $E_{def2}$ . Mezitím co modul pružnosti  $E_d$  reprezentuje chování podloží pod vozovkou za průměrných podmínek během doby její životnosti, tak statický modul přetvárnosti  $E_{def2}$  je výsledkem statické kontrolní zkoušky pro zjištění vhodnosti použitého materiálu a jeho dostatečného zhutnění během stavby. [27]

Výsledky zkoušení modulu pružnosti na nestmelených směsích ukazují, že směsný recyklát může nahradit běžně užívané materiály. Při měření vrstva provedená ze směsného recyklátu frakce 0/32 vykazovala modul pružnosti přibližně 230 MPa. V porovnání s modulem pružnosti nestmelené vrstvy šterkodrti, kde je uvažovaný modul pružnosti 400 MPa, se jedná o velmi dobrý výsledek. Vzhledem k požadovaným hodnotám modulu pružnosti v TP 170 lze očekávat, že tyto podmínky směsný recyklát splní. Před použitím je však samozřejmostí ověření dalších vlastností, a to zejména zrnitosti, odolnosti proti drcení a odolnosti proti zmrazování a rozmrazování, případně namrzavosti. [26] Výsledky ze zkoušek modulu pružnosti směsného recyklátu a jejich porovnání s běžně užívanými materiály lze vidět v tabulce 2.10.

Tabulka 2.10 - Orientační hodnoty návrhového modulu pružnosti nestmelených vrstev [26]

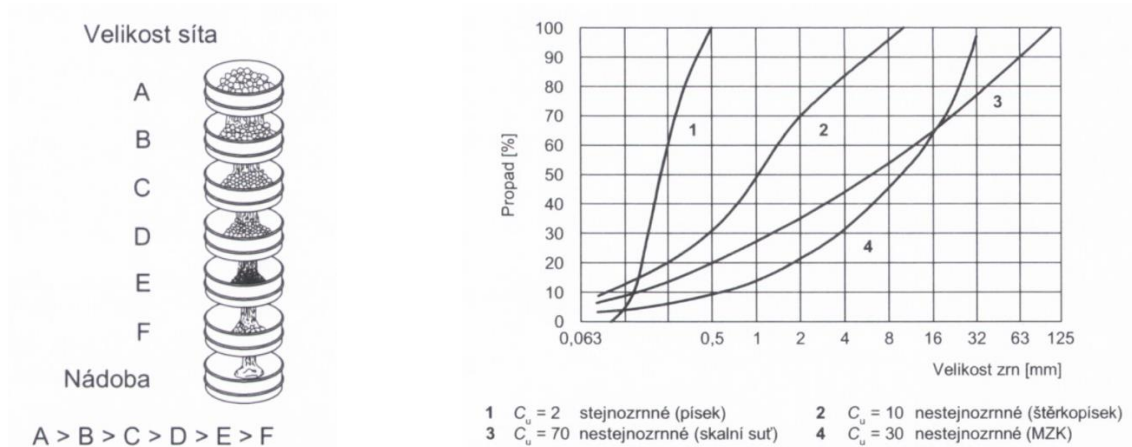
Modul pružnosti [MPa]	frakce 0/32 MZK	frakce 0/22 ŠD	frakce 0/32 směsný recyklát
$E_r = \frac{\sigma_I}{\varepsilon_I}$	150–715	120–380	60–225
	130–670	60–270	60–230
	120–740	115–420	80–240
<b>Poznámka:</b> hodnoty naměřených modulů pružnosti pro jednotlivé nestmelené směsi jsou uvedeny v intervalu,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

### 2.3.3 Zkoušení směsných recyklátů

Vzhledem k tomu, že směsný recyklát, jako znovuzískaný materiál ze stavebního a demoličního odpadu, nemá vždy stejné vlastnosti jako například běžně užívané materiály, je nutno jej podrobit zkoušení pro ověření jeho vlastností. Souvisí to také s jeho problematickými vlastnostmi, a proto pro použití směsného recyklátu, především do aktivní zóny, je potřeba ověření pomocí následujících zkoušek.

### 2.3.3.1 Zrnitost

Zkouška slouží ke zjištění zastoupení velikosti jednotlivých zrn v zemině. Pro zkoušení je potřeba sestava zkušebních sít se čtvercovými otvory, které jsou seskládány nad sebe od nejhrubšího po nejjemnější. Proséváním přes zkušební síta dojde k rozdělení zeminy do zrnitostních podílů dle velikosti použitých sít. Jelikož se částice zeminy menší než 0,063 mm zachycují na hrubších zrnech, provádí se předem promývání vzorku vodou. Teprve poté se vzorek vysuší a prosévá. Pro zjednodušení je možné využít mechanické třepání nakonec doplněné ručním proséváním pro minimalizaci chyb měření. Jakmile je prosévání ukončeno, zváží se zbytky na sítích včetně propadu na síť s velikostí ok 0,063 mm. Vypočítá se procentuální podíl z celkové hmotnosti navážky a odpočtem od 100 % se získá souhrnné procento propadu. [19]



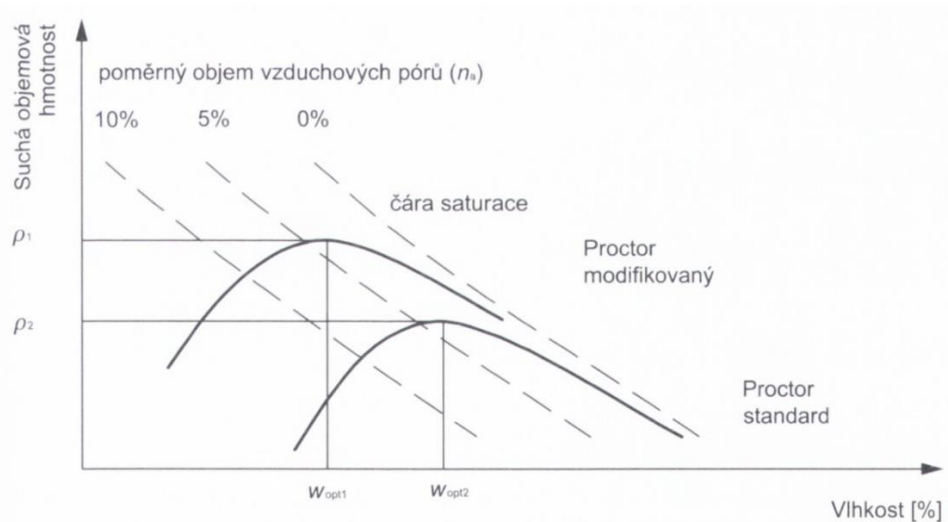
Obrázek 2.7 - Sada zkušebních sít [19]

Obrázek 2.8 - Příklady různých čar zrnitosti [19]

### 2.3.3.2 Zhutnitelnost – Proctorova zkouška

Při hutnění zeminy dochází ke změnám uspořádání jednotlivých zrn tak, že menší zrna vyplňují prostor mezi zrny většími. Zvýšení objemové hmotnosti při hutnění je tedy způsobeno zaplněním pórů jemnější zeminou. Do jaké míry toho lze dosáhnout závisí nejen na intenzitě hutnění, ale také na vlhkosti. Platí, že čím více vody je obsaženo, tím se hutnění účinkují lepší. Platí to však pouze do doby, než voda začne vyplňovat póry v zemině a svým objemem tak začne bránit v jejich zmenšování. Z toho vyplývá poznatek, že existuje optimální množství vody, které zajistí optimální vlhkost zeminy. Při takové vlhkosti lze dosáhnout maximální objemové hmotnosti a tím pádem nejlepšího účinku zhutnění zeminy. Optimální vlhkost se zjistí stanovením suché objemové hmotnosti každého vzorku, připraveného Proctorovou zkouškou, a graficky se vyjádří závislost této objemové hmotnosti na vlhkosti při které byl vzorek hutněn.

Z křivky, která se proloží těmito body se získá maximální objemová hmotnost a optimální vlhkost. [19]

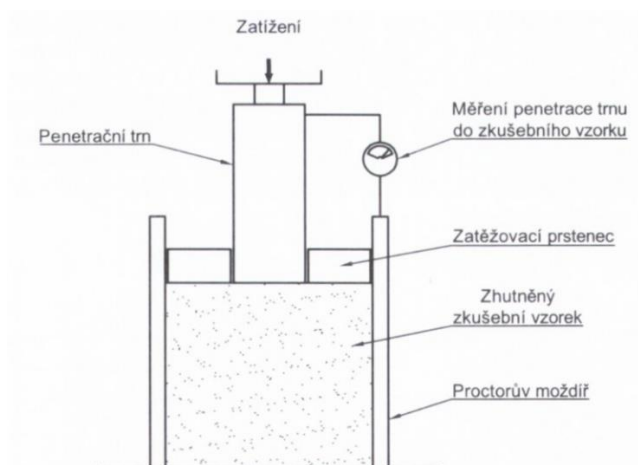


Obrázek 2.9 - Výsledný graf Proctorovy zkoušky standard a modifikované [19]

Z obrázku lze vyčíst, že při vyšší intenzitě hutnění se zvyšuje objemová hmotnost při dosažení nižší vlhkosti při zachování téměř identického poměru objemu vzduchu v pórech. Z toho důvodu existuje kromě standardní Proctorovy zkoušky, také zkouška modifikovaná, která využívá těžší pěch při hutnění z větší výšky ve více vrstvách. [19]

### 2.3.3.3 Kalifornský poměr únosnosti CBR

Jedná se o empirickou zkoušku vyvinutou v Kalifornii před 2. světovou válkou. Pro zkoušku se využívá vzorku připraveného pomocí Proctorovy zkoušky. Takto připravený vzorek se nechá po dobu 4 dní sytit vodou. V případě vzorku upraveného pojivem se k sycení vzorku přistoupí až po 3 dnech zrání na vzduchu. Po dokončení zrání lze přistoupit ke zkoušení, kdy se hotový vzorek upevní do přístroje a na horní povrch se uloží kruhové prstence, které simulují přitížení od vrstev vozovky. Do takto připraveného vzorku se nechá pronikat ocelový trn o průměru 50 mm rychlostí 1,27 mm/min. Při pronikání trnu se stanoví síla, která je potřebná pro zatlačení do stanovené hloubky. Výsledná síla se porovná s referenční hodnotou naměřenou na normovém kamenivu, kterým je drcený vápenec, považovanou za celosvětový standard. Výsledek CBR je pak poměr dosažené a referenční síly vyjádřený v %. Zkouška slouží pro stanovení únosnosti podloží a z hlediska účelu navrhování vozovek je CBR celosvětovým základem pro nepřímé stanovení návrhového modulu pružnosti. [19]



Obrázek 2.10 - Zkouška CBR [19]

### 2.3.3.4 Stanovení míry namrzavosti přímou metodou

Jedná se o metodu, která je založena na napodobení podmínek kapilárního syčení zeminy a působení mrazu v laboratoři. Zkouška se provádí zejména pro zeminy jejichž obsah částic menších než 0,125 mm je větší než 5 %. Měřicí zařízení se skládá ze 4 zkušebních buněk do kterých jsou umístěna válcová tělesa zeminy zhotovená Proctorovým zařízením. Variantně lze tělesa hutnit také přímo do zkušebních buněk. Takto připravená tělesa jsou umístěna do chladicí skříně tak, aby se mohla rozpínat pouze ve svislém směru. prvních 17 hodin probíhá syčení vzorků vodou. Po uplynutí syčení se každé těleso po dobu 5 dní (120 hodin) shora zmrazuje při teplotě  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ze spodu sytí nadále vodou, a přitom se měří mrazový zdvih. Vyhodnocení využívá lineární vztah mezi přírůstkem zdvihu shora zmrazované zeminy a přírůstkem druhé odmocniny indexu mrazu podle vztahu: [19]

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

kde  $\beta$  míra namrzavosti;

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

$I_m$  index mrazu, který je pro toto měření definován jako hodnota kumulativního součtu absolutních hodnot středních hodinových teplot vzduchu pod bodem mrazu při zkoušce [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Tabulka 2.11 - Kritérium míry namrzavosti [19]

Míra namrzavosti zemin a materiálů	Průměrná hodnota $\beta$
Nenamrzavé	< 0,25
Mírně namrzavé a namrzavé	0,25 - 0,50
Nebezpečně namrzavé	> 0,50

## 2.3.4 Problematické vlastnosti

Jelikož je směsný recyklát výsledným výrobkem ze stavebního a demoličního odpadu, je u něj důležité více než jinde sledování kvality. Výslednou kvalitu recyklátu ovlivňuje především způsob získávání SDO a kvalita technologie, která jej zpracovává. Problematická vlastnost, kterou je nutné řešit ihned při demolici je sledování obsahu škodlivých látek. Při použití recyklátu se zvýšeným obsahem cihel je důležitá odolnost proti drcení. Neméně důležitou vlastností je také namrzavost recyklátu, která hraje důležitou roli zejména při jeho použití do podloží vozovek.

### 2.3.4.1 Obsah škodlivých látek

Recyklované materiály nemusí splňovat pouze technické parametry dle příslušných norem, ale také musí být splněny požadavky na jejich nezávadnost vůči lidskému zdraví a životnímu prostředí. Vhodnost materiálu se posuzuje podle chemického složení, obsahu škodlivých látek a možnosti jejich vylučování do okolního prostředí. Ke stanovení nebezpečných složek stavebních a demoličních odpadů v sušině a ve výluhu se používají limity stanovené vyhláškou 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. [28] Nejvýše přípustné koncentrace škodlivin dle vyhlášky lze shrnout do tabulky 2.12, ve které je zároveň provedeno srovnání s limity platnými v zahraničí.

Tabulka 2.12 - Srovnání legislativních limitů pro obsah škodlivých látek v ČR a zahraničí [28]

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

Pro stanovení škodlivin bylo provedeno zkoušení na betonových a cihelných recyklátech společně se zeminou a kamenivem. Jednou z nebezpečných látek obsažených v recyklátech jsou polyaromatické uhlovodíky (PAU). Dle vyhlášky se počítá s jejich sumou, která je stanovena na 6 mg/kg. Běžně jsou tyto látky obsaženy například v motorové naftě nebo asfaltovém pojivu (dehtu), ale vznikají také při spalování. Limitní hodnotu stanovenou vyhláškou překročilo 57 % zkoušených vzorků, což je neuspokojivý výsledek. Další nebezpečnou látkou je arsen, který je však běžně se vyskytujícím prvkem v přírodě. Běžně se nachází v množství od 2–20 mg/kg. Zkoušením bylo zjištěno, že 73 % vzorků nevyhovělo požadované limitní hodnotě 10 mg/kg.

Ze všech vzorků byl u 85 % překročen povolený limit nebezpečných látek. Jestliže se má zajistit dostatečné využívání recyklátů, je potřeba najít rovnováhu mezi nastavenými limity pro jejich opětovné použití a riziky hrozícími při jejich použití. Například při zvýšení limitní hodnoty obsahu arsenu po vzoru evropských států na dvojnásobek by místo 73 % nevyhovělo pouhých 17 % recyklátů. Hodnota 20 mg/kg arsenu je přitom běžně k vidění také u primárních zdrojů zeminy či kameniva. [28]

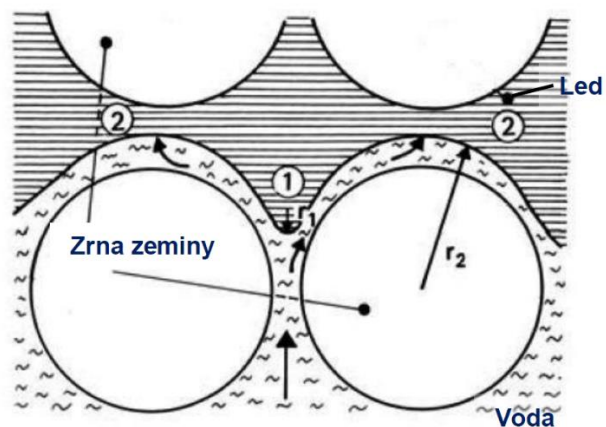
#### 2.3.4.2 Odolnost proti drcení

Otlukovost se zjišťuje zkouškou Los Angeles (LA). Problémy s odolností proti drcení nastávají především u směsných recyklátů s vysokým obsahem cihelných střepů. U běžného přírodního kameniva je maximální povolená hodnota LA 40 %, v určitých případech 50 %. U směsného recyklátu s významným obsahem cihel ( $\geq 50$  % objemu) může být výsledná hodnota až 60 % nebo dokonce 70 %. Takto vysoká otlukovost je problémem především při použití recyklovaného materiálu do podkladních vrstev. V případě použití do aktivní zóny se nejedná o problém, který by znemožnil použití takového materiálu. [26]

#### 2.3.4.3 Namrzavost

Namrzavost je velmi důležitou vlastností zeminy, která se projevuje postupným zvětšováním objemu při teplotách pod bodem mrazu a stálého přísunu vody. Namrzavost je důležitá při návrhu podloží vozovek, protože vlivem promrznání zemin, do kterých má přístup voda, dochází k mrazovým zdvihům. Tato vlastnost je obecně problematická u jemnozrnných zemin, především jílovitých. Při nízkých teplotách mohou nastat dvě fáze. První fáze je stav kdy voda obsažená v zemině začne mrznout a zvětšovat svůj objem. V první fázi tedy mrzne voda, která byla v zemině ještě předtím, než začaly záporné teploty působit. Takto zmrzlá voda zvětší svůj objem přibližně o 9 %. Druhá fáze začne teprve v momentě, kdy se již zmrzlé množství vody nadále zvětšuje díky kapilárnímu sycení, které může být dlouhodobého charakteru. V této situaci

se mezi jednotlivými zrny na kontaktu mezi krystalem ledu a nezamrzlé vody vytváří zakřivená plocha, kterou lze vidět na obrázku 2.11. Následkem kontaktního tahového napětí je tlak v krystalu ledu větší než v okolí nezamrzlé vody a tím pádem dochází ke vzniku tzv. krystalizačního tlaku. Krystal ledu poté dále absorbuje vodu z okolí, která je zde právě kvůli kapilárnímu sycení. Při takové situaci se z malých částeczek ledu začnou tvořit ledová tělíska, jejichž počet a velikost se zvětšuje. Objem zmrzlé vrstvy se může zvětšit až o 30 %. Po oteplení se ledové čočky rozpouští, ale jelikož nemá nahromaděná voda kam odtéct, výrazně snižuje parametry únosnosti zeminy. V případě směsných recyklátů je potřeba dávat pozor na zvýšené množství cihelných stěpů, které mají nadměrnou nasákavost a tím pádem zvýšené riziko nadměrných mrazových zdvihů. [19] [29]



Obrázek 2.11 - Zakřivení povrchu nezamrzlé vody [29]

## 2.4 ZAHRANIČNÍ ZKUŠENOSTI

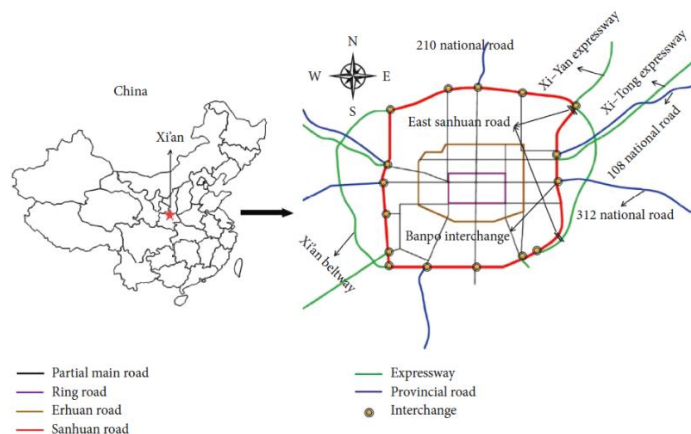
Zastoupení stavebního a demoličního odpadu je ve většině států srovnatelné s ČR, v určitých případech dokonce o několik procent vyšší. Využití SDO je však rozdílné, a proto je složité navrhnout jednotné podmínky užívání. Lze se setkat s odlišnými přístupy k užívání SDO a recyklátů. V této kapitole bude zmíněno několik zajímavých informací ze zahraničí, kde byly recykláty použity nejen jako materiál při výstavbě cyklostezek a nemotoristických komunikací, ale také jako materiál pro výstavbu zemních těles a podloží vozovek při výstavbě městského okruhu.

### 2.4.1 Čína

V posledních letech je Čína významným producentem stavebního a demoličního odpadu, což plyne z velmi rychlého rozvoje stavebního průmyslu a vysokého tempa urbanizace, kdy je velké množství budov demolováno. Podíl SDO mezi všemi odpady zabírá přibližně 30–40 %. Přibližné výpočty a studie ukazují, že výsledkem demolice 1 m<sup>2</sup> budovy je přibližně 1 m<sup>3</sup> SDO, což při přepočtu na reálné rozlohy budov v městských centrech znamená velmi vysoké množství produkovaného SDO. Množství vyprodukovaného SDO je přibližně 0,4 miliardy tun ročně. Velmi výrazným problémem je také míra recyklace. Ta se v Číně pohybuje okolo 5 %, což lze ve srovnání s předními evropskými státy, kde míra recyklace dosahuje přibližně 90 %, označit za nedostačující. Větší část SDO se odváží na okraj města, kde je skládkována na upravených místech nebo na místech bez jakéhokoliv zabezpečení, což vede nejen k obrovské ztrátě půdy, ale také k ohrožení zdraví obyvatel. Čína proto přistupuje k problému zodpovědně a hledá možné řešení k využití SDO.

Stavební a demoliční odpad je v Číně využíván především pro výrobu stavebních dílů, jako kamenivo do betonu nebo alternativa k přírodním materiálům do konstrukcí vozovek. Vzhledem ke kvalitě výsledných recyklátů a samotných SDO je však takové použití nedostačující, a proto byly zahájeny výzkumy na využití těchto materiálů do podloží vozovek a zemních těles komunikací, kde jsou požadavky mírnější. Podle národního plánování má být do roku 2030 vybudováno 47 tis. Km rychlostních silnic a 100 tis. Km státních silnic. Za účelem využití SDO a recyklátů do těchto komunikací byl realizován v roce 2017 silniční projekt s názvem Xí'an Sanhuan road, kde měl být využit SDO převážně do zemního tělesa a podloží vozovky. Jedná se o směrově rozdělenou komunikaci se čtyřmi jízdními pruhy v každém jízdním pásu, přičemž je z velké části navržena v násypu o výšce zemního tělesa od 2,5 do 4 m. Plánek s navrženým novým stavem lze vidět na obrázku 2.12.





Obrázek 2.12 - Schéma vedení městského okruhu Sanhuan road in Xi'an [30]

Na použitém materiálu byly postupně zhotoveny zkoušky zrnitosti, Proctorova zkouška, pevnost v tlaku a Kalifornský poměr únosnosti. Na stavbě bylo laboratorní zkoušení doplněno zkouškou zhutnění. Laboratorními výsledky bylo zjištěno, že optimální vlhkost materiálu pro hutnění je mezi 15-16 %. Při pevnosti v tlaku byla zjištěna průměrná pevnost 0,74 MPa. Průměrná hodnota zkoušky CBR vyšla 34,7 %. Všechny tyto výsledky splnily požadavky pro použití do podloží a zemního tělesa pozemní komunikace. Zkouška zhutnění na stavbě ukázala, že při obsahu vody mezi 14,8-16 % byla míra zhutnění od 97-99 %, což potvrdilo správnost laboratorních výsledků. Na takto zhutněné vrstvě byl zjištěn také modul pružnosti, který dosáhl průměrné hodnoty 162,69 MPa. [30] [31] V dnešní době je projekt hotový a kontroluje se jeho chování.



Obrázek 2.13 - Hotová silnice Sanhuan road in Xi'an [29]

Vzhledem k tomu, že změna vlhkosti může významně změnit mechanické vlastnosti násypů a jejich únosnost, proběhlo na vystavěném úseku dlouhodobé monitorování vlhkostních poměrů. Tímto monitorováním bylo zjištěno, že největší vlhkost se drží uprostřed násypu (přibližně více

než 16 %) a směrem k hornímu a dolnímu povrchu se vlhkost snižuje k 10 %. Jestliže jsou odvodňovací prvky poškozené, zvyšuje se vlhkost především v krajích zemního tělesa. Pozornost by měla být věnována především prosakování svahů a horní vrstvy tělesa, přičemž doporučení je využít vodotěsných geotextilií k ochraně. [32]

## 2.4.2 Španělsko

Španělsko v oblasti nakládání s odpady patří ke středně pokročilým. Fungují zde stanovené národní předpisy a samozřejmě také předpisy vydané evropskou unií. Dříve se ve španělsku většina SDO ukládala na skládkách, přičemž v dnešní době je skládkováno pouze 5 % všech těchto materiálů. 70 % SDO je recyklováno a využito zpět ve výstavbě. [33] Španělsko produkuje ročně přibližně 120 mil. tun odpadu, z čehož přibližně 22 % tvoří SDO. Významný podíl všech SDO tvoří směsný stavební odpad, k jehož využití však nejsou nakloněny národní předpisy. Zkouškami přitom bylo zjištěno že použití přírodního kameniva, recyklovaného kameniva a směsného recyklátu v zemním tělese komunikace je možné. Pro zvýšení pozornosti byl proveden silniční výzkum, kdy byla vybudována účelová nezpevněná komunikace se slabým provozem, v tomto případě méně než 11 těžkých vozidel denně. Komunikace byla postavena na podloží z jílu, přičemž těleso vozovky bylo vybudováno ve třech úsecích. První úsek vybudován pouze z přírodního kameniva, druhý úsek z přírodního kameniva a směsného recyklátu a třetí úsek pouze ze směsného recyklátu. Jíl v podloží byl navíc klasifikován jako nevhodná půda, což snižuje únosnost a způsobuje poruchy vozovky vlivem dopravního zatížení. Před výstavbou byly užití materiály důkladně testovány v laboratoři na požadované zkoušky. Jednalo se zejména o zrnitost, zhutnitelnost dle Proctorovy zkoušky, Kalifornský poměr únosnosti nebo odolnost proti drcení Los Angeles.

Na zhotovené komunikaci následující dva roky probíhalo monitorování, aby byly odhaleny důležité vlastnosti a chování recyklovaných materiálů v porovnání s těmi přírodními. Při měření průhybů bylo zjištěno, že průhyby v sekci vytvořené pouze z přírodního kameniva jsou o něco nižší než v sekcích s využitím směsného recyklátu. Naopak průhyb v sekci s využitím pouze směsného recyklátu byl nižší než v sekci zhotovené kombinací přírodního a recyklovaného materiálu. Celkově však byly naměřené průhyby velmi nízké a pro tento typ komunikace vyhovující. Trvalé deformace v jízdni stopě se po dvou letech provozu blížily 10 mm, což lze považovat u tohoto významu komunikace za vyhovující. Lze tedy říct, že směsný recyklát lze použít na těchto typech komunikací i v případě nevhodného podloží, což může výrazně zvýšit využití recyklovaných stavebních a demoličních materiálů. [34]



*Obrázek 2.14 - Hotová nezpevněná silnice [33]*

### 2.4.3 Švédsko

Směrnice o využívání odpadů a nakládání s nimi vydaná evropským parlamentem v roce 2008 vyžaduje, aby do konce roku 2020 všechny země EU dosáhly míry recyklace 70 %. Švédsko oproti nejlepším zaostává, přičemž míra recyklace se v roce 2015 pohybovala mezi 50-60 %. Vzhledem k tomu, že se ročně vyprodukuje přibližně 10 mil. tun SDO, je zde prostor pro lepší využitelnost takto získaného materiálu. Vzhledem k požadavkům EU se problémy s recyklací začaly analyzovat. Již vydané předpisy pro zacházení s odpadem převzala Švédská stavební společnost, která provedla aktualizaci s cílem zlepšit využitelnost SDO a splnit tak uložené požadavky na životní prostředí. Bylo zavedeno, že pro každou stavbu a demolici musí být vyhotoven plán nakládání s odpady, kde bude přesně určeno, jak bude naloženo s nebezpečnými odpady a jaké množství odpadu vznikne z každé kategorie s následným určením jejich využitelnosti. [35]

Za účelem zlepšení míry recyklace byl proveden také výzkum, kde bylo zjišťováno, jak demolice probíhají a jaké problémy mohou nastat, jak užitečné je třídění odpadu v místě demolice a jak je proces demolice prostorově náročný. Podle míry třídění SDO na stavbě bylo vypočteno, že v případě 90 % vytřídění materiálu již v místě demolice klesnou náklady na pozdější třídění a recyklaci materiálu o přibližně 54 % oproti stavu kdy třídění není prováděno vůbec. [35] Zlepšení těchto podmínek a ujištění, že pečlivě provedená demolice stavby může vést ke kvalitnějším SDO, zajistilo zvýšení využití těchto materiálů. V dnešní době se míra recyklace ve Švédsku pohybuje lehce pod 80 %, což lze považovat za výborný výsledek, vzhledem k tomu, že takové zlepšení trvalo pouhých 5 let. [33]

## 2.4.4 Německo

Německo je největším producentem SDO, kdy se roční objem pohybuje okolo 90 mil. tun. Zároveň patří k nejlepším státům v EU, co se týče míry recyklace, která dosahuje přibližně 85 %. Německo spravuje také materiály dodávané některými členskými státy, které nemají dostatečné technologie na jejich úpravu. Jedná se zejména o materiály s obsahem azbestu, které jsou do Německa dováženy z Irska, Řecka nebo Malty. Pokyny vydané evropským parlamentem má Německo splněné, a proto se může soustředit na cíle a požadavky stanovené svými směrnici. [33]

Hlavní Německá směrnice pro použití zemin do zemního tělesa a podloží vozovek říká, že vlastnosti použitých zemin závisí zejména na náročnosti prováděné konstrukce, kde je důležitá únosnost, deformační chování, nebezpečí mrazu a odvodňovací schopnosti. Směrnice odlišuje, zda bude konstrukce namáhána staticky nebo dynamicky a podle výsledku se rozhodne o požadavcích na zeminu. V případě staticky namáhané konstrukce postačí posouzení úhlu vnitřního tření zeminy a v určitých případech také koeficient propustnosti. Kromě klasicky užívaných zemin mohou být použity také vedlejší průmyslové produkty a recyklované materiály, pokud byla prokázána jejich vhodnost. Musí být zaručena jednotná kvalita materiálů a pH půdy musí být v rozmezí 4-9. Jestliže nejsou tyto požadavky splněny, přistupuje se k dalšímu podrobnějšímu zkoušení. U převážně dynamicky zatížených konstrukcí musí být kromě výše uvedených požadavků splněny také zrnitostní kritéria, které jsou následující:

- Maximální zastoupení zrn do 0,063 mm je 7 %
- Maximální zastoupení zrn do 100 mm je 25 %
- Maximální velikost zrna je 150 mm [36]

Kromě výše uvedených požadavků je kladen důraz také na ochranu spodních vod. Z toho důvodu jsou zhotoveny recyklační schémata nebo metody pro nakládání s odpady, podle kterých se určuje kvalita a kvantita materiálu nebo obsah emisí. Emise jsou určovány pomocí výluhových testů, přičemž novým materiálům je tato zkouška odpuštěna. Společnosti, které recyklaci provádí musí mít k dispozici kompletní dokumentaci o původu odpadu, jeho charakteristice nebo o průběhu zpracování. [37]

## 2.5 MOŽNOSTI VÝVOJE POUŽITÍ SMĚSNÉHO RECYKLÁTU

Produkce recyklovaného SDO je poměrně vysoká a je potřeba najít další způsoby uplatnění, aby nedocházelo k jejich ukládání na skládky. Za účelem zvýšení využitelnosti především směsného recyklátu probíhá tříletý výzkumný projekt technologické agentury TAČR, jehož cílem je ověřit technologie s využitím tohoto materiálu do vrstevnatého násypu a ztužujících nebo drenážních žeber. Dalším možným využitím je provedení vláknobetonu s nahrazením běžně užívaného kameniva.

### 2.5.1 Vrstevnatý násyp

Svémi vlastnostmi může být směsný recyklát vhodný při provádění ztužujících vrstev vrstevnatých násypů, do kterých je běžně spotřebováno významné množství přírodního drceného a těžného kameniva. Vrstevnatý násyp spočívá ve střídání ztužujících a poddajných vrstev, přičemž poddajnou vrstvou jsou často jemnozrné zeminy jako například jíly nebo vedlejší energetické produkty jako je třeba popílek. Do ztužující vrstvy může být použit směsný recyklát frakce 0/63, který lze podle geotechnických požadavků klasifikovat jako štěrk s příměsí jemnozrné zeminy. [38]

### 2.5.2 Ztužující a drenážní žebra

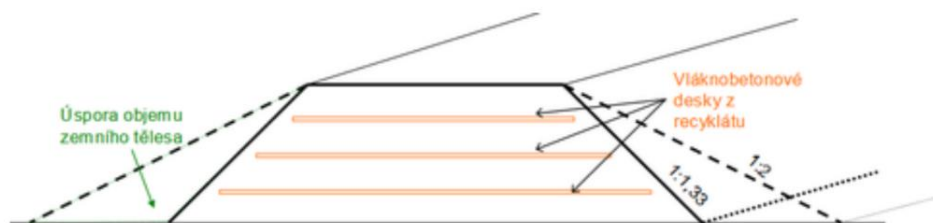
V tomto případě se jedná o využití směsného recyklátu do ztužujících žeber, vedoucích šikmo přes aktivní zónu vozovky, které zlepšují vlastnosti nevhodného podloží. Žebra mohou být vyplněna frakcemi 0/32 nebo 0/63, alternativně také 32/63 v případě drenážní funkce, což může být první typ provedení, kdy dojde k vyplnění žebra nezhuťnutým recyklátem této hrubé úzké frakce. Druhý typ bude mít funkci ztužující, kdy dojde k vyplnění směsným recyklátem zhuťnutým na maximální objemovou hmotnost s přidávkou hydraulického pojiva. Provedení ztužujících žeber je obdobou ke klasickému zlepšování nevhodných zemí pojivem v podloží vozovky. [38]

### 2.5.3 Vláknobeton

Prozatím lze vidět užití recyklovaného kameniva do betonů, což představuje pouze malé procento vzhledem k jeho produkci. Pro rozšíření spotřeby byl proveden výzkum s využitím betonových a směsných recyklátů do vláknobetonu, což je spojení kameniva a výztužných vláken společně s cementovým pojivem. Výhodou bylo také využití recyklátů omezených pouze velikostí maximálního zrna podle požadavku na parametry reálné konstrukce. U použitého recyklátu však

musí být kladen důraz na jeho čistotu, aby nedošlo ke snížení jeho možné kvality a také zhoršení výsledných vlastností vláknobetonu. Jelikož prozatím neexistuje metoda jak betony s recyklovaným kamenivem a vlákny vyrobit, byl zhotoven jednoduchý postup. Ta se od běžného navrhování betonů liší tím, že se postupuje opačně. Je potřeba nejprve stanovit charakteristiky a poté hledat místo pro jeho aplikaci. [39]

Pro rozšíření povědomí o možném využití směsných a betonových recyklátů pro výrobu vláknobetonových desek byla v laboratoři vybudována hráz s využitím těchto desek do středu zemního tělesa. Zkouškami bylo zjištěno nejen významné ušetření materiálu při výstavbě tělesa, ale také zvýšení odolnosti při přelití hráze vodou. Cesta k běžnému užívání této technologie je však v začátcích a pouze laboratorním testováním lze zajistit urychlení její realizace. [39]



Obrázek 2.15 - Zemní hráz s využitím vláknobetonových desek [40]

### 3 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem praktické části je ověřit použití směsného recyklátu frakce 0/32, značeného  $R_{C+B}$ , a jeho směsí stmelených portlandským cementem I 42,5 R, vysokopecní struskou a odprašky z výroby cementu v různém procentuálním zastoupení. Cílem je ověřit možnosti využití těchto směsí do podloží vozovky pozemní komunikace jako náhrada dnes běžně užívaných přírodních materiálů. Na samotném směsném recyklátu bylo provedeno stanovení zrnitosti pomocí síťového rozboru dle ČSN EN ISO 17892-4. Následně byly provedeny zkoušky stmelených směsí. Za tímto účelem bylo vytvořeno 6 směsí s různým procentuálním zastoupením portlandského cementu, vysokopecní strusky a odprašků z výroby cementu (dále také cementářské odprašky), a to konkrétně:

- $R_{C+B}$  + 3 % portlandského cementu I 42,5 R
- $R_{C+B}$  + 5 % portlandského cementu I 42,5 R
- $R_{C+B}$  + 3 % vysokopecní strusky
- $R_{C+B}$  + 5 % vysokopecní strusky
- $R_{C+B}$  + 3 % odprašků z výroby cementu
- $R_{C+B}$  + 5 % odprašků z výroby cementu

Na takto vytvořených směsích byla provedena zkouška stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti pomocí Proctorovy zkoušky dle ČSN EN 13286-2. Po zjištění optimální vlhkosti byly zhotoveny zkušební tělesa, na kterých byly provedeny zkoušky stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 13286-41, stanovení pevnosti v příčném tahu dle ČSN EN 13286-42 a stanovení míry namrzavosti zemin dle ČSN 72 1191. Pro srovnání výsledků přímé zkoušky namrzavosti zemin byla provedena také nepřímá metoda pomocí Scheibleho kritéria a zkoušení odolnosti kameniva proti zmrazování a rozmrazování dle ČSN EN 1367-1. Zkoušení bylo doplněno o triaxiální zkoušku dle ČSN EN 13286-7 pro zjištění návrhových modulů pružnosti, pomocí kterých budou jednotlivé směsi zařazeny do podloží vozovky pozemní komunikace, čímž se zajistí srovnání s běžně užívanými materiály v těchto vrstvách. Součástí praktické části je také ekonomické zhodnocení, které porovnává skladbu vozovky s využitím vytvořených směsí směsného recyklátu a pojiva a skladbu vozovky předepsané v technických podmínkách TP 170.

#### 3.1 POUŽITÉ MATERIÁLY

Pro zkoušení byl zvolen směsný recyklát frakce 0/32 s obsahem hlinité složky získaný z recyklační linky DUFONEV R.C., a.s. v Brně. Recyklát vykazoval od pohledu významné

zastoupení cihelného střepeu, naopak zastoupení cizorodých částic, které mohou ovlivnit kvalitu recyklátu, bylo zaznamenáno pouze ojediněle, přičemž se jednalo zejména o skleněné střepey. Ke stmelení byl použit portlandský směsný cement I 42,5 R a cementářské odprašky z Českomoravský cement a.s., závod Mokrá a vysokopecní struska ze závodu Kotouč Štramberk, spol. s.r.o. Použité materiály a pojiva lze vidět na obrázcích níže.



*Obrázek 3.1 - Směsný recyklát 0/32*



*Obrázek 3.2 – Pojiva použité pro zhotovení směsí; zleva: cementářské odprašky, portlandský cement I 42,5 R, vysokopecní struska*

## 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 zkoušky je rozdělení materiálu proséváním do jednotlivých frakcí dle použitých zkušebních sít se čtvercovými otvory, které jsou seskládány nad sebe od nejhrubšího po nejjemnější. Pro provedení zkoušky byly potřeba zkušební síta vyhovující ISO 3310-1 a ISO 3310-2 s vhodnou záchytnou miskou, mechanická prosévačka, sušárna s cirkulací vzduchu, prací zařízení, váhy, korozivzdorné misky a štětky. [41]



Zkouška byla provedena na vzorku směsného recyklátu frakce 0/32. Potřebný dílčí vzorek pro zkoušení byl odebrán rovnoměrně ze souhrnného vzorku směsného recyklátu. Na takto připraveném vzorku byla sušením do ustálené hmotnosti zjištěna vlhkost a zaznamenána hmotnost dílčí navážky M. Po vychladnutí vzorku následovalo promývání přes nejjemnější síto s velikostí ok 0,063 mm, aby došlo k odplavení jemných částic. Promytý vzorek byl vysušen do ustálené hmotnosti v sušárně při teplotě  $70 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  a zvážen. Zaznamenaná hodnota byla označena jako hmotnost  $M_2$ . Takto připravený vzorek byl mechanicky proséván přes sadu zkušebních sít, přičemž byl na konci doplněn o ruční prosévání z důvodu snížení možné nepřesnosti výsledku. Po dokončení prosévání byly zváženy dílčí hmotnosti na jednotlivých sítích a spodní míse, kde propadl materiál přes nejmenší síto s velikostí ok 0,063 mm. Z takto navážených dílčích zbytků byl vypočten procentuální propad na jednotlivých sítích. Ze zjištěných hodnot byla vytvořena křivka zrnitosti. Pro zajištění, pokud možno přesného výsledku byla zkouška zrnitosti provedena dvakrát.



*Obrázek 3.3 - Horkovzdušná sušárna a sada zkušebních sít*

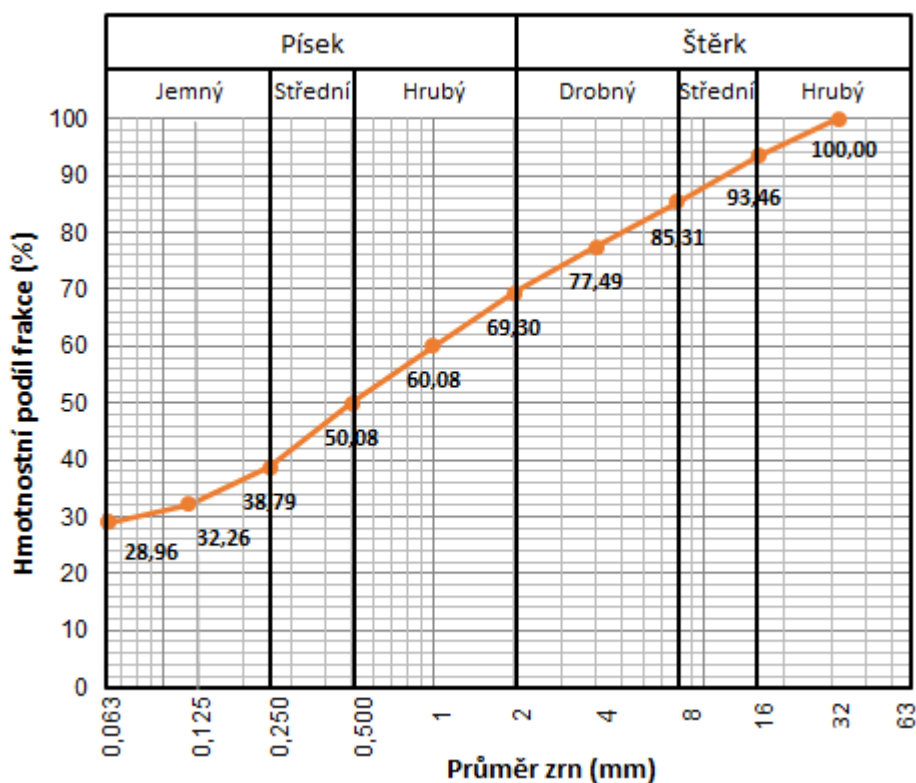


*Obrázek 3.4 - Směsný recyklát 0/32 po prosévání*

## Vyhodnocení

Tabulka 3.1 - Tabulka zrnitosti směsného recyklátu 0/32, první měření

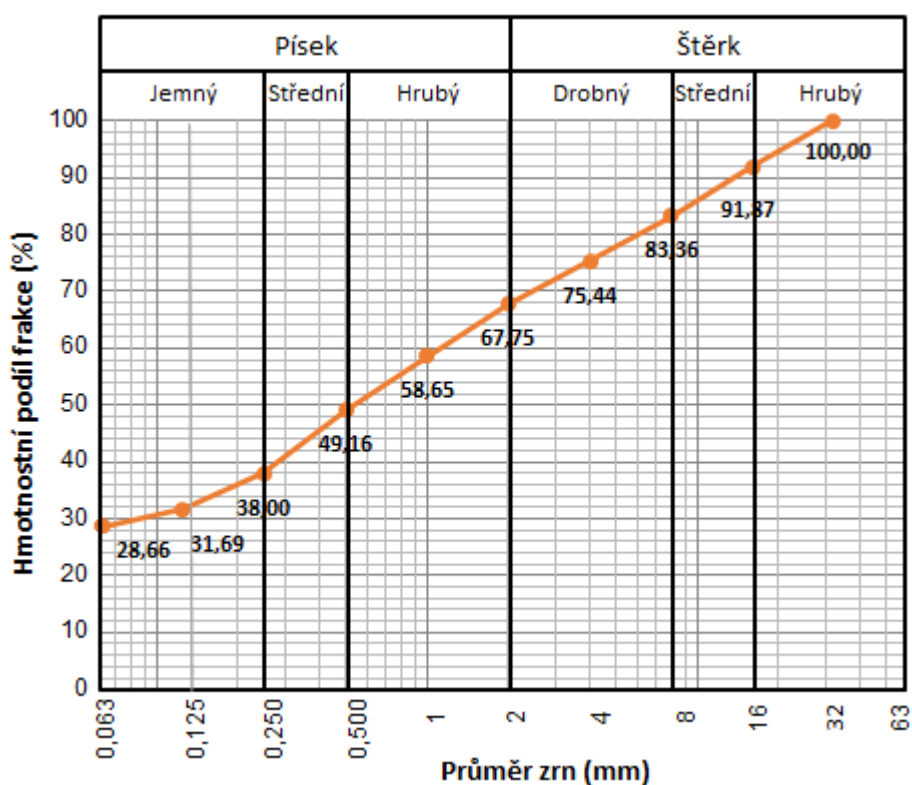
Hmotnost zkušební navážky M = 1970,4 g				
Rozměry ok normového síta [mm]	Hmotnost dílčího zbytku na síti [g]	Zastoupení frakce na síti [%]	Celkové zastoupení frakce na síti [%]	Celkový propad sítem [%]
31,5	0,0	0,00	0,00	100,00
16	128,9	6,54	6,54	93,46
8	160,6	8,15	14,69	85,31
4	154,1	7,82	22,51	77,49
2	161,4	8,19	30,70	69,30
1	181,6	9,22	39,92	60,08
0,5	197,0	10,00	49,92	50,08
0,25	222,4	11,29	61,21	38,79
0,125	128,7	6,53	67,74	32,26
0,063	65,0	3,30	71,04	28,96
Dno	570,7	28,96	100,00	0,00
Suma	1970,4	100,00	-	-



Graf 3.1 - Křivka zrnitosti směsného recyklátu 0/32, první měření

Tabulka 3.2 - Tabulka zrnitosti směsného recyklátu 0/32, druhé měření

Hmotnost zkušební navážky M = 1990,8 g				
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	161,8	8,13	8,13	91,87
8	169,4	8,51	16,64	83,36
4	157,8	7,93	24,56	75,44
2	153,1	7,69	32,25	67,75
1	181,1	9,10	41,35	58,65
0,5	188,9	9,49	50,84	49,16
0,25	222,1	11,16	62,00	38,00
0,125	125,8	6,32	68,31	31,69
0,063	60,3	3,03	71,34	28,66
Dno	570,5	28,66	100,00	0,00
Suma	1990,8	100,00	-	-



Graf 3.2 - Křivka zrnitosti směsného recyklátu 0/32, druhé měření

### 3.2.2 Proctorova zkouška

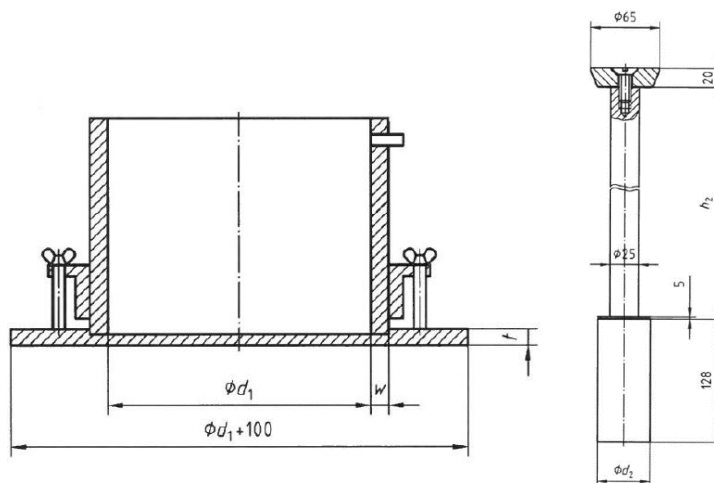
Zkoušení bylo provedeno podle platné normy ČSN EN 13286-2 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivý – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška. Podstatou zkoušky je hutnění směsi s proměnlivou vlhkostí. Po zhutnění se zjistí jejich vlhkost a objemová hmotnost. Takto získanými hodnotami se proloží křivka, jejíž vrchol odpovídá maximální objemové hmotnosti suché směsi a odpovídající optimální vlhkosti. Pro měření byla potřeba Proctorova forma, hutnicí zařízení, váha a sušárna s cirkulací vzduchu. Velikost Proctorovy formy a hmotnost pěchu se volí dle vlastností a typu zkoušené zeminy dle platné normy ČSN EN 13286-2. [42] Jednotlivé rozměry forem a hlavní požadavky na pěchy lze vidět v tabulkách níže.

Tabulka 3.3 - Rozměry nových forem [42]

Proctorova forma	Průměr $d_1$ [mm]	Výška $h_1$ [mm]	Tloušťka	
			Stěna $t_w$ [mm]	Základní deska $t$ [mm]
A	$100,0 \pm 1,0$	$120,0 \pm 1,0$	$7,5 \pm 0,5$	$11,0 \pm 0,5$
B	$150,0 \pm 1,0$	$120,0 \pm 1,0$	$9,0 \pm 0,5$	$14,0 \pm 0,5$
C	$250,0 \pm 1,0$	$200,0 \pm 1,0$	$14,0 \pm 0,5$	$20,0 \pm 0,5$

Tabulka 3.4 - Hlavní požadavky na nové pěchy [42]

Pěch	Hlavní požadavky		
	Hmotnost pěchu $m_R$ [kg]	Průměr základu $d_2$ [mm]	Výška dopadu $h_2$ [mm]
A	$2,50 \pm 0,02$	$50,0 \pm 0,5$	$305 \pm 3$
B	<b><math>4,50 \pm 0,04</math></b>	<b><math>50,0 \pm 0,5</math></b>	<b><math>457 \pm 3</math></b>
C	$15,00 \pm 0,04$	$125 \pm 0,5$	$600 \pm 3$



Obrázek 3.5 - Schéma formy a pěchu [42]

Zkoušení bylo provedeno Proctorovou zkouškou modifikovanou, která k hutnění využívá pěch typu B o hmotnosti 4,5 kg dopadající z výšky 457 mm. Jako forma byl vybrán typ A, jehož průměr je 100 mm a výška 120 mm. Hutnění probíhalo v 5 vrstvách po 25 úderech.



Obrázek 3.6 - Schéma principu Proctorovy modifikované zkoušky [19]

Zkoušení bylo provedeno na směsích s 3 % a 5 % portlandského cementu 42,5 R. Od každé směsi bylo připraveno 5 vzorků o přibližné hmotnosti 2500 g, přičemž bylo do každého vzorku přidáno určité množství vody. V tomto případě bylo zvoleno přidávání vody ve 2 % intervalech od 6 % do 14 % hm. Vlhkost je nutné volit tak, aby na každé straně křivky zhutnitelnosti ležely nejméně dva body od optimální vlhkosti. Po přípravě směsí s různou vlhkostí byla nachystána forma typu A, která se připevnila na základní desku a poté byla zvážena s přesností na 1 g. Poté byl změřen vnitřní rozměr formy pro stanovení jejího objemu. Následně byl na formu připevněn nástavec. Takto připravená forma byla upevněna do hutnicího zařízení a do ní bylo přidáno takové množství směsi, aby po zhutnění vyplnilo přibližně 1/5 výšky formy. Následně byla vrstva hutněna 25 údery, které byly rozmístěny rovnoměrně po celém obvodu formy. Tento krok byl poté opakován ještě čtyřikrát. Při plnění formy je důležité dbát na to, aby množství přidávaného materiálu bylo přibližně stejné a poslední zhutněná vrstva nepřesahovala horní okraj o více než 10 mm. Po odstranění nástavce byla zemina zarovnána ocelovým pravitkem a vypadnutá místa nahrazena jemnozrnnou zeminou a důkladně zahlazena. Takto upravená forma byla zvážena s přesností na 1 g. Po zvážení byla zhutněná zemina vyjmuta z formy a ze středu tělesa byl odebrán vzorek pro stanovení vlhkosti. Celý postup se poté opakoval pro další čtyři směsi s odlišnou vlhkostí. Tímto měřením bylo zjištěno pět výsledků objemové hmotnosti a odpovídající vlhkosti. Tyto naměřené hodnoty byly vyneseny do grafu a byla jimi proložena křivka, čímž se zjistila maximální objemová hmotnost suché směsi a odpovídající optimální vlhkost.



Obrázek 3.7 – Sestavená forma



Obrázek 3.8 - Hutnicí zařízení



Obrázek 3.9 - Připravené směsi; vlevo bez přivlhčení; vpravo hotová směs



Obrázek 3.10 - Zhutněný vzorek ve formě



Obrázek 3.11 - Zhutněný vzorek vyjmutý z formy



Obrázek 3.12 - Váženky se zeminou k sušení do ustálené hmotnosti

## Vyhodnocení

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

Hmotnost formy 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 formy [ $\text{cm}^3$ ]

$m_1$  ... hmotnost formy se základní deskou [g]

$m_2$  ... hmotnost formy se základní deskou a zeminou [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 [ $\text{kg/m}^3$ ]

W ... vlhkost směsi [%]

### Vlhkost směsi

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

$m_w$  ... hmotnost vlhkého vzorku [g]

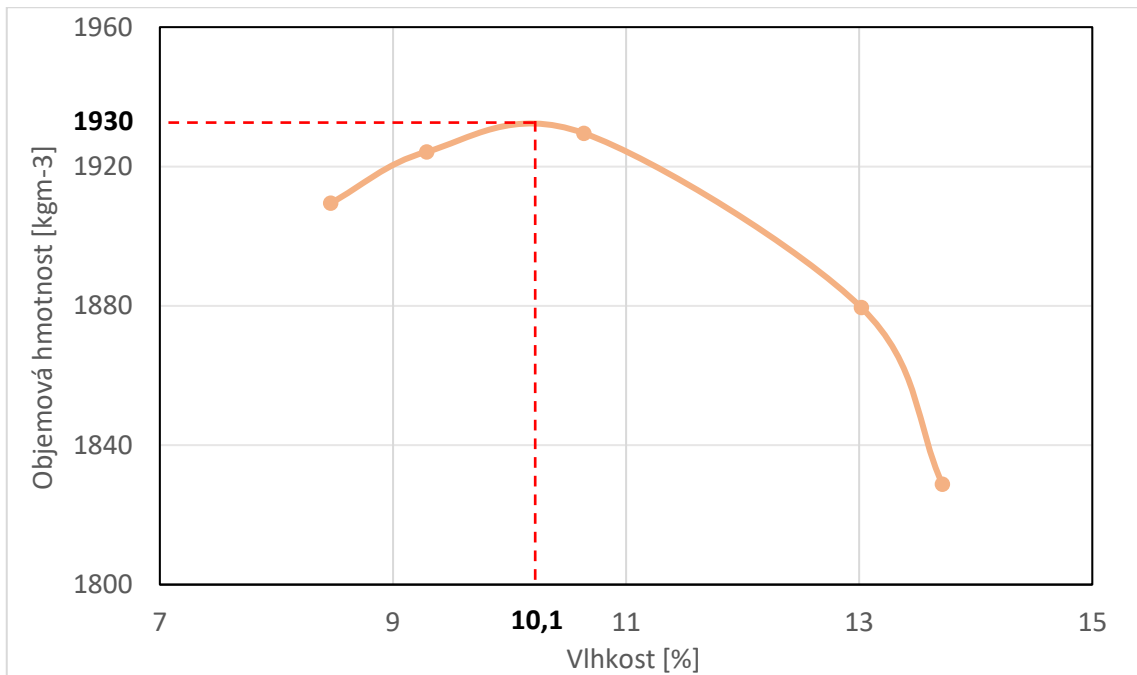
$m_d$  ... hmotnost suchého vzorku [g]



## Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementu 42,5 R

Tabulka 3.5 - Vyhodnocení výsledků –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM 42,5 R

Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementu 42,5 R					
Vzorek	1	2	3	4	5
Hmotnost formy [g]	6407	6407	6407	6407	6407
Objem formy [cm <sup>3</sup> ]	942	942	942	942	942
Hmotnost formy se zeminou [g]	8358	8388	8418	8408	8366
Objemová hmotnost vlhké zeminy [kg/m <sup>3</sup> ]	2071	2103	2135	2124	2080
Hmotnost váženky [g]	105	124	125	107	76
Hmotnost vlhké zeminy [g]	205	200	208	191	199
Hmotnost suché zeminy [g]	189	183	188	169	175
<b>Vlhkost [%]</b>	<b>8,47</b>	<b>9,29</b>	<b>10,64</b>	<b>13,02</b>	<b>13,71</b>
<b>Objemová hmotnost suché zeminy [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>1909</b>	<b>1924</b>	<b>1930</b>	<b>1880</b>	<b>1829</b>



Graf 3.3 - Proctorova křivka –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM 42,5 R

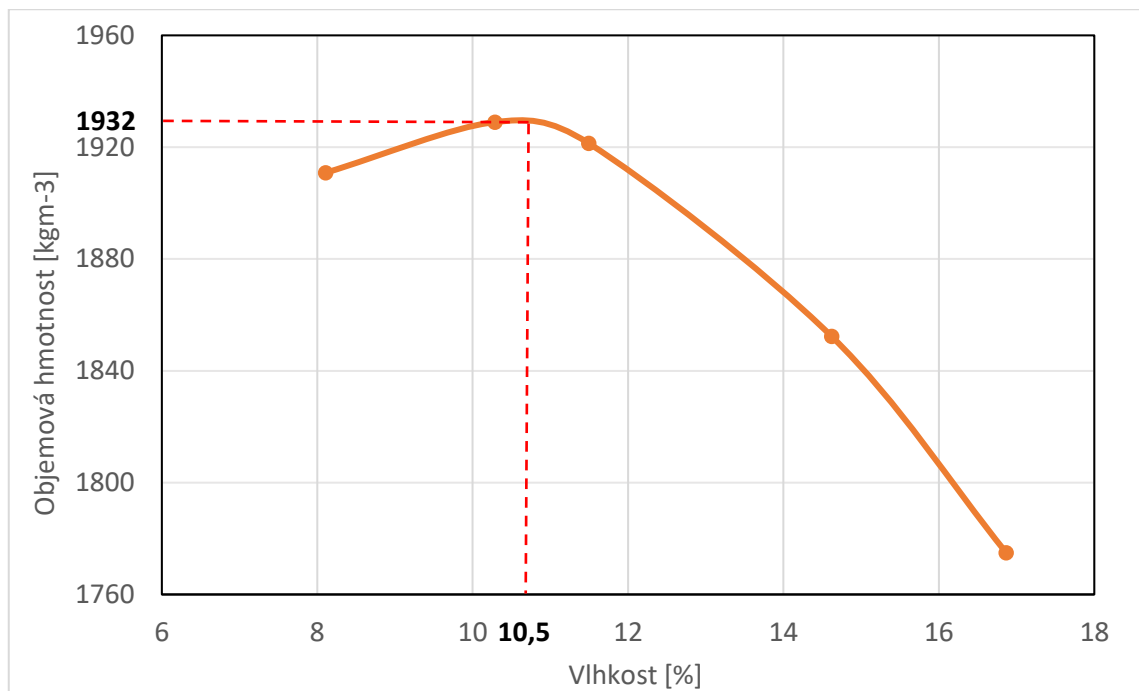
Maximální objemová hmotnost:  $\rho_{d,max} = 1930 \text{ kg/m}^3$

Optimální vlhkost:  $w_{opt} = 10,1 \%$

## Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementu 42,5 R

Tabulka 3.6 - Vyhodnocení výsledků –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM 42,5 R

Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementu 42,5 R					
Vzorek	1	2	3	4	5
Hmotnost formy [g]	6407	6407	6407	6407	6407
Objem formy [cm <sup>3</sup> ]	942	942	942	942	942
Hmotnost formy se zeminou [g]	8353	8411	8425	8407	8361
Objemová hmotnost vlhké zeminy [kg/m <sup>3</sup> ]	2066	2127	2142	2123	2074
Hmotnost váženky [g]	105	124	125	107	76
Hmotnost vlhké zeminy [g]	200	193	194	196	194
Hmotnost suché zeminy [g]	185	175	174	171	166
<b>Vlhkost [%]</b>	<b>8,11</b>	<b>10,29</b>	<b>11,49</b>	<b>14,62</b>	<b>16,87</b>
<b>Objemová hmotnost suché zeminy [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>1911</b>	<b>1929</b>	<b>1921</b>	<b>1852</b>	<b>1775</b>



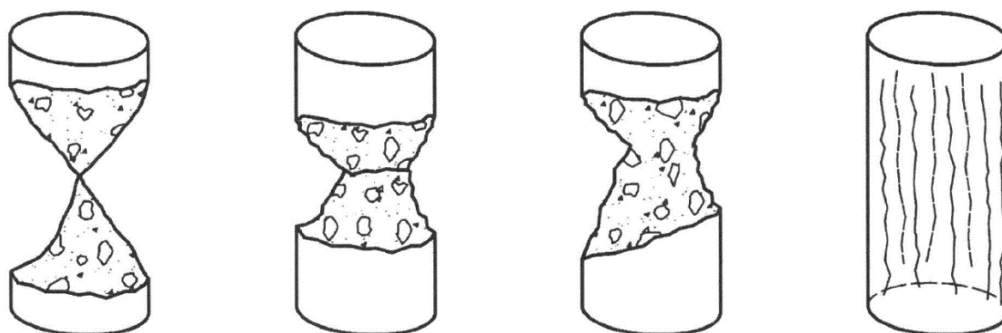
Graf 3.4 - Proctorova křivka –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM 42,5 R

Maximální objemová hmotnost:  $\rho_{d,max} = 1932 \text{ kg/m}^3$

Optimální vlhkost:  $w_{opt} = 10,5 \%$

### 3.2.3 Zkouška pevnosti v tlaku

Zkoušení bylo provedeno podle platné normy ČSN EN 13286-41 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy. Podstatou zkoušky je vystavení válcového zkušebního tělesa stmeleného hydraulickými pojivy tlaku, který působí na jeho horní a dolní plochu. Těleso je takto zatěžováno až do stavu porušení, přičemž pevnost v tlaku se vypočítá z maximálního zatížení působícího při porušení vzorku. Zkušební tělesa mohou být krychlová nebo válcová s průměrem od 50 mm, výškou do 300 mm a mezní hodnotou pevnosti v tlaku v rozsahu od 0,5 MPa do běžných pevností betonu. Zkušební tělesa musí být vyrobena podle ČSN EN 13286-50, ČSN EN 13286-51, ČSN EN 13286-52 nebo ČSN EN 13286-53, přičemž metoda zhutňování a zrání tělesa musí být uvedena v protokolu o zkoušce. Připravená zkušební tělesa musí být uložena vertikálně v prostoru s minimální ztrátou vlhkosti po dobu, která je určena v příslušném dokumentu. Pro zkoušení byl potřeba zkušební lis, který umožní zatěžování vzorku s přesností  $\pm 1\%$ . Zkušební lis musí mít dvě ocelové tlačné desky, které musí být minimálně tak velké, jako je povrch zkoušeného tělesa. Zatěžování vzorku musí probíhat stálým a plynulým způsobem bez rázů, aby k porušení vzorku došlo v rozmezí 30 s až 60 s po zahájení zatěžování. [43][44]



Obrázek 3.13 - Příklad uspokojivého porušení zkušebních válcových těles [43]

Zkušební tělesa byla vyrobena dle ČSN EN 13286-50 Metody pro výrobu zkušebních těles pomocí Proctorova zařízení nebo vibračního stolu. Pro tyto účely bylo využito Proctorovy modifikované práce do formy typu A. Pro výrobu těles byly namíchány směsi s optimální vlhkostí, přičemž z každé směsi byly vyrobeny 3 zkušební tělesa. Po dokončení hutnění byl zkušební vzorek opatrně odformován pomocí výtlačného lisu a uložen do komory, kde zrál bez ztráty vlhkosti po dobu 28 dní. Takto bylo vyrobeno 18 zkušebních těles. Po dokončení zrání byla tělesa vyzkoušena ve zkušebním lisu při postupném zvyšování napětí. Při měření byla zaznamenána maximální síla  $F$  při porušení vzorku a příslušné přetvoření.



Obrázek 3.14 - Hutnění vzorku



Obrázek 3.15 - Vyjímání vzorku z formy



Obrázek 3.16 - Zhutněný vzorek ve formě



Obrázek 3.17 - Vyjmutá zkušební tělesa



Obrázek 3.18 - Zrání zkušebních těles



Obrázek 3.19 - Umístění zkušebního tělesa v lisu



Obrázek 3.20 - Zkoušení vzorku

### Vyhodnocení

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

$R_c$  pevnost v tlaku zkušebního tělesa směsi stmelené hydraulickým pojivem [MPa]

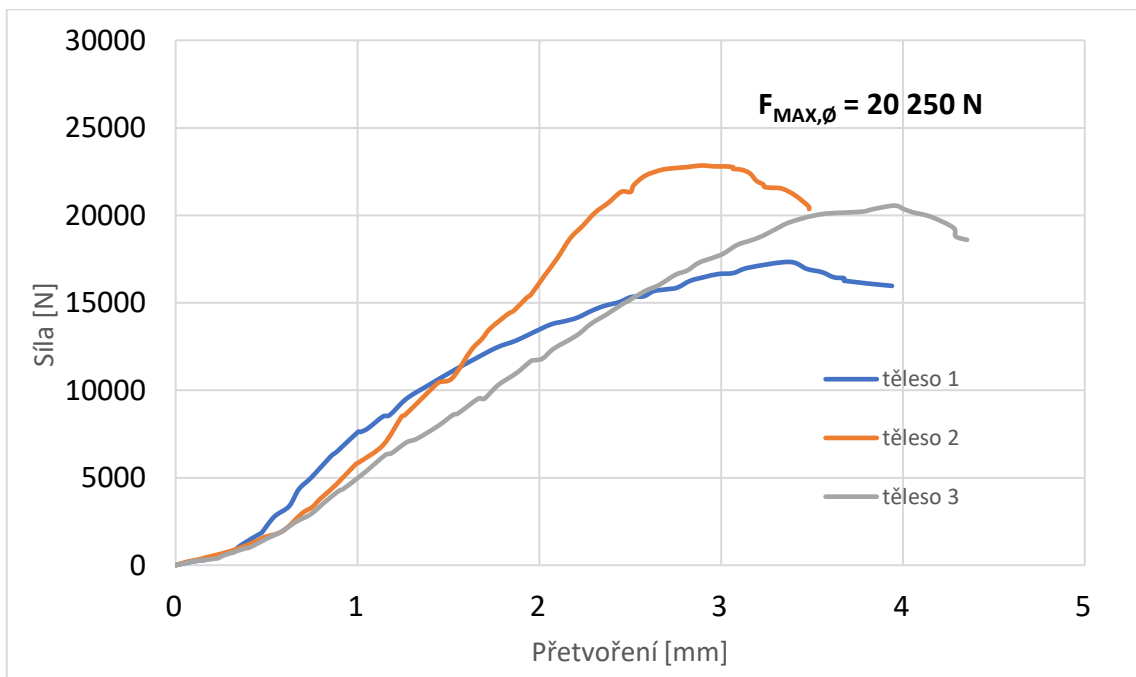
$F$  maximální síla při porušení zkušebního tělesa [N]

$A_c$  plocha průřezu zkušebního tělesa směsi stmelené hydraulickým pojivem [mm<sup>2</sup>]

## Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementu 42,5 R

Tabulka 3.7 - Pevnost v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM 42,5 R

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 3 % Cementu 42,5 R				
Těleso	Maximální síla $F_{MAX}$ [N]	Průměrná síla $F_{MAX,\phi}$ [N]	Odchylka od průměru [%]	Plocha vzorku $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku $R_c$ [MPa]
1	17340	20250	14,4	7853,98	2,21
2	22850		12,8	7853,98	2,91
3	20560		1,5	7853,98	2,62
Průměrná pevnost v tlaku $R_c$					2,58



Graf 3.5 – Graf pevnosti v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM 42,5 R

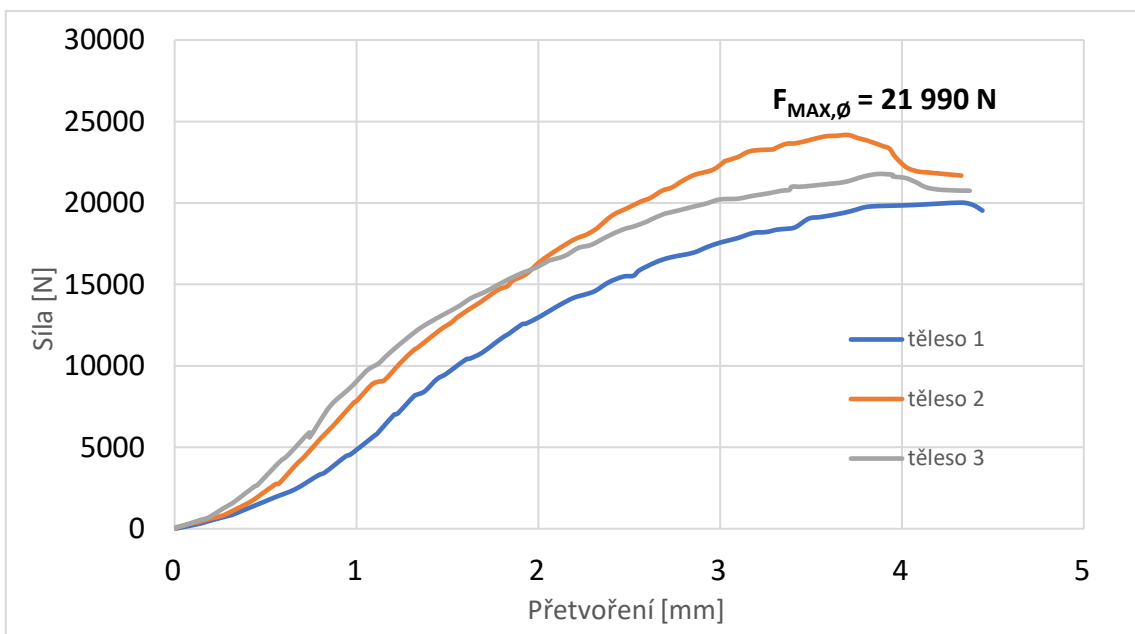


Obrázek 3.21 – Vzorky po zkoušce v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM 42,5 R

## Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementu 42,5 R

Tabulka 3.8 - Pevnost v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM 42,5 R

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 5 % Cementu 42,5 R				
Těleso	Maximální síla $F_{MAX}$ [N]	Průměrná síla $F_{MAX,\phi}$ [N]	Odchylka od průměru [%]	Plocha vzorku $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku $R_c$ [MPa]
1	20020	21990	9,0	7853,98	2,55
2	24170		9,9	7853,98	3,08
3	21780		1,0	7853,98	2,77
Průměrná pevnost v tlaku $R_c$					2,80



Graf 3.6 – Graf pevnosti v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM 42,5 R

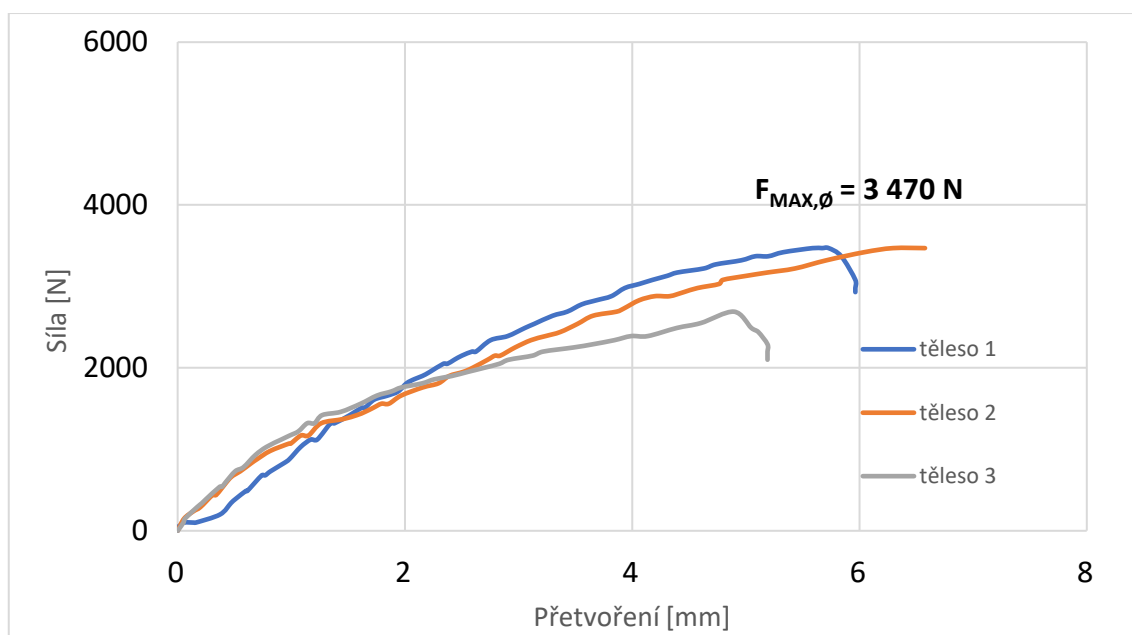


Obrázek 3.22 – Vzorky po zkoušce v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM 42,5 R

## Směsný recyklát 0/32 + 3 % vysokopecní strusky

Tabulka 3.9 - Pevnost v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % STR

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 3 % vysokopecní strusky				
Těleso	Maximální síla $F_{MAX}$ [N]	Průměrná síla $F_{MAX,\phi}$ [N]	Odchylka od průměru [%]	Plocha vzorku $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku $R_c$ [MPa]
1	3470	3470	0,0	7853,98	0,44
2	3470		0,0	7853,98	0,44
3	2690		>15	-	-
Průměrná pevnost v tlaku $R_c$					0,44



Graf 3.7 – Graf pevnosti v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % STR



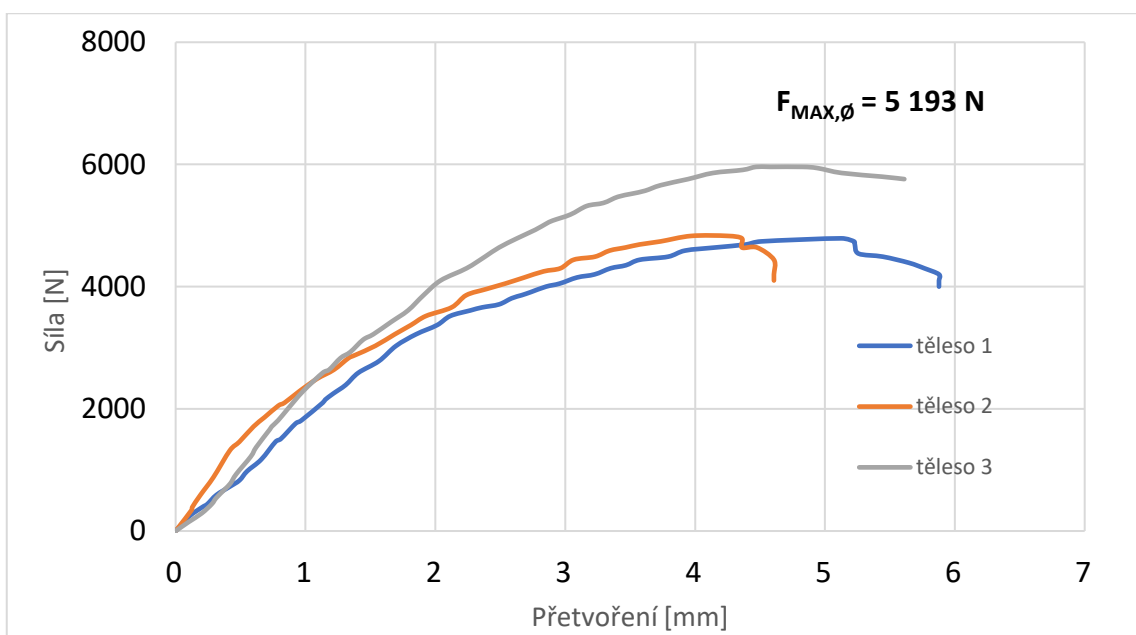
Obrázek 3.23 – Vzorky po zkoušce v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % STR



## Směsný recyklát 0/32 + 5 % vysokopecní strusky

Tabulka 3.10 - Pevnost v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % STR

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 5 % vysokopecní strusky				
Těleso	Maximální síla $F_{MAX}$ [N]	Průměrná síla $F_{MAX,\emptyset}$ [N]	Odchylka od průměru [%]	Plocha vzorku $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku $R_c$ [MPa]
1	4790	5193	7,8	7853,98	0,61
2	4830		7,0	7853,98	0,61
3	5960		14,8	7853,98	0,76
Průměrná pevnost v tlaku $R_c$					0,66



Graf 3.8 – Graf pevnosti v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % STR

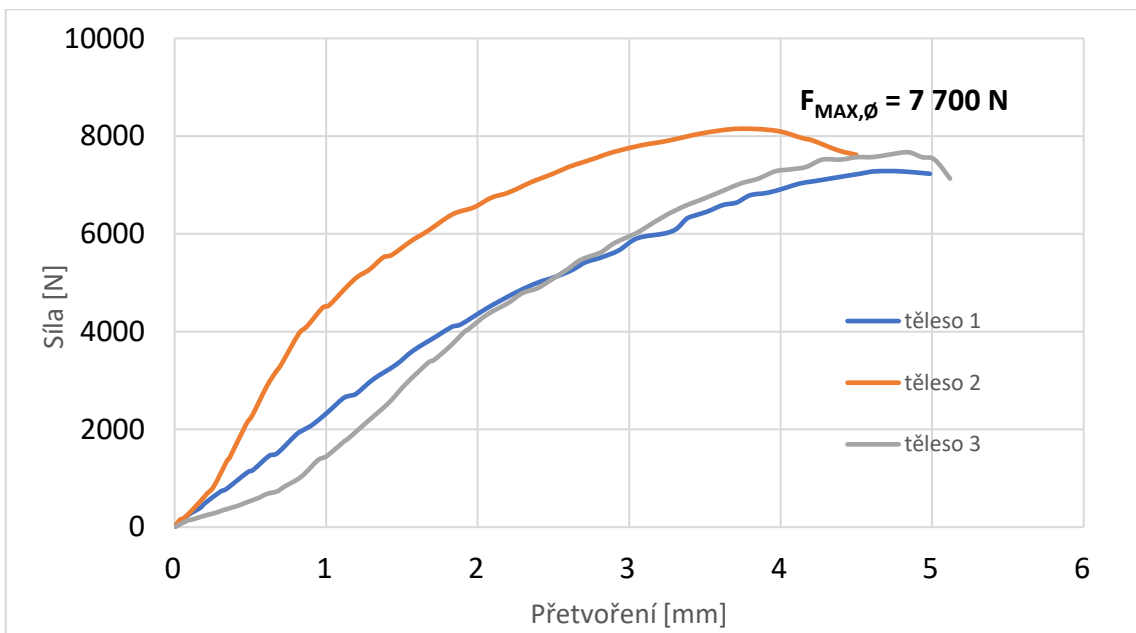


Obrázek 3.24 – Vzorky po zkoušce v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % STR

## Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementářských odprašků

Tabulka 3.11 - Pevnost v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM ODP

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementářských odprašků				
Těleso	Maximální síla $F_{MAX}$ [N]	Průměrná síla $F_{MAX,\phi}$ [N]	Odchylka od průměru [%]	Plocha vzorku $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku $R_c$ [MPa]
1	7280	7700	5,5	7853,98	0,93
2	8150		5,8	7853,98	1,04
3	7670		0,4	7853,98	0,98
Průměrná pevnost v tlaku $R_c$					0,98



Graf 3.9 – Graf pevnosti v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM ODP

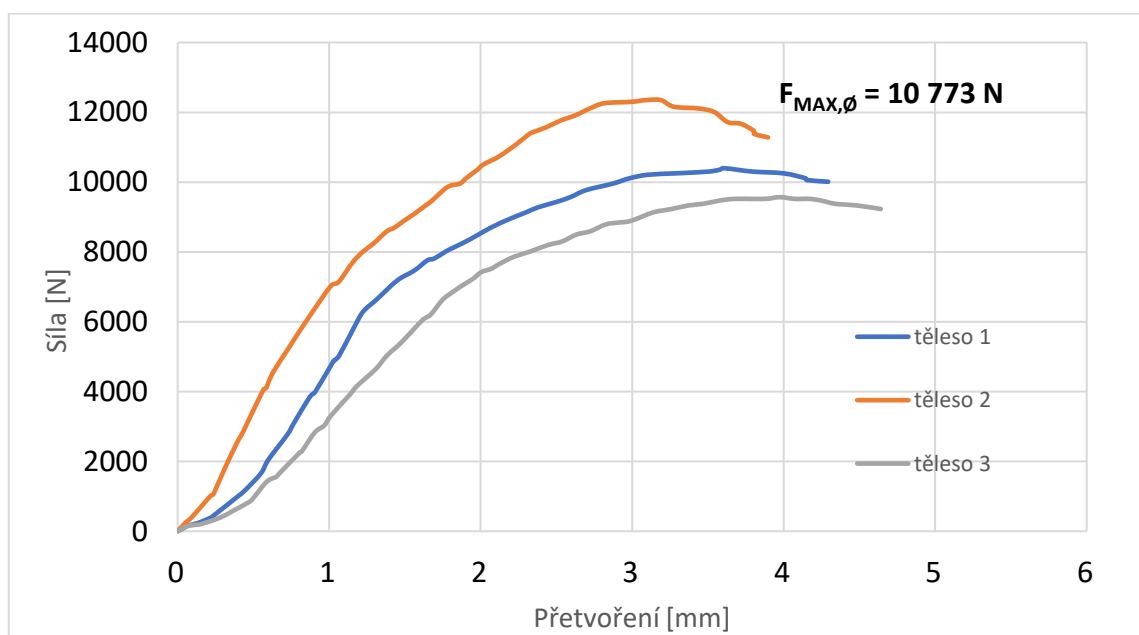


Obrázek 3.25 – Vzorky po zkoušce v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM ODP

## Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementářských odprašků

Tabulka 3.12 - Pevnost v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM ODP

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementářských odprašků				
Těleso	Maximální síla $F_{MAX}$ [N]	Průměrná síla $F_{MAX,\emptyset}$ [N]	Odchylka od průměru [%]	Plocha vzorku $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku $R_c$ [MPa]
1	10400	10773	3,5	7853,98	1,32
2	12350		14,6	7853,98	1,57
3	9570		11,2	7853,98	1,22
<b>Průměrná pevnost v tlaku <math>R_c</math></b>					<b>1,37</b>



Graf 3.10 – Graf pevnosti v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM ODP

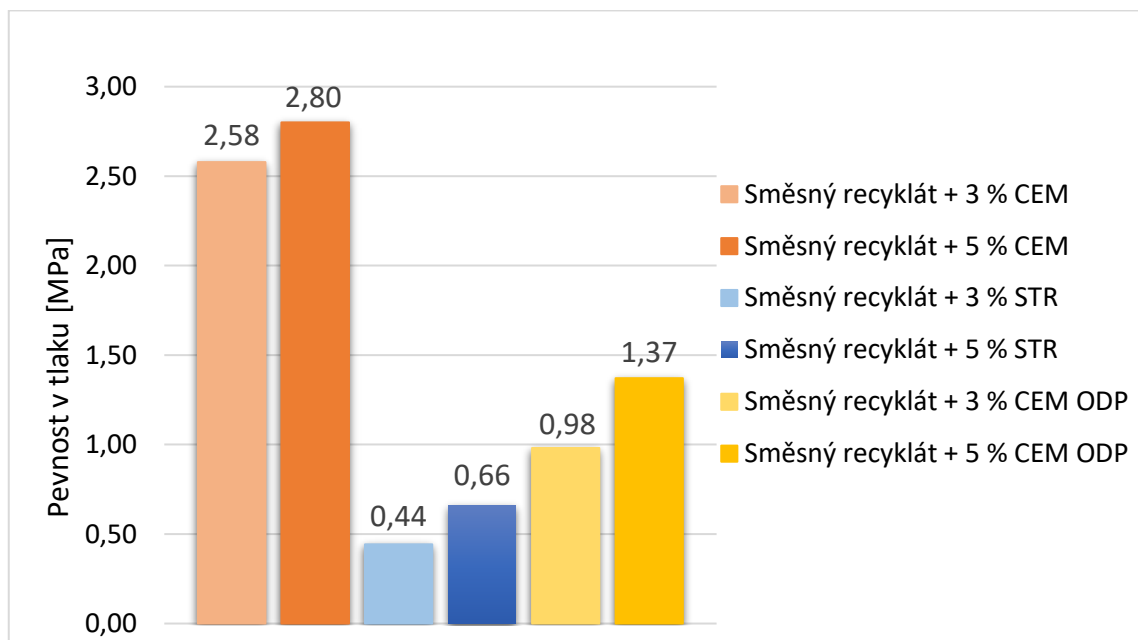


Obrázek 3.26 – Vzorky po zkoušce v tlaku –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM ODP

## Shrnutí výsledků pevnosti v tlaku

Tabulka 3.13 - Shrnutí výsledků pevnosti v tlaku

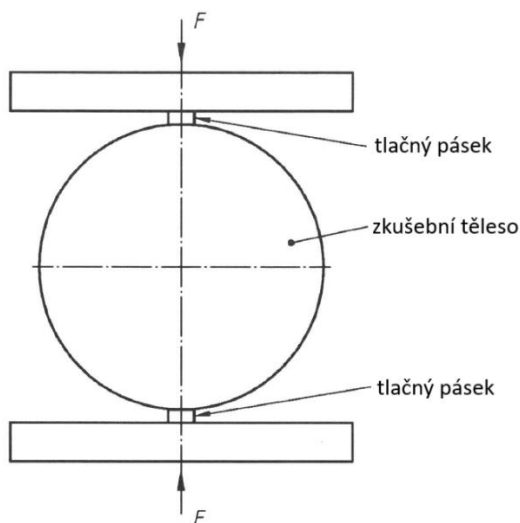
Směs	Pevnost v tlaku [MPa]
Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementu 42,5 R	2,58
Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementu 42,5 R	2,8
Směsný recyklát 0/32 + 3 % vysokopeční strusky	0,44
Směsný recyklát 0/32 + 5 % vysokopeční strusky	0,66
Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementářských odprašků	0,98
Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementářských odprašků	1,37



Graf 3.11 – Grafické srovnání výsledků pevnosti v tlaku

### 3.2.4 Pevnost v příčném tahu

Zkoušení bylo provedeno podle platné normy ČSN EN 13286-42 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – část 42: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v příčném tahu směsí stmelovaných hydraulickými pojivy. Podstatou zkoušky je vystavení válcového zkušební tělesa stmelého hydraulickými pojivy tlaku, který působí na protilehlých tlačných páscích z překližky nebo dřevovláknité desky po jeho obvodu. Těleso je zatěžováno do stavu porušení, při kterém se zaznamená maximální zatížení, ze kterého se poté vypočítá pevnost v příčném tahu. Zkušební tělesa mohou být válcového tvaru se štíhlostním poměrem 0,8 až 2,0, přičemž musí být vyrobena podle ČSN EN 13286-50, ČSN EN 13286-51, ČSN EN 13286-52 nebo ČSN EN 13286-53. Metoda zhutňování a zrání těles musí být zaznamenána v protokolu o zkoušce. Připravená zkušební tělesa musí být uložena vertikálně v prostoru s minimální ztrátou vlhkosti po předepsanou dobu. Pro zkoušení těles je potřeba lis, který dokáže stanovit výslednou maximální sílu  $F$  s přesností  $\pm 1\%$ . Může být použit také pouze lis, jehož tlačné desky jsou větší nebo nejméně tak velké, jako je délka zkušební tělesa, přičemž odchylka od rovnosti povrchu tlačných desek musí být menší než 3%. [44][45]



Obrázek 3.27 - Schéma podstaty zkoušky v příčném tahu [45]

Zkušební tělesa byla vyrobena stejným postupem jako při přípravě zkušebních těles pro pevnost v tlaku. I v tomto případě bylo vyrobeno 18 zkušebních těles, přičemž byly všechny uloženy do komory, kde zrály bez ztráty vlhkosti po dobu 28 dní. Po dokončení zrání byla tělesa vyzkoušena ve zkušebním lisu při postupném zvyšování napětí. Při měření byla zaznamenána maximální síla  $F$  při porušení vzorku a příslušné přetvoření.



*Obrázek 3.28 - Uložení zkušebních těles v komoře*



*Obrázek 3.29 - Připravená zkušební tělesa ke zkoušce v příčném tahu*



*Obrázek 3.30 - Uložení zkušebního tělesa při zkoušce v příčném tahu*



Obrázek 3.31 - Těleso po zkoušce v příčném tahu



Obrázek 3.32 - Deformovaný vzorek po zkoušce v příčném tahu

### Vyhodnocení

$$R_{it} = \frac{2 F}{\pi H D}$$

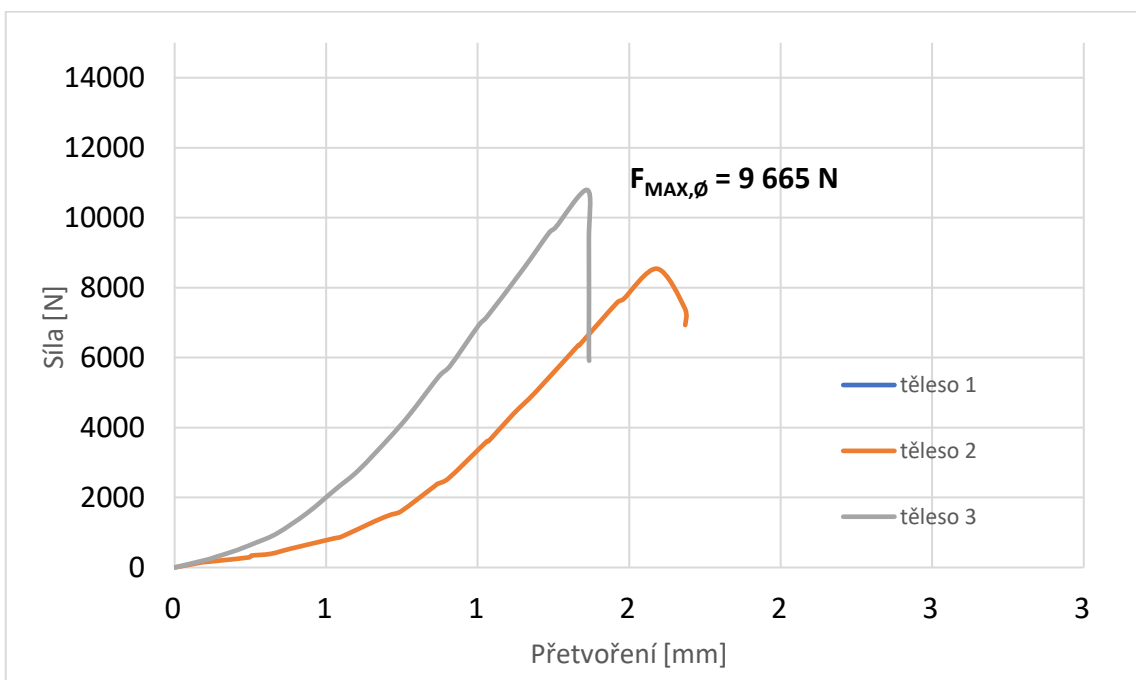
- $R_{it}$     pevnost v příčném tahu [MPa]  
F        maximální síla při porušení zkušebního tělesa [N]  
H        délka zkušebního tělesa [mm]  
D        průměr zkušebního tělesa [mm]

## Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementu 42,5 R

Tabulka 3.14 - Pevnost v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM 42,5 R

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementu 42,5 R					
Těleso	Maximální síla $F_{MAX}$ [N]	Průměrná síla $F_{MAX,\phi}$ [N]	Odchylka od průměru [%]	Výška vzorku H [mm]	Průměr vzorku D [mm]	Pevnost v příčném tahu $R_{it}$ [MPa]
1	-	9665	-	-	-	-
2	8540		11,6	120	100	0,45
3	10790		11,6	120	100	0,57
Průměrná pevnost v příčném tahu $R_{it}$						0,34

**POZNÁMKA:** První měření vynecháno z důvodu chybného exportu dat z měření



Graf 3.12 – Graf pevnosti v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM 42,5 R



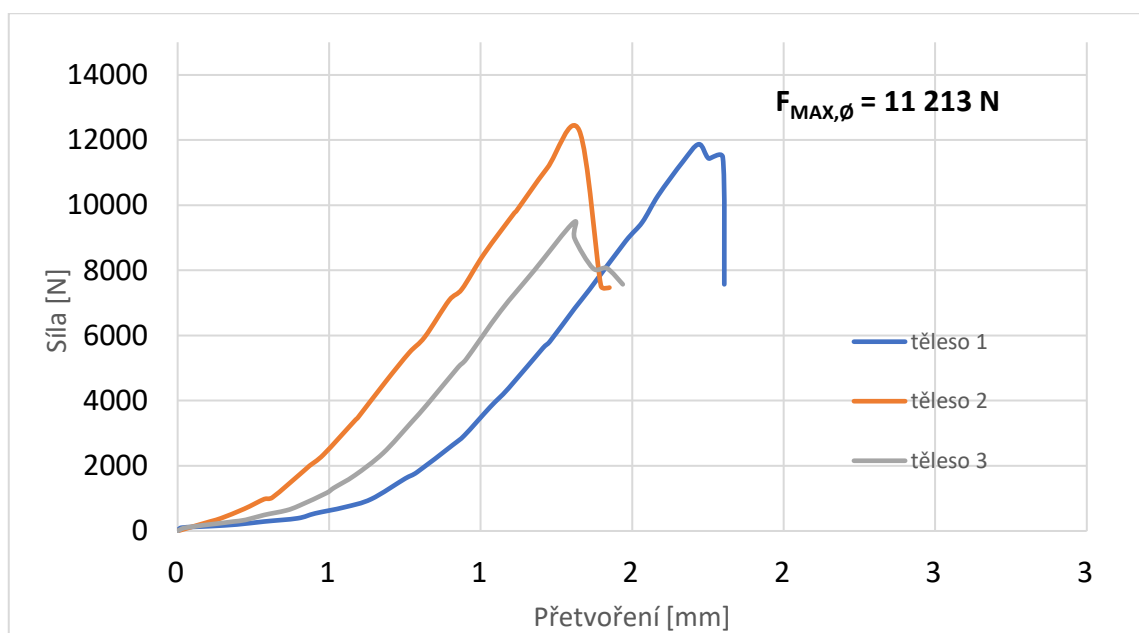
Obrázek 3.33 – Vzorky po zkoušce pevnosti v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM 42,5 R



## Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementu 42,5 R

Tabulka 3.15 - Pevnost v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM 42,5 R

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementu 42,5 R					
Těleso	Maximální síla $F_{MAX}$ [N]	Průměrná síla $F_{MAX,\phi}$ [N]	Odchylka od průměru [%]	Výška vzorku H [mm]	Průměr vzorku D [mm]	Pevnost v příčném tahu $R_{it}$ [MPa]
1	11870	11213	5,9	120	100	0,63
2	12300		9,7	120	100	0,65
3	9470		15,5	120	100	0,50
Průměrná pevnost v příčném tahu $R_{it}$						0,60



Graf 3.13 – Graf pevnosti v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM 42,5 R

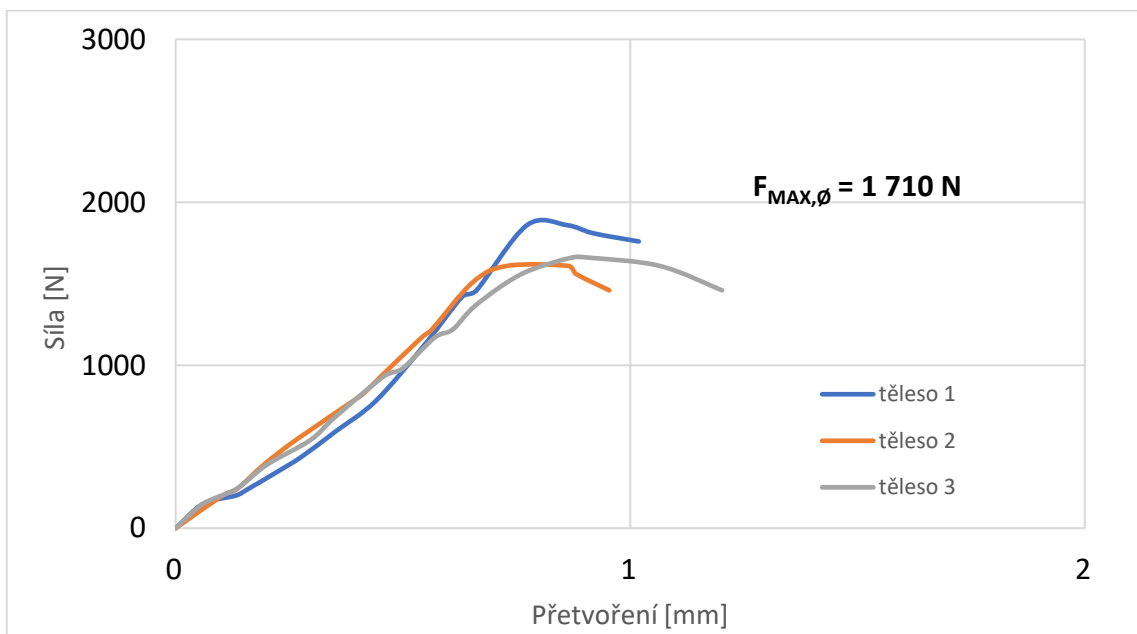


Obrázek 3.34 - Vzorky po zkoušce pevnosti v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM 42,5 R

## Směsný recyklát 0/32 + 3 % vysokopecní strusky

Tabulka 3.16 - Pevnost v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % STR

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 3 % vysokopecní strusky					
Těleso	Maximální síla $F_{MAX}$ [N]	Průměrná síla $F_{MAX,\emptyset}$ [N]	Odchylka od průměru [%]	Výška vzorku H [mm]	Průměr vzorku D [mm]	Pevnost v příčném tahu $R_{it}$ [MPa]
1	1860	1710	8,8	120	100	0,10
2	1610		5,8	120	100	0,09
3	1660		2,9	120	100	0,09
Průměrná pevnost v příčném tahu $R_{it}$						<b>0,09</b>



Graf 3.14 – Graf pevnosti v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % STR

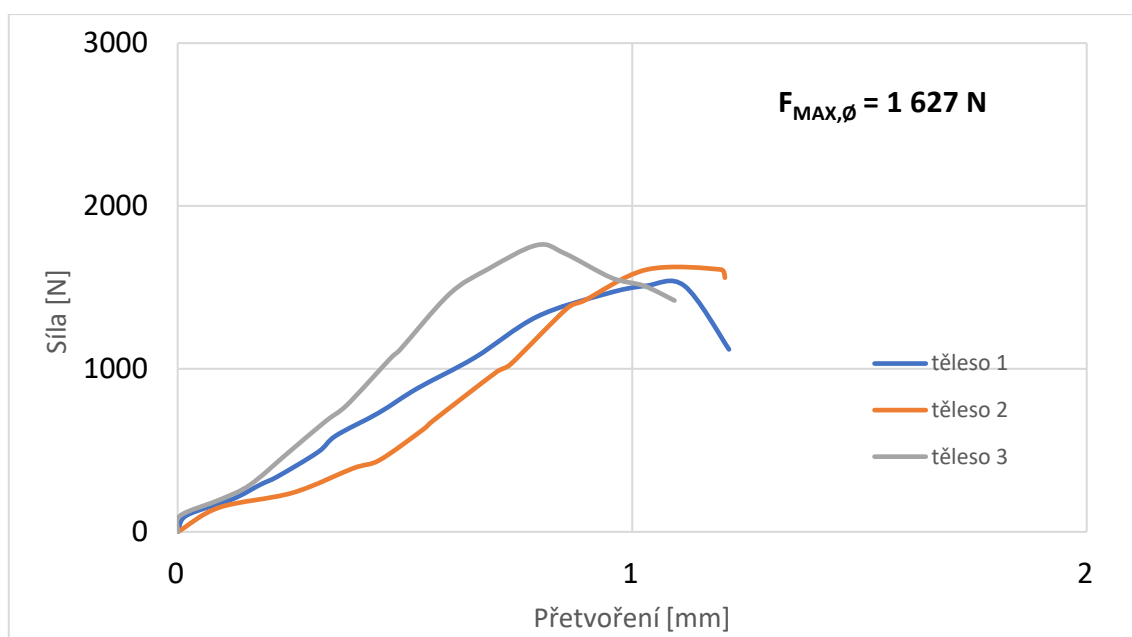


Obrázek 3.35 - Vzorky po zkoušce pevnosti v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % STR

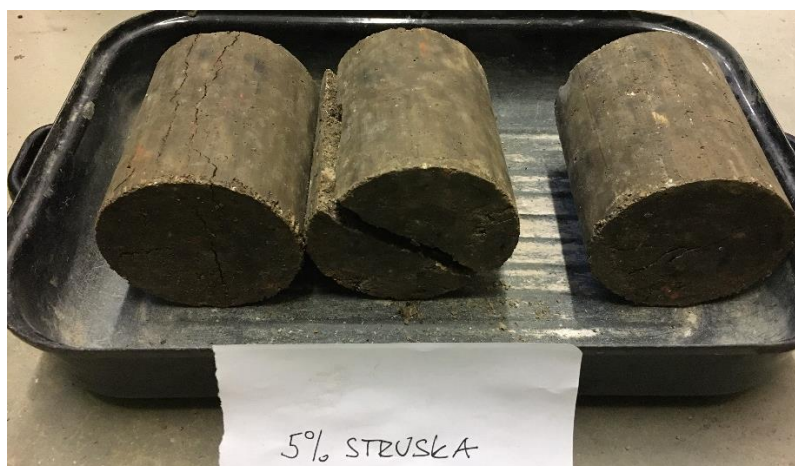
## Směsný recyklát 0/32 + 5 % vysokopecní strusky

Tabulka 3.17 - Pevnost v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % STR

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 5 % vysokopecní strusky					
Těleso	Maximální síla $F_{MAX}$ [N]	Průměrná síla $F_{MAX,\phi}$ [N]	Odchylka od průměru [%]	Výška vzorku H [mm]	Průměr vzorku D [mm]	Pevnost v příčném tahu $R_{it}$ [MPa]
1	1510	1627	7,2	120	100	0,08
2	1610		1,0	120	100	0,09
3	1760		8,2	120	100	0,09
Průměrná pevnost v příčném tahu $R_{it}$						0,09



Graf 3.15 – Graf pevnosti v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % STR

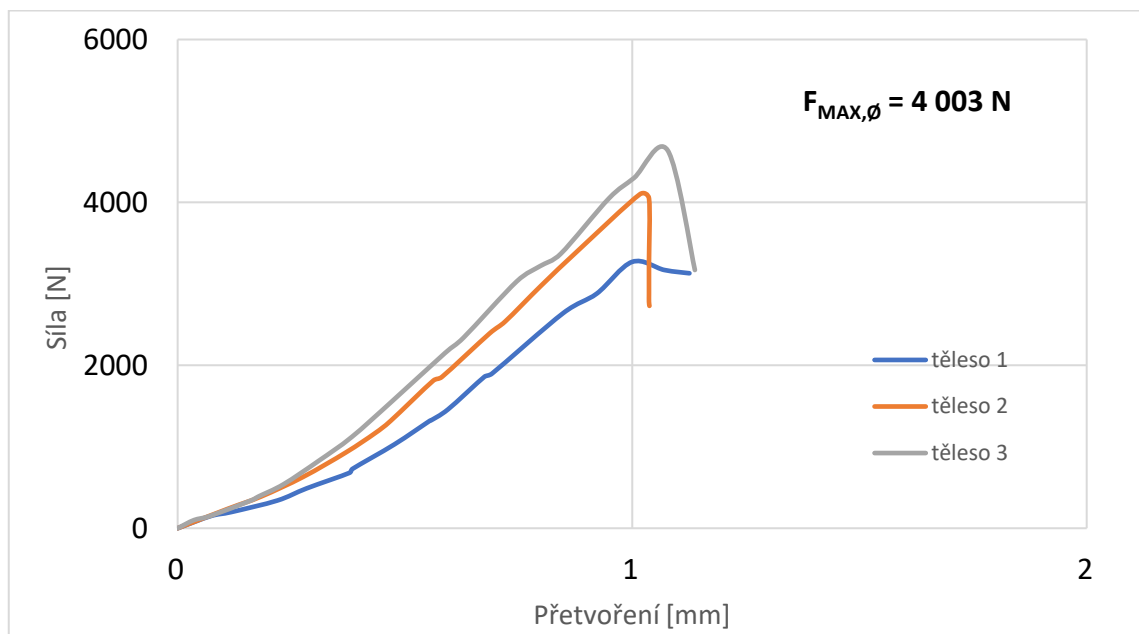


Obrázek 3.36 - Vzorky po zkoušce pevnosti v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % STR

## Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementářských odprašků

Tabulka 3.18 - Pevnost v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM ODP

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementářských odprašků					
Těleso	Maximální síla $F_{MAX}$ [N]	Průměrná síla $F_{MAX,\phi}$ [N]	Odchylka od průměru [%]	Výška vzorku H [mm]	Průměr vzorku D [mm]	Pevnost v příčném tahu $R_{it}$ [MPa]
1	3270	4003	18,3	120	100	0,17
2	4100		2,4	120	100	0,22
3	4640		15,9	120	100	0,25
Průměrná pevnost v příčném tahu $R_{it}$						0,21



Graf 3.16 – Graf pevnosti v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM ODP

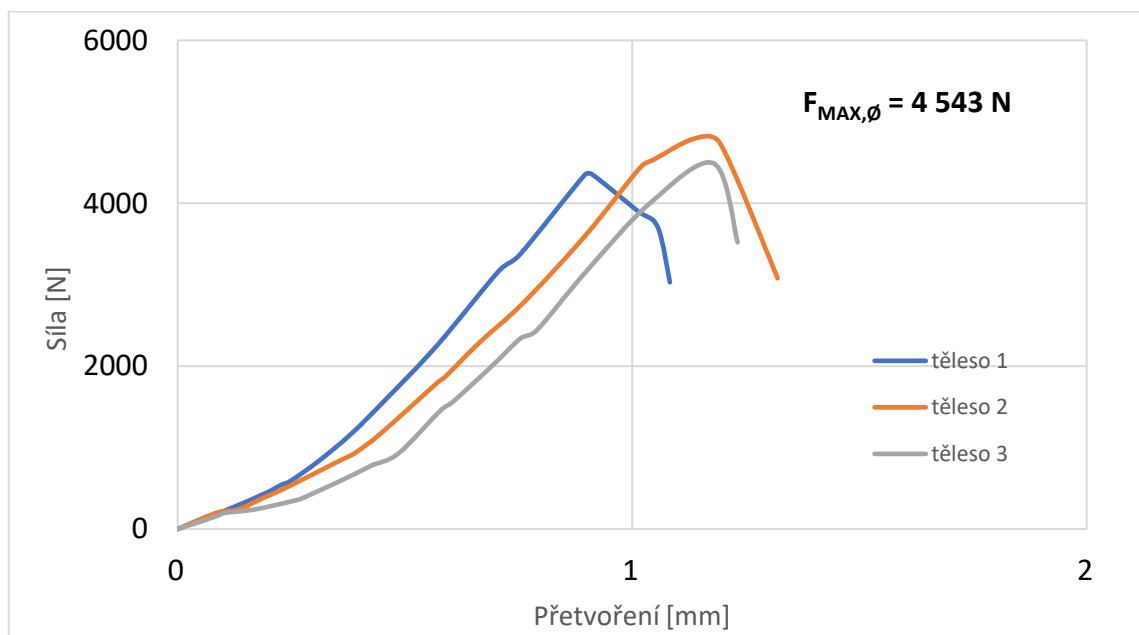


Obrázek 3.37 - Vzorky po zkoušce pevnosti v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM ODP

## Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementářských odprašků

Tabulka 3.19 - Pevnost v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM ODP

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementářských odprašků					
Těleso	Maximální síla $F_{MAX}$ [N]	Průměrná síla $F_{MAX,\phi}$ [N]	Odchylka od průměru [%]	Výška vzorku H [mm]	Průměr vzorku D [mm]	Pevnost v příčném tahu $R_{it}$ [MPa]
1	4350	4543	4,3	120	100	0,23
2	4790		5,4	120	100	0,25
3	4490		1,2	120	100	0,24
Průměrná pevnost v příčném tahu $R_{it}$						0,24



Graf 3.17 – Graf pevnosti v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM ODP

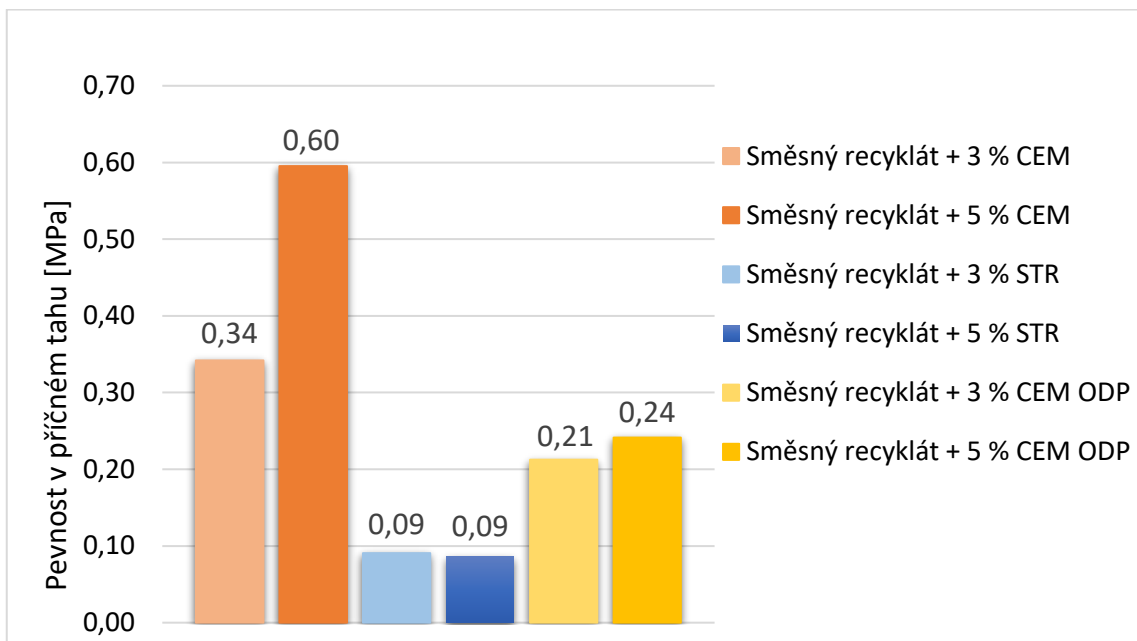


Obrázek 3.38 - Vzorky po zkoušce pevnosti v příčném tahu –  $R_{C+B}$  0/32 + 5 % CEM ODP

## Shrnutí výsledků pevnosti v příčném tahu

Tabulka 3.20 - Shrnutí výsledků pevnosti v příčném tahu

Směs	Pevnost v příčném tahu [MPa]
Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementu 42,5 R	0,34
Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementu 42,5 R	0,60
Směsný recyklát 0/32 + 3 % vysokopeční strusky	0,09
Směsný recyklát 0/32 + 5 % vysokopeční strusky	0,09
Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementářských odprašků	0,21
Směsný recyklát 0/32 + 5 % cementářských odprašků	0,24

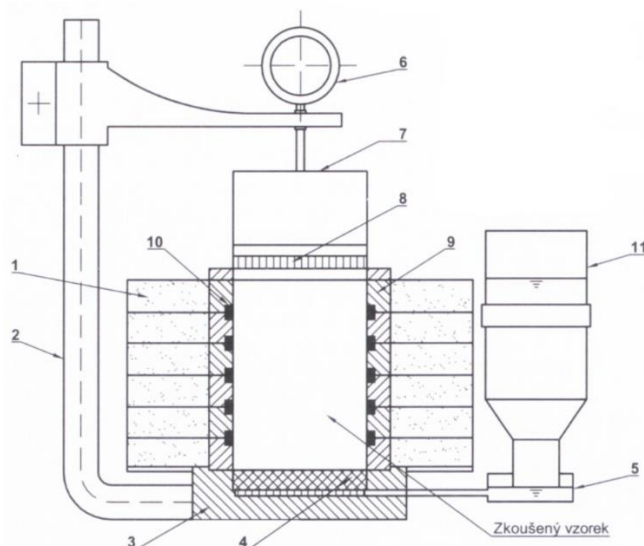


Graf 3.18 – Grafické srovnání výsledků pevnosti v příčném tahu

### 3.2.5 Míra namrzavosti zemin

Zkoušení bylo provedeno podle platné normy ČSN 72 1191 Zkoušení míry namrzavosti zemin. Tato norma je platná pro přímé zkoušení namrzavosti zemin, recyklovaných materiálů nebo vedlejších produktů, a to jak neupravených, tak upravených, které lze použít pro stavbu zemního tělesa. Podstatou zkoušky je napodobení účinků mrazu na podloží vozovky za nepříznivých podmínek kapilárního sycení. Zkušební tělesa, zhotovené při optimální vlhkosti Proctorovou prací, jsou vystaveny sycení vodou a následnému zmrazování, přičemž dochází k mrazovému zdvihu. Ke zkoušení byl potřeba mrazicí box se zkušebními buňkami pro umístění zkušebních těles a počítač pro zaznamenávání mrazových zdvihů. Přímé měření je doplněno o vyhodnocení nepřímé metody uvedené v ČSN 73 6133, které spočívá v zařazení křivky zrnitosti materiálu do tzv. Scheibleho kritéria. [46]

Zkušební tělesa byla zhotovena Proctorovou prací modifikovanou do formy typu A, podle normy ČSN EN 13286-2. Ke zkoušení byly od každé směsi připraveny dvě zkušební tělesa, zhotovena při optimální vlhkosti. Po dokončení hutnění byla horní plocha tělesa pečlivě zarovnána, aby při měření mrazicí deska doléhala rovnoměrně po celé ploše. Po zarovnání bylo těleso z formy opatrně vyjmuto, aby nedošlo k jeho poškození. Takto připravená tělesa byla uložena do komory bez ztráty vlhkosti na dobu 10 dní. Po zkrácené době zrání byla tělesa vložena do mrazicí skříně a opatřena zkušebními buňkami. Na zkušební buňky byla osazena mrazicí deska se závažím, simulujícím přitížením od konstrukce vozovky, a snímací zařízení pro měření mrazových zdvihů. Takto připravené vzorky byly po dobu nejméně 17 hodin saturovány a ochlazovány na přibližnou teplotu 4–8 °C. Během této doby se neměří, jelikož ke zdvihu vzorku může docházet na základě bobtnání. Mrazicí deska byla uvedena do činnosti teprve po počátečních 17 hodinách. Zmrazování probíhalo při teplotě  $-4 \pm 1$  °C po dobu 120 hodin. Po celou dobu byly snímány mrazové zdvihy v milimetrech. Měření probíhalo ve středu horní plochy vzorku. Po ukončení 120hodinového cyklu bylo zmrazování ukončeno a vzorky opatrně vyjmuty ze zkušebních buněk, aby pokud možno nedošlo k jejich rozpadnutí vlivem oslabení ledovými čočkami.



- 1 – tepelně izolační obal
- 2 – držák snímače zdvihu
- 3 – dno zkušební buňky
- 4 – pórovitá deska
- 5 – zařízení pro udržování konstantní hladiny vody
- 6 – snímač zdvihu
- 7 – závaží
- 8 – mrazící deska
- 9 – horizontálně dělené pouzdro
- 10 – vodící kroužky
- 11 – zásobník na vodu

Obrázek 3.39 - Schéma zkušební buňky [19]



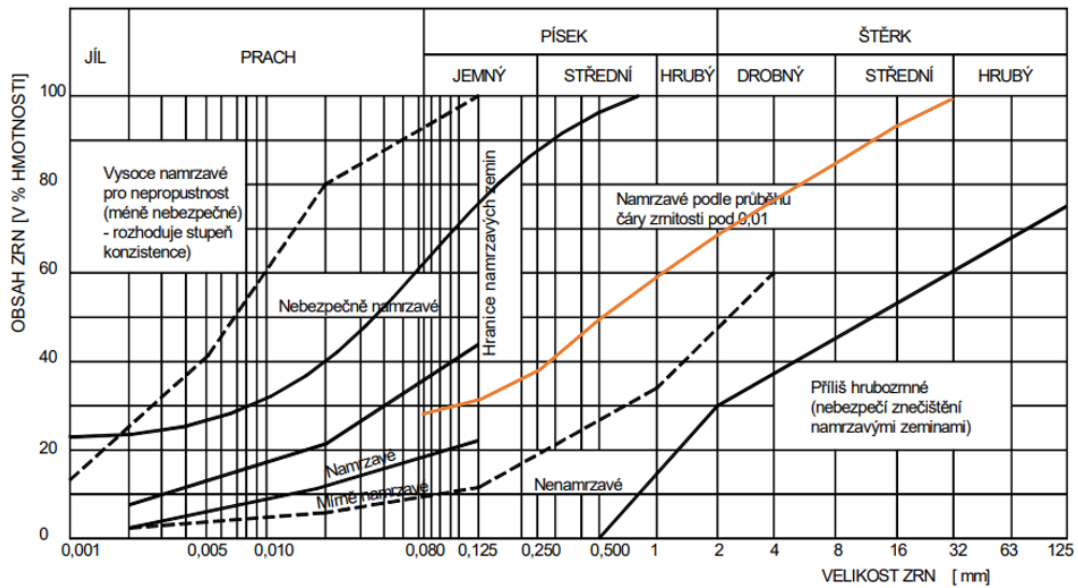
Obrázek 3.40 - Chladicí skříň



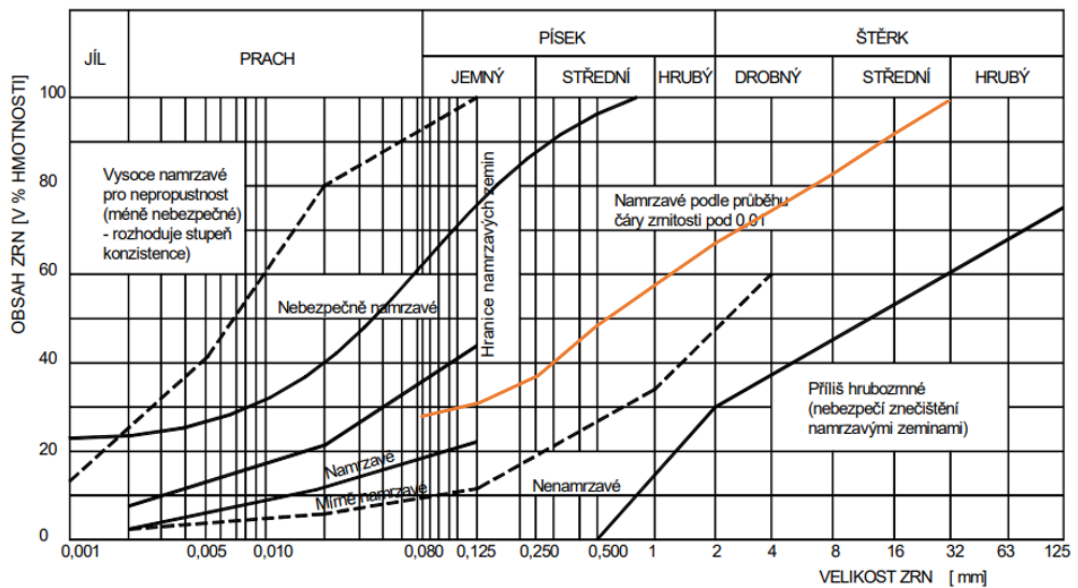
Obrázek 3.41 - Tělesa připravena ke zkoušení



## Vyhodnocení – nepřímá metoda – Scheibleho kritérium



Graf 3.19 - Scheibleho kritérium –  $R_{C+B} 0/32$ , křivka zrnitosti první měření



Graf 3.20 - Scheibleho kritérium –  $R_{C+B} 0/32$ , křivka zrnitosti druhé měření

## Vyhodnocení – přímá metoda

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

$\Delta h$  naměřený zdvih zkoušeného vzorku [mm] odpovídající  $\Delta \sqrt{I_m}$

$I_m$  index mrazu [°C]

Vyhodnocení, do jaké skupiny namrzavosti zemina nebo směs patří, se provede zařazením výsledného součinitele  $\beta$  do tabulky stanovené normou ČSN 72 1191.

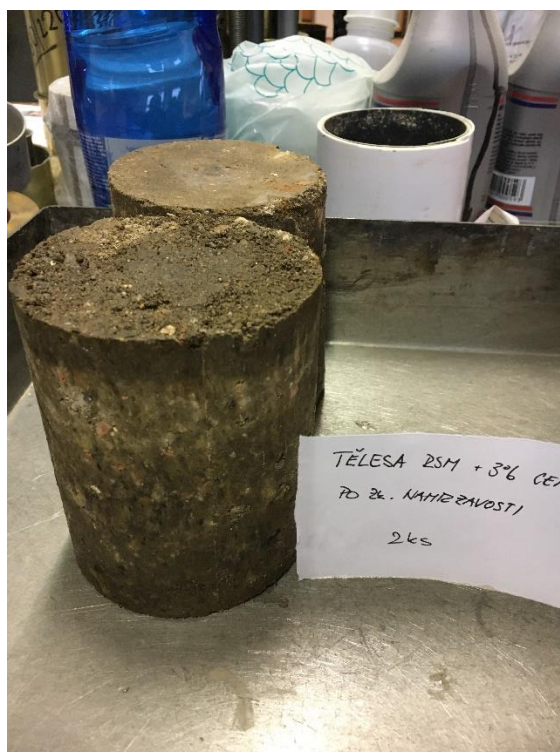
## Směsný recyklát 0/32 + cement 42,5 R



Obrázek 3.42 - Tělesa před zkouškou



Obrázek 3.43 - Tělesa po zkoušce

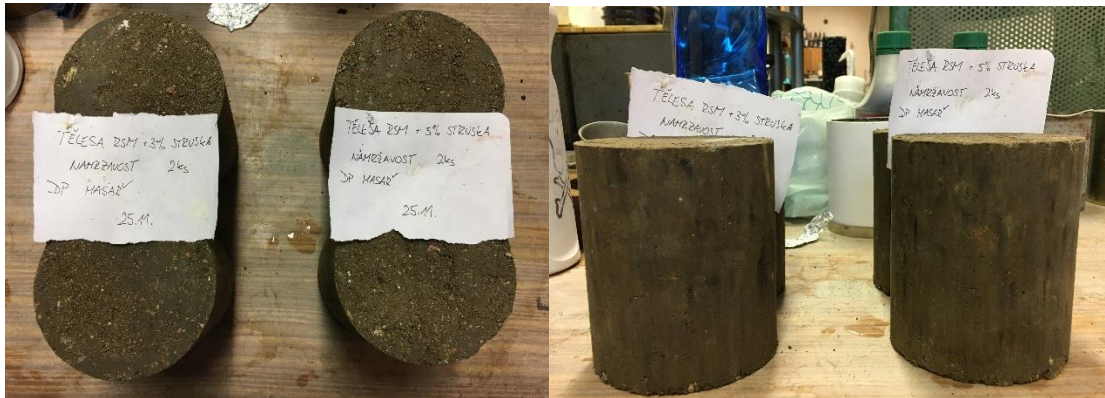


Obrázek 3.44 - Tělesa po zkoušce; zleva: s 3 % CEM 42,5 R, s 5 % CEM 42,5 R

Tabulka 3.21 - Výsledky zkoušky namrzavosti těles s cementem

	3 % cementu		5 % cementu	
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 1	vzorek 2
Počáteční hodnota zdvihu [mm]	0,00	0,00	0,00	0,00
Konečná hodnota zdvihu [mm]	-0,20	-0,10	-0,02	-0,06
Mrazový zdvih během zkoušení [mm]	-0,20	-0,10	-0,02	-0,06
Průměrná hodnota $\beta$ jednotlivých vzorků	-	-	-	-
<b>Výsledný průměr <math>\beta</math></b>	-		-	
<b>Míra namrzavosti</b>	<b>nenamrzavé</b>			

### Směsný recyklát 0/32 + vysokopecní struska



Obrázek 3.45 - Tělesa s vysokopecní struskou před zkouškou



Obrázek 3.46 - Těleso porušené mrazovým zdvihem uložené ve zkušební buňce

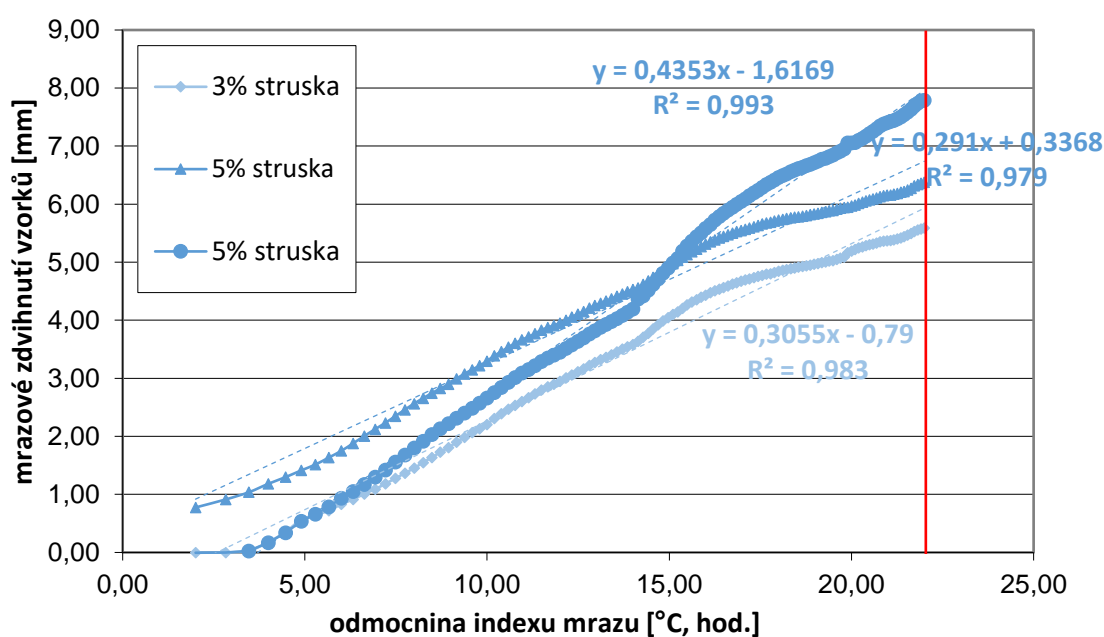


Obrázek 3.47 - Tělesa po zkoušce; zleva: s 3 % STR, s 5 % STR

Tabulka 3.22 - Výsledky zkoušky namrzavosti těles s vysokopecní struskou

	3 % strusky		5 % strusky	
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 1	vzorek 2
Počáteční hodnota zdvihu [mm]	0,00	0,00	0,78	-0,01
Konečná hodnota zdvihu [mm]	5,58	5,30	6,37	7,78
Mrazový zdvih během zkoušení [mm]	5,58	5,30	5,59	7,79
Průměrná hodnota $\beta$ jednotlivých vzorků	0,27	-	0,26	0,41
<b>Výsledný průměr <math>\beta</math></b>	<b>0,27</b>		<b>0,34</b>	
<b>Míra namrzavosti</b>	<b>mírně namrzavé až namrzavé</b>			

**Poznámka:** Celkový průběh zkoušky namrzavosti těles s vysokopecní struskou je zobrazen v příloze. Vzhledem k nefunkčnímu snímači zdvihu byl vzorek 2, tělesa s 3 % vysokopecní strusky, měřen manuálně v určitých časových rozestupech. Konečný mrazový zdvih sloužil pro porovnání se zdvihy naměřenými automaticky. Z toho důvodu není hodnota  $\beta$  vypočtena, jelikož nezastupuje všech 120 hodin namrzání.



Graf 3.21 - Grafické znázornění mrazových zdvihů těles s vysokopecní struskou

## Směsný recyklát 0/32 + cementářské odprašky



Obrázek 3.48 - Tělesa s cementářskými odprašky před zkouškou



Obrázek 3.49 - Tělesa po zkoušce; zleva: s 3 % CEM ODP, s 5 % CEM ODP

Tabulka 3.23 - Výsledky zkoušky namrzavosti těles s cementářskými odprašky

	3 % odprašků		5 % odprašků	
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 1	vzorek 2
Počáteční hodnota zdvihu [mm]	0,00	0,00	0,00	0,00
Konečná hodnota zdvihu [mm]	0,20	0,22	0,01	0,02
Mrazový zdvih během zkoušení [mm]	0,20	0,22	0,01	0,02
Průměrná hodnota $\beta$ jednotlivých vzorků	-	-	-	-
<b>Výsledný průměr <math>\beta</math></b>	-		-	
<b>Míra namrzavosti</b>	<b>nenamrzavé</b>			

### 3.2.6 Odolnost kameniva proti zmrazování a rozmrazování

Zkoušení bylo provedeno podle platné normy ČSN EN 1367-1 Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání – část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování. Podstatou zkoušky je vystavení dílčí navážky úzké frakce kameniva po nasáknutí 10 cyklům zmrazování a rozmrazování. Přesněji se jedná o ochlazování na teplotu  $-17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  pod vodou a následné rozmrazování ve vodní lázni o teplotě přibližně  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Po dokončení cyklů se kamenivo vizuálně překontroluje, zda na něm nastaly změny. Konkrétně jde zejména o výskyt trhlin nebo úbytek hmotnosti. Pro měření bylo potřeba sušárny s nucenou cirkulací vzduchu, váhy s přesností  $\pm 0,1\text{ g}$ , mrazící box, kovové nádoby pro umístění dílčí navážky, zkušební síta a destilovaná voda. [47]

Pro účely této zkoušky byly zhotoveny dvě dílčí zkušební navážky frakce 8/16 o hmotnosti přibližně 500 g. Takto připravené navážky byly zbaveny odplavitelných částic promytím. Následně byly vysušeny do ustálené hmotnosti při teplotě  $100 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Po vychladnutí byla zvážena hmotnost každé dílčí navážky a označena jako  $M_1$ . Poté byly navážky umístěny do kovových nádob k saturaci po dobu  $24 \pm 1$  hodin při teplotě  $20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pro saturaci bylo využito destilované vody, jejíž hladina byla přibližně 10 mm nad povrchem dílčí navážky. Po dokončení saturace byly kovové nádoby přikryty poklicí a vloženy do mrazícího boxu, kde byly zmrazovány po dobu 10 hodin. Po této době byly nádoby vydělány a rozmrazeny ponořením do vody o teplotě přibližně  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Takto bylo provedeno následujících 9 cyklů, přičemž každý cyklus musí být ukončen během 24 hodin. Po dokončení posledního cyklu následovalo promytí a prosetí vzorku na síte s velikostí otvorů poloviny dolního síta, které bylo použito pro přípravu dílčí navážky. Po dokončení byl vzorek vysušen a zvážen, přičemž výsledná hodnota je označena jako  $M_2$ . Z takto stanovených hodnot byl poté vypočten procentní úbytek hmotnosti.



Obrázek 3.50 - Navážka před vysušením



Obrázek 3.51 - Dílčí navážky připravené k měření

## Vyhodnocení

$$F = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

$M_1$  počáteční vysušená celková hmotnost dílčích navážek [g]

$M_2$  konečná vysušená celková hmotnost dílčích navážek, které zůstaly na specifikovaném síti [g]

F procentní úbytek hmotnosti dílčích navážek po střídavém zmrazování a rozmrazování



Obrázek 3.52 - Kamenivo po zkoušce odolnosti proti mrazu; vpravo na fotce propad sítem 4 mm

$$M_1 = 999,6 \text{ g}$$

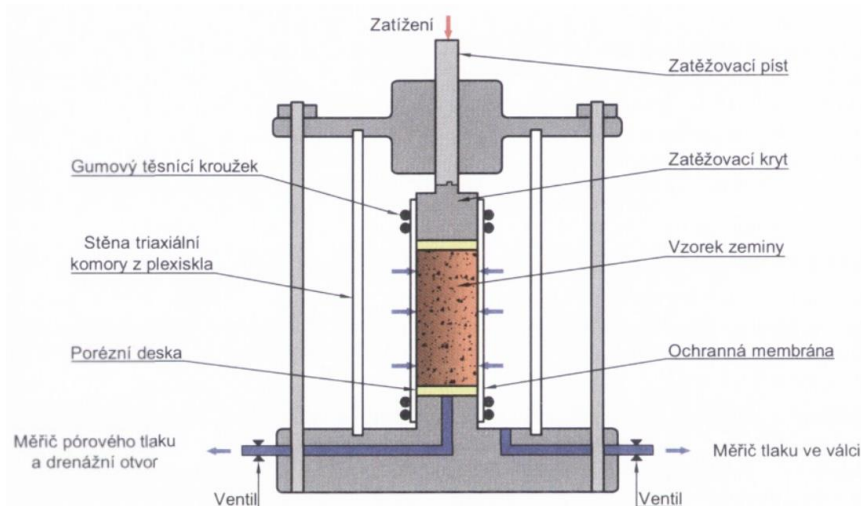
$$M_2 = 724,5 \text{ g}$$

$$F = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 = \frac{999,6 - 724,5}{999,6} \times 100 = 27,52 \%$$

### 3.2.7 Experimentální cyklická triaxiální zkouška

Cílem této zkoušky je stanovení modulu pružnosti  $E_r$  jednotlivých směsí. Důvodem, proč je tato zkouška nazvána experimentální je, že normativní předpisy existují pouze pro zkoušení nestmelených směsí, přičemž tělesa pro účely této diplomové práce jsou vždy stmeleny určitým typem pojiva. Při zkoušení bylo postupováno dle platné normy ČSN EN 13286-7 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 7: Zkouška nestmelených směsí cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji.

Podstatou zkoušky je zatěžování válcových zkušebních těles cyklickým napětím, které odpovídá různému rozsahu napětí působícího na vrstvu vozovky. Při cyklickém zatěžování je těleso vystaveno trojosému tlaku, přičemž ve vodorovném směru jde o tlak komorový a ve svislém směru o komorový tlak + tlak pístu, který simuluje zatížení od těžkých nákladních vozidel. Při cyklickém zatěžování, tzv. kondicionání, dojde vlivem zatěžovacích cyklů k ustálení stálého přetvoření materiálu a k docílení jeho pružného chování. Poté následuje zatěžování cykly o různém napětí, při kterých je měřeno pružné přetvoření a tomu odpovídající napětí. Výsledkem zkoušky jsou tak hodnoty modulů pružnosti v závislosti na komorovém a svislém tlaku. Modul pružnosti se zvyšuje se zvyšováním svislého napětí, přičemž svislé napětí se zvyšuje se zvyšujícím se komorovým tlakem, který simuluje tlak prostředí v konstrukci vozovky a schopnost vodorovně roznést napětí v dané vrstvě. Pro měření byla potřeba triaxiální tlaková komora, pracovní médium, zatěžovací zařízení, senzory tlaku osově síly a deformace, porézní destičky a podstava umožňující drenáž vzorků a membrána. Pro měření byla zvolena metoda B s konstantním komorovým tlakem – úroveň vysokého napětí. [48]



Obrázek 3.53 - Schéma triaxiálního přístroje [19]

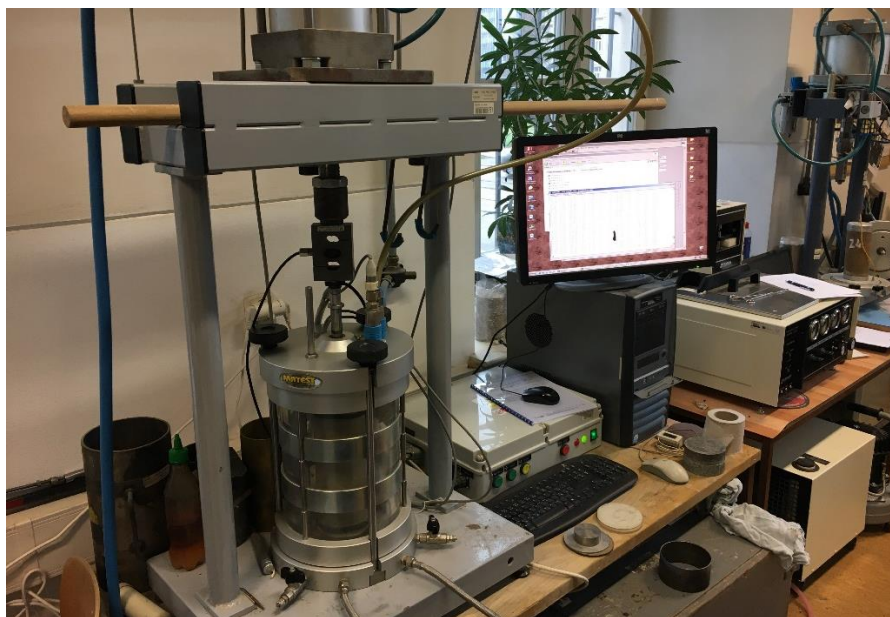


Pro zkoušení bylo použito válcových zkušebních těles s průměrem podstavy  $d = 100 \text{ mm}$  a výškou  $v = 200 \text{ mm}$ . Normativními předpisy je stanoveno, že velikost maximálního zrna nesmí překročit pětinasobek průměru zkušebního tělesa. Tento fakt byl vzhledem k povaze materiálu, kde je vysoká odolnost proti drcení a malé zastoupení složky kameniva nad  $16 \text{ mm}$ , zanedbán. Vzhledem k absenci lisu pro výrobu zkušebních těles byl použit alternativní způsob přípravy těles, a to Proctorova modifikovaná práce s upravenou energií  $E$  potřebnou k hutnění. Vycházelo se z energie Proctorovy modifikované zkoušky, podle které byl stanoven potřebný počet úderů na vrstvu k hutnění větší formy. Výpočet je zobrazen níže.

$$E = \frac{\text{hm. p\text{ě}chu} \times \text{výška dopadu} \times \text{počet úderů na vrstvu} \times \text{počet vrstev} \times \text{grav. konstanta}}{\text{objem formy}}$$

$$E = \frac{m_p \times h_p \times i_u \times n_v \times g}{V} \rightarrow i_u = \frac{E \times V}{m_p \times h_p \times n_v \times g} = \frac{2,68 \times 50^2 \times \pi \times 200}{4,5 \times 457 \times 5 \times 9,81} = 41,7$$

K hutnění bylo potřeba zaokrouhleně 42 úderů na každou z pěti vrstev. Takto vyrobená tělesa se opatrně vyjmula z formy, aby nedošlo k jejich poškození. Ke zkoušení byly vybrány směsi se 3 % pojiva, přičemž od každé směsi byla vyrobena 2 tělesa. Dohromady bylo ke zkoušení připraveno 6 těles. Všechny tělesa byla uložena do komory, kde zrály bez ztráty vlhkosti. Před zkoušením bylo těleso navláknu do membrány a usazeno na porézní destičky s uchycením membrány pryžovým kroužkem k horní a spodní podstavě triaxiální komory. Takto připravený vzorek byl vycentrován. Následně byly osazeny měřicí senzory a uzavřena triaxiální komora. Kompletně připravený vzorek byl vložen do zatěžujícího zařízení.



Obrázek 3.54 - Připravený triaxiální přístroj k měření

Na připraveném vzorku bylo zahájeno kondicionování při konstantním komorovém tlaku. Běžně je při kondicionování aplikováno 20 000 cyklů. Při měření stmelených směsí lze kondicionování snížit na 5000 cyklů, jelikož jsou pružné deformace ustáleny dříve než třeba u plastických zemin. Snížení počtu cyklů je založeno na zkušenostech doc. Ing. Dušana Stehlíka Ph.D. z měření stmelených směsí. Po dokončení kondicionování byla spuštěna hlavní část zatěžování. Zde bylo svislé napětí při konstantním komorovém tlaku aplikováno ve zkráceném měření v 7 krocích. V každém ze 7 kroků bylo těleso vystaveno 100 zatěžovacím cyklům. Při měření byly zaznamenány svislé deformace vzorku při různém svislém napětí. Z takto získaných dat byly vypočteny moduly pružnosti  $E_r$  pro jednotlivé komorové tlaky a svislé zatížení.

Tabulka 3.24 - Aplikované kroky zatěžování

číslo kroku zatěžování	Počet cyklů	Komorový tlak	Deviátor napětí	
		[kPa]	min [kPa]	max [kPa]
1	100	50	0	170
2	100	50	0	210
3	100	70	0	280
4	100	70	0	340
5	100	100	0	340
6	100	100	0	400
7	100	150	0	475



Obrázek 3.55 - Připravené vzorky k měření modulu pružnosti

## Vyhodnocení

### Poměrné přetvoření tělesa při zatížení

$$\varepsilon_{1,i} = \frac{\Delta h_{1,i}}{H}$$

$\varepsilon_{1,i}$	poměrné přetvoření tělesa při zatížení [-]
$\Delta h_{1,i}$	změna výšky zkušební tělesa při zatížení [-]
H	výška zkušební tělesa [mm]

### Poměrné přetvoření tělesa při odtížení

$$\varepsilon_{2,i} = \frac{\Delta h_{2,i}}{H}$$

$\varepsilon_{2,i}$	poměrné přetvoření tělesa při odtížení [-]
$\Delta h_{2,i}$	změna výšky zkušební tělesa při odtížení [-]
H	výška zkušební tělesa [mm]

### Svislé napětí

$$\sigma_{1,i}^r = \sigma_{1,\max,i} - \sigma_{1,\min,i}$$

$\sigma_{1,i}^r$	svislé napětí [MPa]
$\sigma_{1,\max,i}$	svislé napětí při zatížení [MPa]
$\sigma_{1,\min,i}$	svislé napětí při odtížení [MPa]

### Pružné poměrné přetvoření

$$\varepsilon_{1,i}^r = \varepsilon_{1,i} - \varepsilon_{2,i}$$

$\varepsilon_{1,i}^r$	pružné poměrné přetvoření [-]
$\varepsilon_{1,i}$	poměrné přetvoření tělesa při zatížení [-]
$\varepsilon_{2,i}$	poměrné přetvoření při odtížení [-]

### Modul pružnosti

$$E_{r,i} = \frac{\sigma_{1,i}^r}{\varepsilon_{1,i}^r}$$

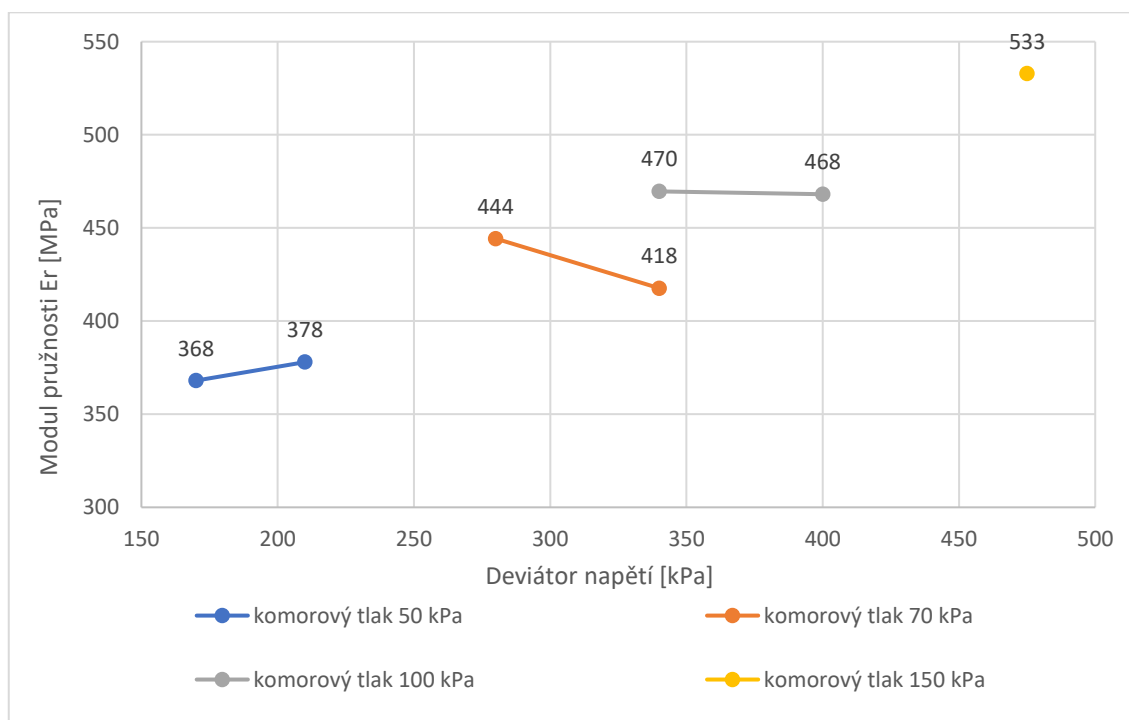
$E_{r,i}$	modul pružnosti [MPa]
$\sigma_{1,i}^r$	svislé napětí [MPa]
$\varepsilon_{1,i}^r$	pružné poměrné přetvoření [-]

Dle výše zmíněných rovnic byl proveden výpočet modulu pružnosti  $E_r$  pro každý zatěžovací krok, přičemž následně byl vždy z každých dvou zatěžovacích kroků vypočítán průměr. Vzhledem k povaze zkoušky došlo k uspokojivému vyhodnocení u tří těles. U ostatních byly výsledky výrazně odlišné, když bylo naměřeno, že tělesa nebyla vůbec zdeformována. Proto byly z vyhodnocení vynechány.

### Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementu 42,5 R

Tabulka 3.25 - Výsledné hodnoty  $E_r - R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM 42,5 R

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementu 42,5 R					
	číslo kroku zatěžování	Počet cyklů	Komorový tlak [kPa]	Deviátor napětí		Hodnota $E_r$ směsi [MPa]
min [kPa]				max [kPa]		
1	100	50	0	170	368,02	373
2	100	50	0	210	377,96	
3	100	70	0	280	444,26	431
4	100	70	0	340	417,65	
5	100	100	0	340	469,61	469
6	100	100	0	400	468,10	
7	100	150	0	475	532,86	533

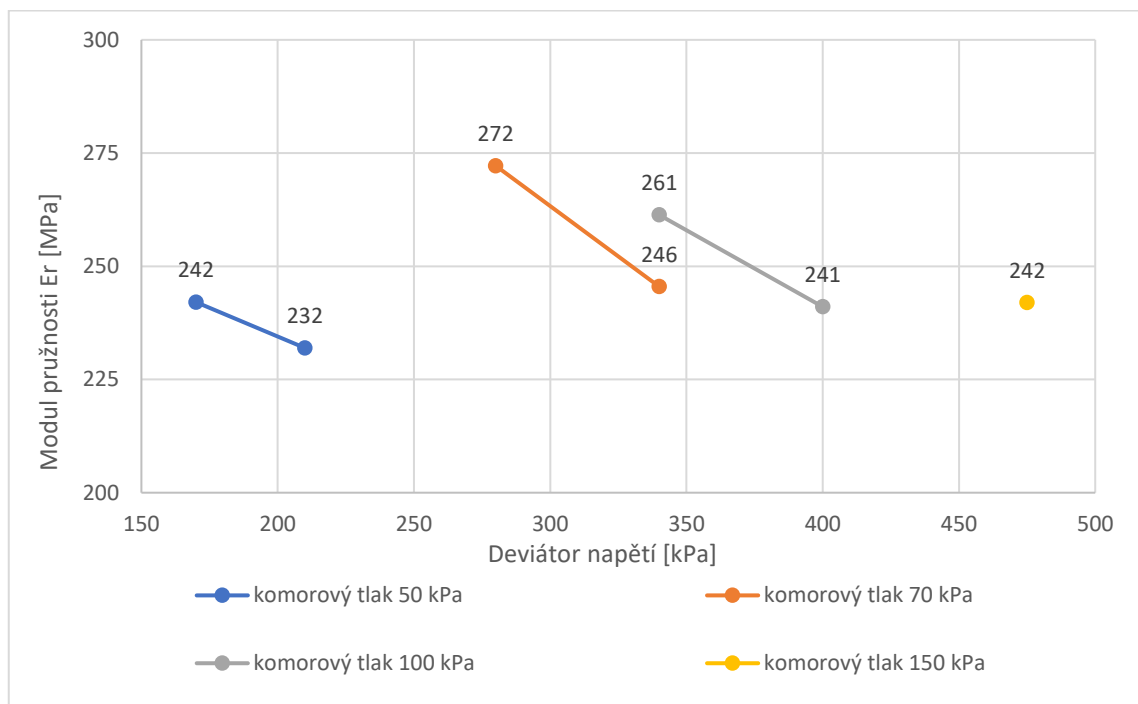


Graf 3.22 - Graf výsledných hodnot  $E_r - R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM 42,5 R

## Směsný recyklát 0/32 + 3 % vysokopecní strusky

Tabulka 3.26 - Výsledné hodnoty  $E_r - R_{C+B}$  0/32 + 3 % STR

Směs		Směsný recyklát 0/32 + 3 % vysokopecní strusky				
číslo kroku zatěžování	Počet cyklů	Komorový tlak	Deviátor napětí		Hodnota $E_r$ směsi [MPa]	Ø hodnota $E_r$ směsi [MPa]
		[kPa]	min [kPa]	max [kPa]		
1	100	50	0	170	242,08	237
2	100	50	0	210	231,96	
3	100	70	0	280	272,19	259
4	100	70	0	340	245,50	
5	100	100	0	340	261,34	251
6	100	100	0	400	241,05	
7	100	150	0	475	241,98	242

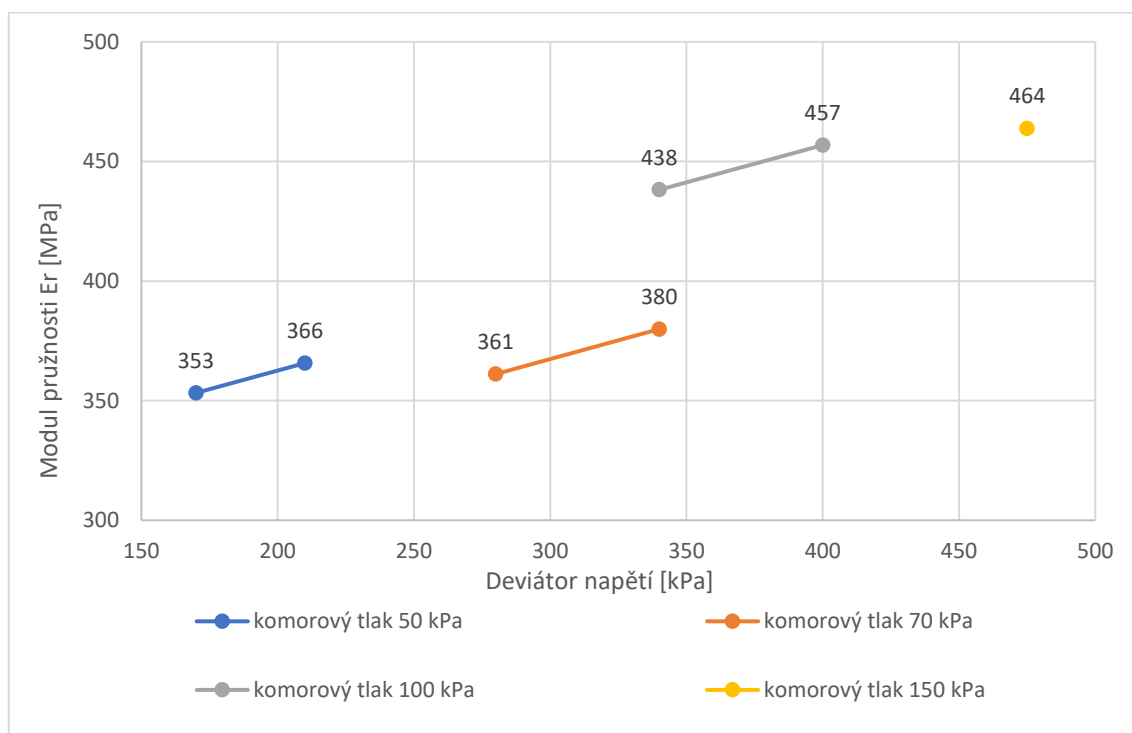


Graf 3.23 - Graf výsledných hodnot  $E_r - R_{C+B}$  0/32 + 3 % STR

## Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementářských odprašků

Tabulka 3.27 - Výsledné hodnoty  $E_r - R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM ODP

Směs	Směsný recyklát 0/32 + 3 % cementářských odprašků					
číslo kroku zatěžování	Počet cyklů	Komorový tlak	Deviátor napětí		Hodnota $E_r$ směsi [MPa]	Ø hodnota $E_r$ směsi [MPa]
		[kPa]	min [kPa]	max [kPa]		
1	100	50	0	170	353,24	359
2	100	50	0	210	365,70	
3	100	70	0	280	361,13	371
4	100	70	0	340	379,92	
5	100	100	0	340	438,16	447
6	100	100	0	400	456,82	
7	100	150	0	475	463,74	464

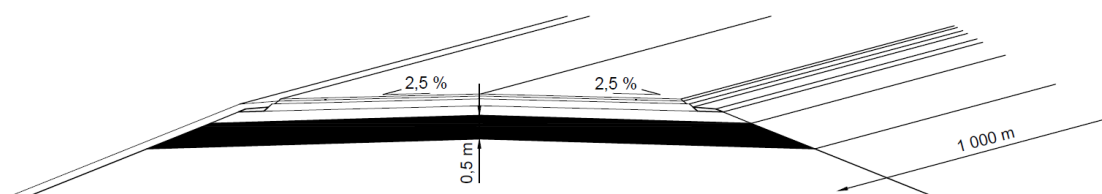


Graf 3.24 - Graf výsledných hodnot  $E_r - R_{C+B}$  0/32 + 3 % CEM ODP

Je nutné podotknout, že výsledné hodnoty je nutné brát jako orientační vzhledem k povaze zkoušky. V případě podloží vozovky jsou důležité výsledky měření při komorovém tlaku 50 kPa. Zde se nejlépe pohybuje směsný recyklát s 3 % cementu 42,5 R, kde vyšel průměrný modul pružnosti  $E_r$  373 MPa.

### 3.3 EKONOMICKÉ SROVNÁNÍ PŘI POUŽITÍ DO PODLOŽÍ VOZOVKY

V rámci této kapitoly budou srovnány vybrané směsi zkoušené v praktické části a běžně užívaná zemina do aktivní zóny pozemní komunikace. Vzhledem k výsledkům zkoušek byla ke srovnání vybrána směs směsného recyklátu 0/32 s 3 % cementu 42,5 R a směs směsného recyklátu 0/32 s 5 % cementářských odprašků. Tyto směsi budou srovnány se štěrkem s příměsí jemnozrné zeminy (G3 G-F) 0/32. Pro ukázkou cenového rozdílu při použití jednotlivých směsí do aktivní zóny byl proveden výpočet průměrné spotřeby materiálu na vzorové komunikaci S 9,5 délky 1000 m. Cenové zhodnocení obsahuje pouze cenu materiálů. Doprava a potřebná strojní mechanizace pro provedení vrstvy na stavbě není zahrnuta.



Obrázek 3.56 - Schéma komunikace S 9,5 s umístěním aktivní zóny

Tabulka 3.28 - Cenové zhodnocení směsí při použití do aktivní zóny

Položka	Štěrka s příměsí jemnozrné zeminy G3 G-F 0/32	směsný recyklát 0/32 + 3 % cementu 42,5 R	směsný recyklát 0/32 + 5 % cementářských odprašků
cena materiálu [Kč/t]	110	35	35
Ø objemová hmotnost materiálu [kg/m <sup>3</sup> ]	2035	1930	1930
cena materiálu [Kč/m <sup>3</sup> ]	<b>223,85</b>	<b>67,6</b>	<b>67,6</b>
množství pojiva [%]	-	3	5
množství pojiva [kg/m <sup>3</sup> ]	-	57,9	96,5
cena pojiva [kč/t]	-	2550	100
množství vody [m <sup>3</sup> ]	-	0,195	0,204
cena vody [kč/m <sup>3</sup> ]	-	40	40
cena pojiva a vody [kč/m <sup>3</sup> ]	-	<b>155,4</b>	<b>17,8</b>
<b>Celková cena směsi [kč/m<sup>3</sup>]</b>	<b>223,9</b>	<b>223,0</b>	<b>85,4</b>
tloušťka vrstvy [m]	0,5	0,5	0,5
délka úseku [m]	1000	1000	1000
potřeba materiálu [m <sup>3</sup> /km]	6416,2	6416,2	6416,2
<b>Celková cena směsi [kč/km]</b>	<b>1 436 266</b>	<b>1 430 492</b>	<b>547 687</b>

Lze vidět, že celková cena směsi běžně užívané a směsi ze směsného recyklátu 0/32 s 3 % cementu 42,5 R je totožná. Významný cenový rozdíl je v případě použití směsi směsného recyklátu 0/32 s 5 % cementářských odprašků, který je způsoben cenou pojiva. Dle výsledků zkoušek lze předpokládat, že by vyhověla i směs s nižším obsahem cementu. Pokud by taková směs vyhověla, bylo by její použití lépe odůvodnitelné. Z tabulky je patrné, že při použití směsného recyklátu s 5 % odprašků lze ušetřit přibližně 880 000 Kč, což lze považovat za významný rozdíl. Výhodou je také ušetření cementových pojiv a využití dalšího odpadního materiálu.

### 3.4 UPLATNĚNÍ SMĚSI V KONSTRUKCI VOZOVKY

Vzhledem k nadměrně dobrým výsledkům zkoušek, bylo provedeno také umístění nejlepší směsi do konstrukce vozovky jako náhrada běžně užívaných spodních podkladních vrstev. K posouzení bylo využito naměřených modulů pružnosti  $E_r$ , které byly zahrnuty do výpočtu v programu LayEps. Vzhledem k naměřeným modulům pružnosti byla k výpočtům využita směs směsného recyklátu s 3 % cementu 42,5 R. Skladby, které byly posuzovány, byly vybrány na základě dopravního zatížení. Vzhledem k tomu, že ekonomická výhoda použití recyklátů je při dopravě na krátké vzdálenosti, jedná se především o skladby používané pro silnice II. a III. třídy s třídou zatížení IV a nižší. Skladby byly vybrány dle katalogových listů TP 170.

Celkem byly zvoleny 4 skladby netuhých vozovek. Ve dvou skladbách byla nahrazena směs  $\text{ŠD}_A$ , ve zbylých dvou skladbách vrstva  $\text{ŠD}_B$ . Při výpočtech byl zvolen typ podloží P III – návrhový modul  $E_{pd} = 50 \text{ MPa}$  – nebezpečná namrzavost. Vodní režim byl zvolen pendulární. Jako dopravní zatížení byla zvolena vždy hodnota  $TN_{Vc}$  dle katalogových listů TP 170. Do výpočtů vstupovaly také koeficienty C1, C2, C3 a C4, které byly zvoleny následovně:

C1 = 0,5	obousměrné komunikace
C2 = 0,7	úrovně porušení D1 a D2
C3 = 0,5	běžné zatížení netuhých vozovek
C4 = 1,0	rychlosti 50 km/h a vyšší

Návrhové období bylo uvažováno 25 let. Výsledkem je hodnota poměrného porušení, díky které lze určit, zda navržená skladba vyhovuje dopravnímu zatížení.



### 3.4.1 Konstrukce vozovky pro třídu dopravního zatížení IV

Tabulka 3.29 - Posouzení skladby D1-N-1 pro TDZ IV s alternativním návrhem

Dopravní zatížení: IV	C1 = 0,50	Typ podloží: P III					
Úroveň porušení: D1	C2 = 0,70	$E_{pd} = 50 \text{ MPa}$					
$TNV_0 = 434$	C3 = 0,50	Vodní režim: pendulární					
$TNV_c = 2\,305\,171$	C4 = 1,00	Nebezpečně namrzavé					
Skladba vozovky dle TP – D1-N-1			Alternativní návrh skladby vozovky				
vrstva	tl. [mm]	$E_r$ [MPa]	pom. poruš.	vrstva	tl. [mm]	$E_r$ [MPa]	pom. poruš.
ACO 11	40	5500	0,0000	ACO 11	40	5500	0,0000
ACP 16+	80	5500	0,3049	ACP 16+	80	5500	0,3041
MZK	150	600	0,0000	MZK	150	600	0,0000
Š <sub>DA</sub>	200	400	0,0000	R <sub>C+B</sub> C <sub>1,5/2,0</sub>	210	373	0,0000
<b>celková tl.</b>	<b>470</b>			<b>celková tl.</b>	<b>480</b>		
<b>celkové poměrné porušení</b>			<b>0,8970</b>	<b>celkové poměrné porušení</b>			<b>0,9128</b>

Tabulka 3.30 - Posouzení skladby D1-N-8 pro TDZ IV s alternativním návrhem

Dopravní zatížení: IV	C1 = 0,50	Typ podloží: P III					
Úroveň porušení: D1	C2 = 0,70	$E_{pd} = 50 \text{ MPa}$					
$TNV_0 = 434$	C3 = 0,50	Vodní režim: pendulární					
$TNV_c = 2\,305\,171$	C4 = 1,00	Nebezpečně namrzavé					
Skladba vozovky dle TP – D1-N-8			Alternativní návrh skladby vozovky				
vrstva	tl. [mm]	$E_r$ [MPa]	pom. poruš.	vrstva	tl. [mm]	$E_r$ [MPa]	pom. poruš.
ACO 11	40	5500	0,0000	ACO 11	40	5500	0,0000
ACP 16+	70	5500	0,0357	ACP 16+	70	5500	0,0370
SC C <sub>3/4</sub>	150	1200	0,0000	SC C <sub>3/4</sub>	150	1200	0,0000
Š <sub>DA</sub>	200	400	0,0000	R <sub>C+B</sub> C <sub>1,5/2,0</sub>	200	373	0,0000
<b>celková tl.</b>	<b>460</b>			<b>celková tl.</b>	<b>460</b>		
<b>celkové poměrné porušení</b>			<b>0,6371</b>	<b>celkové poměrné porušení</b>			<b>0,7456</b>

Alternativní návrh vyhoví v obou skladbách a může tak být vhodnou náhradou za katalogovou skladbu vozovky. V alternativní skladbě pro D1-N-1 je potřeba zesílit spodní podkladní vrstvu o 10 mm, aby vyhovělo poměrné porušení a skladba tak vyhověla dopravnímu zatížení pozemní komunikace. V alternativní skladbě pro D1-N-8 lze vidět vyšší poměrné porušení než u katalogové skladby. Pokud by byl požadavek, aby poměrné porušení bylo stejné, vyřešilo by to zesílení spodní podkladní vrstvy v alternativní skladbě o 10 mm.

### 3.4.2 Konstrukce vozovky pro třídu dopravního zatížení V

Tabulka 3.31 - Posouzení skladby D1-N-1 pro TDZ V s alternativním návrhem

Dopravní zatížení: V	C1 = 0,50	Typ podloží: P III					
Úroveň porušení: D1	C2 = 0,70	$E_{pd} = 50 \text{ MPa}$					
$TNV_0 = 87$	C3 = 0,50	Vodní režim: pendulární					
$TNV_c = 462\,097$	C4 = 1,00	Nebezpečně namrzavé					
Skladba vozovky dle TP – D1-N-1			Alternativní návrh skladby vozovky				
vrstva	tl. [mm]	$E_r$ [MPa]	pom. poruš.	vrstva	tl. [mm]	$E_r$ [MPa]	pom. poruš.
ACO 11	40	5500	0,0000	ACO 11	40	5500	0,0000
ACP 16+	60	5500	0,0846	ACP 16+	60	5500	0,0873
MZK	150	600	0,0000	MZK	150	600	0,0000
ŠD <sub>B</sub>	200	400	0,0000	R <sub>C+B</sub> C <sub>1,5/2,0</sub>	200	373	0,0000
<b>celková tl.</b>	<b>450</b>			<b>celková tl.</b>	<b>450</b>		
<b>celkové poměrné porušení</b>			<b>0,3130</b>	<b>celkové poměrné porušení</b>			<b>0,3651</b>

Tabulka 3.32 - Posouzení skladby D1-N-8 pro TDZ V s alternativním návrhem

Dopravní zatížení: V	C1 = 0,50	Typ podloží: P III					
Úroveň porušení: D1	C2 = 0,70	$E_{pd} = 50 \text{ MPa}$					
$TNV_0 = 87$	C3 = 0,50	Vodní režim: pendulární					
$TNV_c = 462\,097$	C4 = 1,00	Nebezpečně namrzavé					
Skladba vozovky dle TP – D1-N-8			Alternativní návrh skladby vozovky				
vrstva	tl. [mm]	$E_r$ [MPa]	pom. poruš.	vrstva	tl. [mm]	$E_r$ [MPa]	pom. poruš.
ACO 11	40	5500	0,0000	ACO 11	40	5500	0,0000
ACP 16+	60	5500	0,0189	ACP 16+	60	5500	0,0197
SC C <sub>1,5/2,0</sub>	130	1000	0,0000	SC C <sub>1,5/2,0</sub>	130	1000	0,0000
ŠD <sub>B</sub>	200	400	0,0000	R <sub>C+B</sub> C <sub>1,5/2,0</sub>	200	373	0,0000
<b>celková tl.</b>	<b>430</b>			<b>celková tl.</b>	<b>430</b>		
<b>celkové poměrné porušení</b>			<b>0,2897</b>	<b>celkové poměrné porušení</b>			<b>0,3392</b>

Alternativní návrh vyhoví v obou skladbách a může tak být vhodnou náhradou za katalogovou skladbu vozovky. Lze vidět že skladby jsou poměrně předimenzovány. Pro možnost porovnání však byly katalogové skladby zachovány beze změny.

### 3.4.3 Ekonomické srovnání při použití do spodní podkladní vrstvy vozovky

Cena směsného recyklátu 0/32 s 3 % cementu 42,5 R byla spočítána výše. Nyní budou stanoveny orientační ceny ŠD<sub>A</sub> a ŠD<sub>B</sub> pro následné porovnání ceny spodní podkladní vrstvy na vzorovém úseku komunikace S 9,5 délky 1 000 m. Do výpočtu vstupuje pouze cena materiálu. Doprava a potřebná strojní mechanizace pro provedení vrstvy na stavbě není zahrnuta.



Obrázek 3.57 - Schéma komunikace S 9,5 s umístěním spodní podkladní vrstvy

Tabulka 3.33 - Orientační ceny ŠD<sub>A</sub> a ŠD<sub>B</sub>

Položka	ŠD <sub>A</sub>	ŠD <sub>B</sub>
cena kameniva [Kč/t]	267	207
Ø objemová hmotnost kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	1880	1880
cena kameniva [kč/m <sup>3</sup> ]	<b>502,0</b>	<b>389,2</b>

Tabulka 3.34 - Cenové zhodnocení směsí při použití do spodní podkladní vrstvy

skladba konstrukce vozovky	podkladní vrstva	tl. vrstvy [mm]	cena [kč/m <sup>3</sup> ]	spotřeba materiálu [m <sup>3</sup> /km]	celková cena [kč/km]
D1-N-1-TDZ IV	ŠD <sub>A</sub>	200	502	2324,4	<b>1 166 849</b>
Alternativní skladba	R <sub>C+B</sub> C <sub>1,5/2,0</sub>	210	223	2439,5	<b>544 009</b>
D1-N-8-TDZ IV	ŠD <sub>A</sub>	200	502	2324,4	<b>1 166 849</b>
Alternativní skladba	R <sub>C+B</sub> C <sub>1,5/2,0</sub>	200	223	2324,4	<b>518 341</b>
D1-N1-1-TDZ V	ŠD <sub>B</sub>	200	389,2	2324,4	<b>904 656</b>
Alternativní skladba	R <sub>C+B</sub> C <sub>1,5/2,0</sub>	200	223	2324,4	<b>518 341</b>
D1-N-8-TDZ V	ŠD <sub>B</sub>	200	389,2	2324,4	<b>904 656</b>
Alternativní skladba	R <sub>C+B</sub> C <sub>1,5/2,0</sub>	200	223	2324,4	<b>518 341</b>

V tabulce lze vidět, že při použití alternativní skladby dojde ve všech případech k výraznému snížení ceny. Úspora se v případě použití do skladeb vozovky pro třídu zatížení IV pohybuje od 622 000 do 648 000 Kč bez DPH. V případě použití do skladby vozovky s třídou zatížení V je úspora 386 000 Kč bez DPH.

## 4 ZÁVĚR

Cílem teoretické části diplomové práce bylo shrnout dostupné informace a poznatky o možném využití směsného recyklátu do podloží vozovky pozemní komunikace. Bylo zjištěno, že SDO zaujímá mezi odpadními materiály významný podíl a jeho recyklace musí být součástí hospodářských plánů vyspělých zemí. Vzhledem k tomu, že složení směsného recyklátu není nijak předepsáno a kvalita je tak různorodá, je důležité dodržovat výrobní postupy, které předepisují základní kroky výroby. Při jejich dodržení vznikne směsný recyklát, který může zastoupit běžně užívané přírodní materiály. Základní výrobní kroky však často nejsou dodržovány, a to je hlavním důvodem podprůměrného využití směsného recyklátu. Je tedy potřeba osvojit si základní výrobní předpisy a zaručit výslednou kvalitu směsného recyklátu pro jeho následné využití bez obav, že se jedná o podřadný materiál. Výhodou při použití směsného recyklátu nemusí být pouze ekologické hledisko, ale také cenové. Směsné recykláty se nabízejí za mnohem nižší prodejní ceny, než je tomu u běžně užívaných materiálů pro výstavbu aktivní zóny vozovky pozemní komunikace. Pokud tedy recyklát splní požadavky na použití, může se jednat o plnohodnotnou náhradu.

Kromě výroby je důležité sledovat také problematické vlastnosti. Ty mohou vznikat zejména při obsahu nadměrného množství cihelných střepek, kdy se recyklát stane nebezpečně namrzavým. Problémem mohou být také zdraví škodlivé látky, které znemožní použití takového recyklátu. Vhodným výrobním postupem a vyřazením nebezpečných odpadů však lze tyto problematické vlastnosti dobře eliminovat.

Závěr teoretické části byl věnován zahraničním zkušenostem. V Číně byl ze SDO a recyklátů vybudován silniční násyp městského okruhu. V posledních letech probíhalo monitorování a nebyly zjištěny nepřípustné deformace nebo poškození, což ukazuje na skutečnost, že recyklovaný materiál lze bez problémů použít. Ve Španělsku byla ze směsného recyklátu postavena nezpevněná účelová komunikace, která i po několika letech provozu funguje bez jakéhokoli porušení. Proto budování zpevněných i nezpevněných účelových komunikací, na které nejsou kladeny tak přísné požadavky jako na komunikace s vyšším dopravním zatížením, může významně ovlivnit spotřebu recyklátu, který je běžně používán pouze na obsypy inženýrských sítí. Výrazným pokrokem je také míra recyklace většiny evropských států. Nejvýznamnější producenti udržují míru recyklace okolo 80–90 % a dochází tak k naplnění požadavků stanovených při zasedání evropského parlamentu.

V praktické části byla pozornost věnována laboratornímu zkoušení směsného recyklátu 0/32 s obsahem hlinité složky a jeho směsí s portlandským cementem 42,5 R, vysokopevní struskou a cementářskými odprašky. Cílem bylo ověřit, zda může nahradit běžně užívané materiály v podloží vozovky pozemních komunikací. Na začátku zkoušení byl směsný recyklát posouzen z hlediska zrnitosti síťovým rozborem. Následně byly vytvořeny směsi s 3 % a 5 % hm. zastoupením portlandského cementu 42,5 R a zjištěna maximální objemová hmotnost při dosažení optimální vlhkosti pomocí Proctorovy modifikované zkoušky. Výsledek zkoušky byl brán jako referenční pro použití zbylých dvou pojiv. Po vyhodnocení zkoušky byly namíchány směsi s jednotlivým procentuálním zastoupením pojiv, ze kterých byla následně zhotovena tělesa pro zkoušku pevnosti v tlaku, pevnosti v příčném tahu a zkoušku namrzavosti zemin. Na odolnost proti mrazu a rozmrazování byl posouzen také dílčí vzorek kameniva 8/16 získaného přeseťím směsného recyklátu 0/32. Zkoušení bylo doplněno o experimentální měření modulu pružnosti. Výsledky byly využity pro posouzení únosnosti v programu LayEps a ekonomické zhodnocení při využití navržené směsi jako náhrady za běžně užívané spodní podkladní vrstvy a horní vrstvu násypu.

Podle zkoušky zrnitosti bylo vyhodnoceno, že obsah jemné frakce  $f$  je menší než 35 %, tudíž se jedná o zeminu hrubozrnnou. Jelikož převažující hrubá frakce byla velikosti 0,063 mm až 2 mm, jedná se o písek. Z takto získaných výsledků lze zkoušený směsný recyklát 0/32 klasifikovat podle ČSN 73 6133 jako S4 SM, což je písek hlinitý. Takto klasifikovaný materiál je podmíněčně vhodný pro podloží vozovky a násypy pozemních komunikací. Proto se musí jeho vlastnosti před použitím vždy ověřit laboratorními zkouškami.

Následně byly namíchány směsi s 3 % a 5 % hm. zastoupením portlandského cementu 42,5 R. Na takto připravených směsích byla provedena Proctorova modifikovaná zkouška. Z výsledků bylo patrné, že objemová hmotnost jednotlivých směsí byla téměř totožná. Konkrétně směs  $R_{C+B} 0/32 + 3\% \text{ CEM } 42,5 \text{ R}$  měla objemovou hmotnost suché směsi  $1930 \text{ kg/m}^3$  a směs  $R_{C+B} 0/32 + 5\% \text{ CEM } 42,5 \text{ R}$   $1932 \text{ kg/m}^3$ . Vlhkost byla stanovena na 10,1 % v případě směsi s nižším dávkováním pojiva a 10,5 % v případě směsi s vyšším dávkováním pojiva. Je důležité podotknout že přidání pojiva značně ovlivnilo zpracovatelnost a zhutnitelnost směsi. Důležitým poznatkem bylo také náročnější stanovení optimální vlhkosti. V případě, kdy není navážka směsného recyklátu, ze které je odebírána dílčí navážka pro Proctorovu zkoušku, dostatečně promísena, může dojít k odchylkám měření o 1 % výsledné vlhkosti.

Dalším bodem bylo stanovení pevnosti v tlaku. Pro zkoušení byly připraveny směsi vždy s 3 % a 5 % hm. zastoupením pojiva. Pro každou zkoušku byla zhotovena sada 3 zkušebních těles,

kteře zřály v komoře bez ztráty vlhkosti po dobu 28 dnů. Po této době byla tělesa vyzkoušena.

Výsledné třídy pevnosti směsí a průměrné dosažené pevnosti jsou zobrazeny níže:

- |                                   |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| • $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM 42,5 R | $C_{1,5/2,0}$ ; $R_c = 2,58$ MPa |
| • $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % CEM 42,5 R | $C_{1,5/2,0}$ ; $R_c = 2,80$ MPa |
| • $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % STR        | Nelze klasifikovat; $R_c = 0,44$ |
| • $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % STR        | $C_{0,4/0,5}$ ; $R_c = 0,66$ MPa |
| • $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM ODP    | $C_{0,4/0,5}$ ; $R_c = 0,98$ MPa |
| • $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % CEM ODP    | $C_{0,8/1,0}$ ; $R_c = 1,37$ MPa |

Z výsledků je patrné, že směsi se zastoupením cementu vyšly velmi dobře, přičemž výsledné pevnosti v tlaku je umožňují použít dokonce pro spodní podkladní vrstvy vozovky pozemních komunikací. Pro použití do aktivní zóny by směs vyhověla pravděpodobně i s nižším procentuálním zastoupením cementu 42,5 R. Takové směsi by bylo vhodné laboratorně vyzkoušet. Ostatní směsi jsou svými pevnostmi vyhovující pro použití do podloží vozovky, a proto rozhodujícím faktorem bylo stanovení namrzavosti zemin.

Namrzavost směsného recyklátu byla prvně ověřena Scheibleho kritériem. Touto nepřímou metodou byl směsný recyklát, vzhledem k vyššímu obsahu jemných částic, zařazen do kategorie namrzavý. Po stanovení nepřímou metodou byla od každé směsi zhotovena 2 tělesa pro stanovení namrzavosti metodou přímou. Z výsledků je patrné, že směsný recyklát s portlandským cementem 42,5 R a cementářskými odprašky byl klasifikován jako nenamrzavý, kdy byl během namrzání zaznamenán nulový mrazový zdvih. To byl významný rozdíl oproti směsnému recyklátu s vysokopecní struskou, kde byl během namrzání zaznamenán mrazový zdvih 5,3 mm – 7,79 mm. Výsledný součinitel  $\beta$  byl pro obě směsi podobný, konkrétně 0,27 pro směs s 3 % hm. zastoupením vysokopecní strusky a 0,34 pro směs s 5 % hm. zastoupením vysokopecní strusky. To směs řadí do kategorie mírně namrzavé až namrzavé. Výsledek ukazuje, že přidání vysokopecní strusky namrzavost směsného recyklátu nijak nezlepšilo. Z toho důvodu není vhodné, aby byl směsný recyklát s vysokopecní struskou používán pro budování aktivní zóny. Doplněním zkoušky namrzavosti zemin bylo stanovení odolnosti kameniva proti zmrazování a rozmrazování. Zde byl na frakci kameniva 8/16 zjištěn procentní úbytek hmotnosti  $F = 27,52$  %. To lze vzhledem k povaze materiálu, kde je obsaženo vyšší množství cihelných a pórovitých střeptů s vysokou nasákavostí, očekávaný výsledek.

Poslední laboratorní zkouškou bylo experimentální stanovení modulu pružnosti pomocí cyklické triaxiální zkoušky. K této zkoušce byly vybrány směsi s 3 % hm. zastoupením pojiva. Výsledky byly nadmíru dobré, kde při komorovém tlaku 50 kPa, který simuluje napětí v podloží

vozovky, vyšly vysoké hodnoty modulu pružnosti. Nejlepší modul pružnosti  $E_r = 373$  MPa byl stanoven u směsi s portlandským cementem 42,5 R. Srovnatelně vysoký modul pružnosti vyšel také u směsi s cementářskými odprašky, a to  $E_r = 359$  MPa. U směsi s vysokopecní struskou byl naměřený modul pružnosti  $E_r = 237$  MPa.

Závěr praktické části byl věnován ekonomickému zhodnocení zkoušených směsí při použití do podloží vozovky. Při stanovení průměrných cen za materiál bylo výsledkem zjištění, že při použití směsi s portlandským cementem 42,5 R bude cena téměř identická jako při použití šterku s příměsí jemnozrné zeminy, který se běžně používá pro budování aktivní zóny. Zde by bylo použití směsného recyklátu těžko odůvodnitelné, jelikož při stejné cenové hladině se většina investorů rozhodne pro již ověřený materiál. Lépe odůvodnit lze použití směsného recyklátu s cementářskými odprašky. Hlavní rozdíl vytváří cena pojiva, kdy cementářské odprašky lze koupit za velmi nízkou cenu, vzhledem k tomu, že se jedná také o odpadní materiál. Cenový rozdíl na vzorovém úseku komunikace S 9,5 délky 1 000 m vyšel 880 000 Kč bez DPH za materiál, což by mohlo být v době, kdy vítězí cena, hlavním důvodem pro použití této směsi.

Vzhledem k překvapivým výsledkům experimentální cyklické triaxiální zkoušky byla nejlepší směs,  $R_{C+B} 0/32 + 3\% \text{ CEM } 42,5 \text{ R}$ , navržena do konstrukce vozovky jako náhrada spodní podkladní vrstvy. Možnost využití byla ověřována programem LayEps. Vzhledem k tomu, že zjištěné moduly pružnosti lze brát jako orientační, byla do výpočtu zahrnuta hodnota naměřená při komorovém tlaku 50 kPa a tedy  $E_r = 373$  MPa. Tato směs nahradila ve dvou skladbách šterkodrtí ŠD<sub>A</sub> a ve dvou skladbách šterkodrtí ŠD<sub>B</sub>. U všech ověřovaných skladeb vozovky s třídou zatížení IV a V bylo výpočtem zjištěno, že  $R_{C+B} 0/32 + 3\% \text{ CEM } 42,5 \text{ R}$  může při zachování tloušťky vrstvy tvořit plnohodnotnou náhradu za spodní podkladní vrstvu těchto méně zatížených pozemních komunikací. Využití navržené směsi bylo zhodnoceno také ekonomicky obdobně jako v podloží vozovky. Při nahrazení spodní podkladní vrstvy ŠD<sub>A</sub> byla úspora přibližně 622 000 Kč - 648 000 Kč bez DPH za materiál. V případě náhrady ŠD<sub>B</sub> byla úspora přibližně 386 000 Kč bez DPH za materiál.

Z naměřených výsledků lze konstatovat, že směsný recyklát stmelený cementem a cementářskými odprašky může svou kvalitou nahradit běžně užívané materiály do podloží vozovek pozemních komunikací. Důležité je najít pro takový materiál využití. V případě těchto směsí se může jednat o využití do aktivní zóny pozemních komunikací III. třídy, kde je dopravní zatížení relativně nízké. Výhodou při použití do těchto komunikací může být také jejich dostupnost k recyklačnímu centru, z čehož vzniká hlavní výhoda recyklovaných materiálů, a to je jejich cena. Při dopravě na delší vzdálenosti se cena zvyšuje a většina investorů využije raději

běžně užívané a ověřené materiály. Nemusí se však jednat pouze o komunikace III. Třídy. Uplatnění lze nalézt například při výstavbě parkovacích nebo odstavných ploch, kde jsou běžně využívány kvalitní materiály, které lze uplatnit při výstavbě významnějších komunikací. Napomocť využívání recyklátů může zajištění kvalitního zpracování SDO, z čehož plyne výroba kvalitních recyklovaných stavebních materiálů. Věřím, že obavy z použití těchto materiálů mohou být prolomeny jejich testováním a monitoringem na zkušebních úsecích. Vhodným opatřením, jak zvýšit využitelnost recyklovaných materiálů při výstavbě pozemních komunikací je také možnost vytvořit předpisy, které budou klást povinnost na využití určitého množství recyklovaných materiálů při výstavbě, jako je tomu ve vyspělých evropských zemích.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Stavební a demoliční odpady. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/stavebni\\_demolicni\\_odpady](https://www.mzp.cz/cz/stavebni_demolicni_odpady)
- [2] Analýza současného stavu vybraných komodit druhotných surovin a jejich zdrojů včetně vize rozvoje daného odvětví: Podklad pro aktualizaci Politiky druhotných surovin České republiky. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Prosinec 2018. Praha, 2018. Dostupné také z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/politika-druhotnych-surovin-cr/2019/8/Analyza\\_materialove-toky\\_PDS-CR.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/politika-druhotnych-surovin-cr/2019/8/Analyza_materialove-toky_PDS-CR.pdf)
- [3] *Produkce, využití a odstranění odpadu a produkce druhotných surovin v roce 2018* [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/98121450/280029-19.pdf/a732554f-bc8f-431a-b41b-acd9b89b1f8a?version=1.0>
- [4] *Produkce odpadů* [online]. Český statistický úřad, 2018 [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/index.jsf?page=vystup-objekt&pvo=ZPR05&z=T&f=TABULKA&katalog=30842&str=v86>
- [5] BROŽOVÁ, Lucie a Kamila KUNTOVÁ. *Recyklace stavebního demoličního odpadu a jeho využití u pozemních staveb* [online]. 2016, 32-54 [cit. 2021-01-04]. DOI: <https://doi.org/10.14311/bit.2016.02.05>. ISSN 2570-7434.
- [6] Katalog odpadů. *Enviweb* [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/katalog/?id=791>
- [7] *Metodický návod odboru odpadů Ministerstva životního prostředí pro řízení vzniku stavebních a demoličních odpadů a pro nakládání s nimi*. Srpen 2018. Praha. Dostupné také z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodika\\_stavebni\\_odpady/\\$FILE/OODP-metodicky\\_navod\\_SDO-20180904.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodika_stavebni_odpady/$FILE/OODP-metodicky_navod_SDO-20180904.pdf)
- [8] Nakládání se stavebními a demoličními odpady – Recykláty. *Inisoft* [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://www.inisoft.cz/poradenstvi-a-skoleni/odborne-clanky/zpravodaj/nakladani-se-stavebnimi-a-demolicnimi-odpady-recyklaty>
- [9] ZAJÍČEK, Jan. Použití recyklovaných materiálů při výstavbě vozovek [přednáška]. 21. května 2019. Dostupné z: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:EFJZhjRjNfEJ:https://www.>

spucr.cz/frontend/webroot/uploads/files/2019/06/recyklace\_materialy9264.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz

- [10] Katalog výrobků a materiálů s obsahem druhotných surovin pro použití ve stavebnictví. *Česká agentura pro standardizaci* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <https://www.agentura-cas.cz/sites/default/files/public/download/katalog%20druhotn%c3%a9%20suroviny.pdf>
- [11] ŠKOPÁN, M. *Recyklace SDO v ČR – úspěchy i bariéry* In: Sborník konference RECYCLING 2019: Recyklace a využití stavebních odpadů jako druhotných surovin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 4.-5.4.2019, s. 9-14, ISBN 978-80-214-5728-7.
- [12] TP 210, *Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací*. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, obor pozemních komunikací, 2011.
- [13] ŠKOPÁN, M. *Recyklace stavebních materiálů v ČR – stav, šance, rizika* In: Sborník konference RECYCLING 2018: Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 19.-20.4.2018, s. 12-17, ISBN 978-80-214-5602-0.
- [14] Protokol EU o nakládání se stavebními a demoličními odpady. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2016 [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/stavebnictvi-a-suroviny/strategicke-dokumenty-pro-udrzitelne-stavebnictvi/2018/11/Protocol-Ares\\_2016\\_5840668-101016\\_Cze.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/stavebnictvi-a-suroviny/strategicke-dokumenty-pro-udrzitelne-stavebnictvi/2018/11/Protocol-Ares_2016_5840668-101016_Cze.pdf)
- [15] *ARSM: Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice* [online]. [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <http://www.arsm.cz/>
- [16] Charakteristika stavby a technologie. In: *Is.mendelu.cz* [online]. [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=2210](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=2210)
- [17] 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.
- [18] TURČINEK, Andrej. *Mobilní zařízení pro drcení 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.
- [19] 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 knižnice. ISBN 978-80-87438-59-6.

- [20] KRUTIL, K. Posuzování shody výrobků ze stavebních a demoličních odpadů. In: *Sborník RECYCLING* [online]. 2005 [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: [http://www.arasm.cz/dok/sbor\\_rec\\_2005/035\\_Krutil.pdf](http://www.arasm.cz/dok/sbor_rec_2005/035_Krutil.pdf)
- [21] Současné perspektivy a potenciál recyklace stavebních a demoličních materiálů. *Lomy a Těžba* [online]. 19.2. 2013 [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <https://www.lomyatezba.cz/2012/2012-1/item/207-soucasne-perspektivy-a-potencial-recyklace-stavebnich-a-demolicnich-materialu>
- [22] NOVOTNÝ, Bohumil. *Hodnocení kvality a možnosti využití stavebních recyklátů*. Brno, 2001. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [23] ČSN 73 6133. *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Únor 2010.
- [24] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II - Modul 1 - Zeminy, zemní práce*. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, 2005.
- [25] DUFONEV R. C. *Akciová společnost* [online]. [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <http://www.dufonev.cz/index.php>
- [26] STEHLÍK, Dušan. Stavební a demoliční odpad v konstrukci pozemních komunikací. *Časopis stavebnictví* [online]. 09.2008 [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-stavebni-a-demolicni-odpad-v-konstrukci-pozemnich-komunikaci.html>
- [27] Dodatek TP 170, *Navrhování vozovek pozemních komunikací*, Ministerstvo dopravy ČR 2010
- [28] VRBÍK, Ondřej a Vladimíra VYTLAČILOVÁ. Limitní hodnoty při posouzení enviromentálních rizik recyklovaného kameniva. In: *Sborník RECYCLING 2013 Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin*. 21.-22.3. Brno: Vysoké učení technické v Brně, s. 17-24. ISBN 978-80-214-4688-5.
- [29] NEHYBOVÁ, Eva. *Namrzavost směsných recyklátů v podloží vozovek pozemních komunikací*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
- [30] LI, Youyun, et al. *Investigation into the Application of Construction and Demolition Waste in Urban Roads. Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
- [31] ZHANG, Junhui, Le DING, Feng LI a Junhui PENG. *Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in China* [online]. 24.1.2020 [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120223](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120223)

- [32] LIU Lulu, Zhe LI, Guojun CAI, Xiaoyan LIU a Shihao YAN. *Humidity field characteristics in road embankment constructed with recycled construction wastes* [online]. 8.3.2020 [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120977>
- [33] *Resource Efficient Use of Mixed Wastes: Improving management of construction and demolition waste*. In: . Deloitte, 2017. Dostupné také z: [https://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/CDW\\_Final\\_Report.pdf](https://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/CDW_Final_Report.pdf)
- [34] DEL REY, Isaac, Jesús AYUSO, Adela P. GALVÍN, José R. JIMÉNEZ a Auxi BARBUDO. *Feasibility of Using Unbound Mixed Recycled Aggregates from CDW over Expansive Clay Subgrade in Unpaved Rural Roads* [online]. 17.11.2016 [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: doi:[doi:10.3390/ma9110931](https://doi.org/10.3390/ma9110931)
- [35] 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.
- [36] Vieira, C.S., Pereira, P.M., Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. *Resour Conserv Recy* [online]. 2015. [cit. 2021-01-09]. , Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.023>
- [37] 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/>
- [38] STEHLÍK, Dušan. Recyklované stavební materiály pro stavby dopravní infrastruktury. *Ekomagazín* [online]. 03/2019 [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <https://www.ekomagazin.sk/clanky/1116/recyklovane-stavebni-materialy-pro-stavby-dopravni-infrastruktury>
- [39] VÝBORNÝ, Jaroslav, Hana HANZLOVÁ, Vladimíra VYTLAČILOVÁ a Jan VODIČKA. Vlákno-beton vyrobený z recyklátu ze stavebního a demoličního odpadu. In: *Časopis BETON*. 2010, s. 107-111.
- [40] RÁČEK, Václav a Jan VODIČKA. Vlákno-beton jako konstrukční materiál s betonovým recyklátem. *Tzbinfo* [online]. 28.11.2016 [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/15014-vlaknobeton-jako-konstrukcni-material-s-betonovym-recyklatem>
- [41] ČSN EN ISO 17892-4: *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti*. 2017.

- [42] ČSN EN 13286-2: *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [43] ČSN EN 13286-41: *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [44] ČSN EN 13286-50: *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 50: Metody pro výrobu zkušebních těles pomocí Proctorova zařízení nebo vibračního stolu*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [45] ČSN EN 13286-42: *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 42: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v příčném tahu směsí stmelených hydraulickými pojivy*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [46] ČSN 72 1191. *Zkoušení míry namrzavosti zemin*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [47] ČSN EN 1367-1: *Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání – část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování*. Praha: Český normalizační institut, 2007
- [48] ČSN EN 13286-7: *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 7: Zkouška nestmelených směsí cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 – Měrná produkce recyklátů vůči těžbě kamene a štěrkopísků [2].....	16
Tabulka 2.2 – Oblast použití jednotlivých typů RSM dle podílu základního materiálu [12] .....	22
Tabulka 2.3 - Srovnání prodejních cen jednotlivých materiálů.....	25
Tabulka 2.4 - Použití směsného recyklátu v konstrukci vozovky [22] .....	26
Tabulka 2.5 - Použitelnost zemin pro výstavbu zemního tělesa [23].....	28
Tabulka 2.6 - Požadované hodnoty únosnosti CBR pro upravené zeminy v aktivní zóně [23] ...	30
Tabulka 2.7 - Určení typu podloží v závislosti na hodnotě CBR a zatřídění zeminy podloží [27]	31
Tabulka 2.8 - Stanovení návrhového modulu pružnosti dle hodnot CBR [27].....	32
Tabulka 2.9 - Stanovení návrhového modulu pružnosti ze zatřídění zemin [27].....	32
Tabulka 2.10 - Orientační hodnoty návrhového modulu pružnosti nestmelených vrstev [26] ..	33
Tabulka 2.11 - Kritérium míry namrzavosti [19] .....	36
Tabulka 2.12 - Srovnání legislativních limitů pro obsah škodlivých látek v ČR a zahraničí [28]..	37
Tabulka 3.1 - Tabulka zrnitosti směsného recyklátu 0/32, první měření.....	50
Tabulka 3.2 - Tabulka zrnitosti směsného recyklátu 0/32, druhé měření .....	51
Tabulka 3.3 - Rozměry nových forem [42] .....	52
Tabulka 3.4 - Hlavní požadavky na nové pěchy [42] .....	52
Tabulka 3.5 - Vyhodnocení výsledků – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM 42,5 R .....	57
Tabulka 3.6 - Vyhodnocení výsledků – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % CEM 42,5 R .....	58
Tabulka 3.7 - Pevnost v tlaku – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM 42,5 R.....	62
Tabulka 3.8 - Pevnost v tlaku – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % CEM 42,5 R.....	63
Tabulka 3.9 - Pevnost v tlaku – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % STR .....	64
Tabulka 3.10 - Pevnost v tlaku – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % STR .....	65
Tabulka 3.11 - Pevnost v tlaku – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM ODP.....	66
Tabulka 3.12 - Pevnost v tlaku – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % CEM ODP .....	67
Tabulka 3.13 - Shrnutí výsledků pevnosti v tlaku.....	68
Tabulka 3.14 - Pevnost v příčném tahu – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM 42,5 R .....	72
Tabulka 3.15 - Pevnost v příčném tahu – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % CEM 42,5 R .....	73
Tabulka 3.16 - Pevnost v příčném tahu – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % STR.....	74
Tabulka 3.17 - Pevnost v příčném tahu – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % STR.....	75
Tabulka 3.18 - Pevnost v příčném tahu – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM ODP .....	76
Tabulka 3.19 - Pevnost v příčném tahu – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % CEM ODP .....	77

Tabulka 3.20 - Shrnutí výsledků pevnosti v příčném tahu .....	78
Tabulka 3.21 - Výsledky zkoušky namrzavosti těles s cementem .....	82
Tabulka 3.22 - Výsledky zkoušky namrzavosti těles s vysokopecní struskou.....	84
Tabulka 3.23 - Výsledky zkoušky namrzavosti těles s cementářskými odprašky.....	85
Tabulka 3.24 - Aplikované kroky zatěžování.....	90
Tabulka 3.25 - Výsledné hodnoty $E_r - R_{C+B} 0/32 + 3 \% \text{ CEM } 42,5 \text{ R}$ .....	92
Tabulka 3.26 - Výsledné hodnoty $E_r - R_{C+B} 0/32 + 3 \% \text{ STR}$ .....	93
Tabulka 3.27 - Výsledné hodnoty $E_r - R_{C+B} 0/32 + 3 \% \text{ CEM ODP}$ .....	94
Tabulka 3.28 - Cenové zhodnocení směsí při použití do aktivní zóny.....	95
Tabulka 3.29 - Posouzení skladby D1-N-1 pro TDZ IV s alternativním návrhem.....	97
Tabulka 3.30 - Posouzení skladby D1-N-8 pro TDZ IV s alternativním návrhem.....	97
Tabulka 3.31 - Posouzení skladby D1-N-1 pro TDZ V s alternativním návrhem.....	98
Tabulka 3.32 - Posouzení skladby D1-N-8 pro TDZ V s alternativním návrhem.....	98
Tabulka 3.33 - Orientační ceny $\check{S}D_A$ a $\check{S}D_B$ .....	99
Tabulka 3.34 - Cenové zhodnocení směsí při použití do spodní podkladní vrstvy .....	99

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 2.1 - Podíl SDO z celkové produkce odpadů za rok 2008-2018 [4] .....	13
Graf 2.2 – Poměr produkce recyklátů k produkci přírodního kameniva a štěrkopísků [2] .....	16
Graf 3.1 - Křivka zrnitosti směsného recyklátu 0/32, první měření .....	50
Graf 3.2 - Křivka zrnitosti směsného recyklátu 0/32, druhé měření.....	51
Graf 3.3 - Proctorova křivka – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM 42,5 R.....	57
Graf 3.4 - Proctorova křivka – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % CEM 42,5 R.....	58
Graf 3.5 – Graf pevnosti v tlaku – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM 42,5 R.....	62
Graf 3.6 – Graf pevnosti v tlaku – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % CEM 42,5 R.....	63
Graf 3.7 – Graf pevnosti v tlaku – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % STR .....	64
Graf 3.8 – Graf pevnosti v tlaku – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % STR .....	65
Graf 3.9 – Graf pevnosti v tlaku – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM ODP .....	66
Graf 3.10 – Graf pevnosti v tlaku – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % CEM ODP .....	67
Graf 3.11 – Grafické srovnání výsledků pevnosti v tlaku .....	68
Graf 3.12 – Graf pevnosti v příčném tahu – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM 42,5 R .....	72
Graf 3.13 – Graf pevnosti v příčném tahu – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % CEM 42,5 R .....	73
Graf 3.14 – Graf pevnosti v příčném tahu – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % STR.....	74
Graf 3.15 – Graf pevnosti v příčném tahu – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % STR.....	75
Graf 3.16 – Graf pevnosti v příčném tahu – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM ODP .....	76
Graf 3.17 – Graf pevnosti v příčném tahu – $R_{C+B}$ 0/32 + 5 % CEM ODP .....	77
Graf 3.18 – Grafické srovnání výsledků pevnosti v příčném tahu.....	78
Graf 3.19 - Scheibleho kritérium – $R_{C+B}$ 0/32, křivka zrnitosti první měření .....	81
Graf 3.20 - Scheibleho kritérium – $R_{C+B}$ 0/32, křivka zrnitosti druhé měření.....	81
Graf 3.21 - Grafické znázornění mrazových zdvihů těles s vysokopecní struskou.....	84
Graf 3.22 - Graf výsledných hodnot $E_r$ – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM 42,5 R.....	92
Graf 3.23 - Graf výsledných hodnot $E_r$ – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % STR.....	93
Graf 3.24 - Graf výsledných hodnot $E_r$ – $R_{C+B}$ 0/32 + 3 % CEM ODP .....	94



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 - Technologické schéma uspořádání recyklačního střediska [2].....	18
Obrázek 2.2 - Schéma čelistového drtiče [19] .....	19
Obrázek 2.3 - Schéma odrazového drtiče [19].....	20
Obrázek 2.4 - Schéma kuželového drtiče [19] .....	20
Obrázek 2.5 - Příčný řez zemním tělesem pozemní komunikace [24] .....	26
Obrázek 2.6 - Schéma vozovky na zemním tělese a umístění konstrukčních vrstev [19].....	27
Obrázek 2.7 - Sada zkušebních sít [19] .....	34
Obrázek 2.8 - Příklady různých čar zrnitosti [19] .....	34
Obrázek 2.9 - Výsledný graf Proctorovy zkoušky standard a modifikované [19].....	35
Obrázek 2.10 - Zkouška CBR [19] .....	36
Obrázek 2.11 - Zakřivení povrchu nezamrzlé vody [29].....	39
Obrázek 2.12 - Schéma vedení městského okruhu Sanhuan road in Xi'an [30] .....	41
Obrázek 2.13 - Hotová silnice Sanhuan road in Xi'an [29].....	41
Obrázek 2.14 - Hotová nezpevněná silnice [33].....	43
Obrázek 2.15 - Zemní hráz s využitím vláknobetonových desek [40] .....	46
Obrázek 3.1 - Směsný recyklát 0/32.....	48
Obrázek 3.2 – Pojiva použité pro zhotovení směsí; zleva: cementářské odprašky, portlandský cement 32,5 R, vysokopecní struska .....	48
Obrázek 3.3 - Horkovzdušná sušárna a sada zkušebních sít .....	49
Obrázek 3.4 - Směsný recyklát 0/32 po prosévání.....	49
Obrázek 3.5 - Schéma formy a pěchu [42].....	52
Obrázek 3.6 - Schéma principu Proctorovy modifikované zkoušky [19].....	53
Obrázek 3.7 – Sestavená forma .....	54
Obrázek 3.8 - Hutnící zařízení .....	54
Obrázek 3.9 - Připravené směsi; vlevo bez přivlhčení; vpravo hotová směs .....	54
Obrázek 3.10 - Zhutněný vzorek ve formě.....	55
Obrázek 3.11 - Zhutněný vzorek vyjmutý z formy .....	55
Obrázek 3.12 - Váženky se zeminou k sušení do ustálené hmotnosti .....	55
Obrázek 3.13 - Příklad uspokojivého porušení zkušebních válcových těles [43] .....	59
Obrázek 3.14 - Hutnění vzorku .....	60
Obrázek 3.15 - Vyjímání vzorku z formy .....	60

Obrázek 3.16 - Zhutněný vzorek ve formě.....	60
Obrázek 3.17 - Vyjmutá zkušební tělesa .....	60
Obrázek 3.18 - Zrání zkušebních těles .....	61
Obrázek 3.19 - Umístění zkušebního tělesa v lisu.....	61
Obrázek 3.20 - Zkoušení vzorku .....	61
Obrázek 3.21 – Vzorky po zkoušce v tlaku – $R_{C+B} 0/32 + 3 \% \text{ CEM } 42,5 \text{ R}$ .....	62
Obrázek 3.22 – Vzorky po zkoušce v tlaku – $R_{C+B} 0/32 + 5 \% \text{ CEM } 42,5 \text{ R}$ .....	63
Obrázek 3.23 – Vzorky po zkoušce v tlaku – $R_{C+B} 0/32 + 3 \% \text{ STR}$ .....	64
Obrázek 3.24 – Vzorky po zkoušce v tlaku – $R_{C+B} 0/32 + 5 \% \text{ STR}$ .....	65
Obrázek 3.25 – Vzorky po zkoušce v tlaku – $R_{C+B} 0/32 + 3 \% \text{ CEM ODP}$ .....	66
Obrázek 3.26 – Vzorky po zkoušce v tlaku – $R_{C+B} 0/32 + 5 \% \text{ CEM ODP}$ .....	67
Obrázek 3.27 - Schéma podstaty zkoušky v příčném tahu [45] .....	69
Obrázek 3.28 - Uložení zkušebních těles v komoře .....	70
Obrázek 3.29 - Připravená zkušební tělesa ke zkoušce v příčném tahu .....	70
Obrázek 3.30 - Uložení zkušebního tělesa při zkoušce v příčném tahu.....	70
Obrázek 3.31 - Těleso po zkoušce v příčném tahu.....	71
Obrázek 3.32 - Deformovaný vzorek po zkoušce v příčném tahu .....	71
Obrázek 3.33 – Vzorky po zkoušce pevnosti v příčném tahu – $R_{C+B} 0/32 + 3 \% \text{ CEM } 42,5 \text{ R}$ .....	72
Obrázek 3.34 - Vzorky po zkoušce pevnosti v příčném tahu – $R_{C+B} 0/32 + 5 \% \text{ CEM } 42,5 \text{ R}$ .....	73
Obrázek 3.35 - Vzorky po zkoušce pevnosti v příčném tahu – $R_{C+B} 0/32 + 3 \% \text{ STR}$ .....	74
Obrázek 3.36 - Vzorky po zkoušce pevnosti v příčném tahu – $R_{C+B} 0/32 + 5 \% \text{ STR}$ .....	75
Obrázek 3.37 - Vzorky po zkoušce pevnosti v příčném tahu – $R_{C+B} 0/32 + 3 \% \text{ CEM ODP}$ .....	76
Obrázek 3.38 - Vzorky po zkoušce pevnosti v příčném tahu – $R_{C+B} 0/32 + 5 \% \text{ CEM ODP}$ .....	77
Obrázek 3.39 - Schéma zkušební buňky [19] .....	80
Obrázek 3.40 - Chladicí skříň .....	80
Obrázek 3.41 - Tělesa připravena ke zkoušení.....	80
Obrázek 3.42 - Tělesa před zkouškou.....	82
Obrázek 3.43 - Tělesa po zkoušce.....	82
Obrázek 3.44 - Tělesa po zkoušce; zleva: s 3 % CEM 32,5 R, s 5 % CEM 42,5 R.....	82
Obrázek 3.45 - Tělesa s vysokopecní struskou před zkouškou .....	83
Obrázek 3.46 - Těleso porušené mrazovým zdvihem uložené ve zkušební buňce.....	83
Obrázek 3.47 - Tělesa po zkoušce; zleva: s 3 % STR, s 5 % STR.....	83
Obrázek 3.48 - Tělesa s cementářskými odprašky před zkouškou.....	85

Obrázek 3.49 - Tělesa po zkoušce; zleva: s 3 % CEM ODP, s 5 % CEM ODP .....	85
Obrázek 3.50 - Navážka před vysušením.....	86
Obrázek 3.51 - Dílčí navážky připravené k měření.....	86
Obrázek 3.52 - Kamenivo po zkoušce odolnosti proti mrazu; vpravo na fotce propad sítem 4 mm .....	87
Obrázek 3.53 - Schéma triaxiálního přístroje [19] .....	88
Obrázek 3.54 - Připravený triaxiální přístroj k měření.....	89
Obrázek 3.55 - Připravené vzorky k měření modulu pružnosti.....	90
Obrázek 3.56 - Schéma komunikace S 9,5 s umístěním aktivní zóny.....	95
Obrázek 3.57 - Schéma komunikace S 9,5 s umístěním spodní podkladní vrstvy .....	99

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

SDO	stavební a demoliční odpad
ČSÚ	český statistický úřad
RSM	recyklovaný stavební materiál
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 <sup>3</sup> /kg) podle ČSN EN 933-11 – plovoucí dřevo, polystyrén, apod.
V <sub>FL</sub>	objem plovoucích částic
AB	asfaltové (asfaltobetonové) vrstvy
CB	cementobetonový kryt
NV	nestmelená vrstva
MZK	mechanicky zpevněné kamenivo podle ČSN EN 13285
ŠD <sub>A</sub>	šterkodrt podle ČSN EN 13285, kvalitativní kategorie A
ŠD <sub>B</sub>	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	šterkopísek
SR	směsný recyklát
PK	pozemní komunikace
ML	hlína s nízkou plasticitou
MI	hlína se střední plasticitou
MH	hlína s vysokou plasticitou

MV	hlína s velmi vysokou plasticitou
CL	jíl s nízkou plasticitou
CI	jíl se střední plasticitou
CH	jíl s vysokou plasticitou
CV	jíl s velmi vysokou plasticitou
S-F	písek s příměsí jemnozrnné zeminy
MG	šterkovitá hlína
CG	šterkovitý jíl
MS	píščitá hlína
CS	píščitý jíl
SP	písek špatně zrněný
SM	písek hlinitý
SC	písek jílovitý
GP	šterk špatně zrněný
GM	šterk hlinitý
GC	šterk jílovitý
SW	písek dobře zrněný
GW	šterk dobře zrněný
G-F	šterk s příměsí jemnozrnné zeminy
$W_l$	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
$d_{15}$	velikost zrna odpovídající na čáře zrnitosti propadu 15 %
$d_{85}$	velikost zrna odpovídající na čáře zrnitosti propadu 85 %
$E_d$	návrhový modul pružnosti
$E_{def}$	minimální kontrolní modul přetvárnosti
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
$w_{\text{opt}}$	optimální vlhkost stanovená zkouškou Proctor standard
$\Delta h$	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, fenanthrenu, chrysenu, indeno(1,2,3 cd)pyrenu)
PCB	polychlorované bifenyly
CAT	Dánská klasifikace recyklovaných materiálů
EU	evropská unie
TAČR	technologická agentura České republiky
$R_{C+B}$	směsný recyklát (cihla + beton)
CEM	cement
STR	vysokopecní struska
CEM ODP	cementářské odprašky

# PŘÍLOHY

## STANOVENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI DLE ČSN 72 1191

**Provedl:** Daniel Masař  
**Místo:** Laboratoř ústavu pozemních komunikací, FAST VUT v Brně  
**Datum:** 7. 12. – 14. 12. 2020  
**Vzorek:** Směsný recyklát 0/32 + 3 % STR  
 Směsný recyklát 0/32 + 5 % STR  
**Počet zk. vzorků:** 4  
**Doba saturace:** 17 hodin  
**Doba namrzání:** 120 hodin  
**Naměřené hodnoty:**

čas [hod]	Im	$\sqrt{Im}$	mrazové zdvihy				součinitel namrzavosti $\beta$			
			3 % struska		5 % struska		3 % struska		5 % struska	
			h1	h2	h3	h4	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
1	4	2,00	0,00	0,00	0,78	-0,01	0,00	-	0,17	0,00
2	8	2,83	0,00	-	0,91	0,00	0,05	-	0,20	0,05
3	12	3,46	0,03	-	1,04	0,03	0,27	-	0,27	0,27
4	16	4,00	0,18	0,20	1,18	0,17	0,38	-	0,24	0,36
5	20	4,47	0,36	-	1,30	0,34	0,49	-	0,27	0,46
6	24	4,90	0,57	-	1,41	0,54	0,20	-	0,26	0,31
7	28	5,29	0,64	-	1,52	0,66	0,21	-	0,33	0,34
8	32	5,66	0,72	-	1,64	0,79	0,32	-	0,34	0,44
9	36	6,00	0,83	0,60	1,75	0,94	0,26	-	0,40	0,35
10	40	6,32	0,92	-	1,88	1,05	0,31	-	0,41	0,39
11	44	6,63	1,01	-	2,01	1,17	0,28	-	0,40	0,42
12	48	6,93	1,09	-	2,12	1,30	0,32	-	0,39	0,43
13	52	7,21	1,18	-	2,23	1,42	0,34	-	0,42	0,50
14	56	7,48	1,28	-	2,35	1,56	0,34	-	0,43	0,47
15	60	7,75	1,37	-	2,46	1,68	0,34	-	0,41	0,48
16	64	8,00	1,45	-	2,57	1,80	0,39	-	0,38	0,47
17	68	8,25	1,55	-	2,66	1,92	0,36	-	0,36	0,48
18	72	8,49	1,64	-	2,74	2,03	0,39	-	0,35	0,44
19	76	8,72	1,73	-	2,83	2,14	0,36	-	0,32	0,39
20	80	8,94	1,81	-	2,90	2,22	0,41	-	0,44	0,42
21	84	9,17	1,90	-	2,99	2,32	0,39	-	0,39	0,41
22	88	9,38	1,98	-	3,08	2,41	0,39	-	0,34	0,39
23	92	9,59	2,07	-	3,15	2,49	0,33	-	0,34	0,41
24	96	9,80	2,13	-	3,22	2,57	0,36	-	0,39	0,44
25	100	10,00	2,21	2,25	3,30	2,66	0,51	-	0,45	0,49
26	104	10,20	2,31	-	3,39	2,76	0,42	-	0,38	0,45
27	108	10,39	2,39	-	3,46	2,85	0,42	-	0,39	0,45

28	112	10,58	2,47	-	3,54	2,93	0,36	-	0,36	0,45
29	116	10,77	2,54	-	3,60	3,02	0,36	-	0,33	0,41
30	120	10,95	2,60	2,63	3,66	3,09	0,36	-	0,29	0,34
31	124	11,14	2,67	-	3,72	3,15	0,36	-	0,31	0,37
32	128	11,31	2,73	-	3,77	3,22	0,40	-	0,34	0,43
33	132	11,49	2,80	-	3,83	3,29	0,31	-	0,26	0,35
34	136	11,66	2,86	-	3,88	3,35	0,27	-	0,21	0,27
35	140	11,83	2,90	2,92	3,91	3,40	0,29	-	0,26	0,32
36	144	12,00	2,95	-	3,95	3,45	0,35	-	0,30	0,39
37	148	12,17	3,01	-	4,00	3,52	0,33	-	0,34	0,35
38	152	12,33	3,06	-	4,06	3,58	0,34	-	0,30	0,40
39	156	12,49	3,12	-	4,11	3,64	0,31	-	0,29	0,38
40	160	12,65	3,17	-	4,15	3,70	0,37	-	0,36	0,40
41	164	12,81	3,23	-	4,21	3,76	0,32	-	0,28	0,37
42	168	12,96	3,28	-	4,25	3,82	0,32	-	0,28	0,40
43	172	13,11	3,32	-	4,30	3,88	0,27	-	0,24	0,31
44	176	13,27	3,37	-	4,33	3,93	0,29	-	0,26	0,33
45	180	13,42	3,41	-	4,37	3,98	0,33	-	0,30	0,35
46	184	13,56	3,46	-	4,42	4,03	0,32	-	0,27	0,36
47	188	13,71	3,50	-	4,46	4,08	0,28	-	0,26	0,39
48	192	13,86	3,54	-	4,50	4,14	0,28	-	0,24	0,38
49	196	14,00	3,58	-	4,53	4,20	0,39	-	0,20	1,21
50	200	14,14	3,64	3,56	4,56	4,37	0,52	-	0,44	0,38
51	204	14,28	3,71	-	4,62	4,42	0,47	-	0,44	0,71
52	208	14,42	3,78	-	4,68	4,52	0,56	-	0,42	0,72
53	212	14,56	3,85	-	4,74	4,62	0,51	-	0,49	0,68
54	216	14,70	3,92	-	4,81	4,71	0,49	-	0,44	0,74
55	220	14,83	3,99	-	4,87	4,81	0,43	-	0,47	0,66
56	224	14,97	4,05	-	4,93	4,90	0,40	-	0,36	0,69
57	228	15,10	4,10	-	4,98	4,99	0,35	-	0,40	0,56
58	232	15,23	4,15	-	5,03	5,07	0,46	-	0,45	0,97
59	236	15,36	4,21	4,23	5,09	5,19	0,44	-	0,35	0,69
60	240	15,49	4,27	-	5,14	5,28	0,39	-	0,36	0,62
61	244	15,62	4,32	-	5,18	5,36	0,31	-	0,35	0,63
62	248	15,75	4,36	-	5,23	5,44	0,34	-	0,34	0,54
63	252	15,87	4,40	-	5,27	5,51	0,29	-	0,37	0,58
64	256	16,00	4,44	-	5,32	5,58	0,35	-	0,31	0,56
65	260	16,12	4,48	-	5,36	5,65	0,24	-	0,24	0,59
66	264	16,25	4,51	-	5,39	5,73	0,23	-	0,29	0,49
67	268	16,37	4,54	-	5,42	5,79	0,25	-	0,23	0,49
68	272	16,49	4,57	-	5,45	5,85	0,22	-	0,21	0,41
69	276	16,61	4,59	-	5,47	5,90	0,28	-	0,24	0,44
70	280	16,73	4,63	-	5,50	5,95	0,20	-	0,22	0,41
71	284	16,85	4,65	-	5,53	6,00	0,21	-	0,14	0,44
72	288	16,97	4,68	-	5,55	6,05	0,17	-	0,21	0,38
73	292	17,09	4,70	4,75	5,57	6,10	0,16	-	0,17	0,43
74	296	17,20	4,71	-	5,59	6,15	0,22	-	0,17	0,43
75	300	17,32	4,74	-	5,61	6,20	0,19	-	0,23	0,42
76	304	17,44	4,76	-	5,64	6,24	0,13	-	0,20	0,42



77	308	17,55	4,78	-	5,66	6,29	0,18	-	0,15	0,43
78	312	17,66	4,80	-	5,68	6,34	0,07	-	0,13	0,37
79	316	17,78	4,80	-	5,69	6,38	0,21	-	0,19	0,31
80	320	17,89	4,83	-	5,71	6,42	0,19	-	0,13	0,40
81	324	18,00	4,85	-	5,73	6,46	0,14	-	0,08	0,32
82	328	18,11	4,86	-	5,74	6,50	0,11	-	0,17	0,26
83	332	18,22	4,88	4,80	5,76	6,53	0,15	-	0,09	0,34
84	336	18,33	4,89	-	5,77	6,56	0,09	-	0,14	0,25
85	340	18,44	4,90	-	5,78	6,59	0,17	-	0,05	0,26
86	344	18,55	4,92	-	5,79	6,62	0,08	-	0,11	0,20
87	348	18,65	4,93	-	5,80	6,64	0,09	-	0,09	0,23
88	352	18,76	4,94	-	5,81	6,66	0,14	-	0,14	0,22
89	356	18,87	4,95	-	5,82	6,69	0,16	-	0,11	0,28
90	360	18,97	4,97	-	5,83	6,72	0,10	-	0,08	0,25
91	364	19,08	4,98	-	5,84	6,74	0,13	-	0,16	0,30
92	368	19,18	4,99	-	5,86	6,78	0,14	-	0,11	0,16
93	372	19,29	5,01	-	5,87	6,79	0,13	-	0,18	0,27
94	376	19,39	5,02	-	5,89	6,82	0,08	-	0,06	0,26
95	380	19,49	5,03	-	5,90	6,85	0,18	-	0,23	0,37
96	384	19,60	5,05	-	5,92	6,89	0,21	-	0,16	0,26
97	388	19,70	5,07	-	5,94	6,91	0,18	-	0,10	0,43
98	392	19,80	5,09	4,84	5,95	6,96	0,74	-	0,02	1,03
99	396	19,90	5,16	-	5,95	7,06	0,30	-	0,22	0,00
100	400	20,00	5,19	-	5,97	7,06	0,28	-	0,20	0,03
101	404	20,10	5,22	-	5,99	7,06	0,25	-	0,25	0,39
102	408	20,20	5,25	-	6,01	7,10	0,19	-	0,24	0,35
103	412	20,30	5,27	5,20	6,04	7,14	0,22	-	0,22	0,39
104	416	20,40	5,29	-	6,06	7,17	0,15	-	0,20	0,44
105	420	20,49	5,30	-	6,08	7,22	0,12	-	0,15	0,39
106	424	20,59	5,31	-	6,09	7,26	0,19	-	0,17	0,46
107	428	20,69	5,33	-	6,11	7,30	0,24	-	0,24	0,50
108	432	20,78	5,36	-	6,13	7,35	0,10	-	0,16	0,33
109	436	20,88	5,37	-	6,15	7,38	0,05	-	0,12	0,26
110	440	20,98	5,37	-	6,16	7,41	0,05	-	-0,04	0,21
111	444	21,07	5,38	-	6,16	7,43	0,11	-	0,18	0,18
112	448	21,17	5,39	-	6,17	7,44	0,18	-	0,16	0,28
113	452	21,26	5,40	-	6,19	7,47	0,20	-	0,20	0,39
114	456	21,35	5,42	-	6,21	7,51	0,25	-	0,16	0,39
115	460	21,45	5,44	-	6,22	7,54	0,30	-	0,29	0,50
116	464	21,54	5,47	-	6,25	7,59	0,25	-	0,31	0,54
117	468	21,63	5,50	-	6,28	7,64	0,36	-	0,43	0,58
118	472	21,73	5,53	-	6,32	7,69	0,29	-	0,25	0,53
119	476	21,82	5,56	-	6,34	7,74	0,24	-	0,27	0,46
120	480	21,91	5,58	5,30	6,37	7,78	0,15	-	0,16	0,09
121	484	22,00	5,59	-	6,38	7,79	-	-	-	-
							<b>0,27</b>	<b>-</b>	<b>0,26</b>	<b>0,41</b>
<b>celkový výsledek součinitele <math>\beta</math></b>							<b>0,27</b>		<b>0,34</b>	