



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI SMĚSNÝCH RECYKLÁTŮ PRO SPODNÍ STAVBU POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

CHARACTERISTICS OF MIXED BUILDING RECYCLATES FOR SUBGRADE OG ROADS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lumír Junek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Lumír Junek
Název	Charakteristické vlastnosti směsných recyklátů pro spodní stavbu pozemních komunikací
Vedoucí práce	doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	V termínech určených časovým harmonogramem akademického roku, nejpozději do jednoho roku od data zadání diplomové práce

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, např. arsm.cz
výzkumné práce řešící podobné téma

odborné a vědecké publikace

on-line informace z internetu

TP 210 Užití recyklovaného demoličního materiálu do pozemních komunikací

ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací

ZÁŠADY PRO VYPRACOVÁNÍ

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

Požadované výstupy:

Úvod se specifikací cílů diplomové práce

Teoretická část zahrnující aktuálně dostupné informace na dané téma.

Zahraníční zkušenosti s využitím směsných recyklátů

Praktická část - popis konkrétních praktických úkonů provedených v diplomové práci (výpočtové modely, laboratorní nebo polní zkoušky, empirické statistické výpočty, apod.)

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

Práce se zabývá využitím směsného stavebního recyklátu pro zemní tělesa pozemních komunikací. Teoretická část popisuje výrobu, využitelnost a ekonomické zhodnocení stavebních recyklátů vůči běžným přírodním materiálům. Následně popisuje potřebné laboratorní zkoušky, které zkoumají jeho vlastnosti pro užití těchto materiálů do pozemních komunikací. V poslední kapitole se práce zabývá zahraničními zkušenostmi s využitím směsných stavebních recyklátů pro dopravní stavby.

Praktická část zkoumá vlastnosti daných recyklátu pro jejich použití do aktivní zóny pomocí zkoušek míry namrzavosti zemin, Kalifornského poměru únosnosti a okamžitého indexu únosnosti.

Klíčová slova

Směsný recyklát, stavební a demoliční recyklát, podloží vozovky, aktivní zóna, Proctorova zkouška, míra namrzavosti zemin, Kalifornský poměr únosnosti, okamžitý index únosnosti

Abstract

The work deals with the use of mixed construction recycled material for earth bodies of roads. The theoretical part describes the production, usability and economic evaluation of recycled building materials against common natural materials. It then describes the necessary laboratory tests that examine its properties for the use of these materials in roads. In the last chapter, the work deals with foreign experience with the use of mixed construction recyclates for transport construction.

The practical part examines the properties of the given recyclates for their use in the core using tests of soil freezing rate, California bearing ratio and immediate bearing index.

Keywords

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

Bibliografická citace

Bc. Lumír Junek *Charakteristické vlastnosti směsných recyklátů pro spodní stavbu pozemních komunikací*. Brno, 2021. 106 s., 9 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 *Charakteristické vlastnosti směsných recyklátů pro spodní stavbu pozemních komunikací* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 15. 1. 2021

Bc. Lumír Junek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Charakteristické vlastnosti směsných recyklátů pro spodní stavbu pozemních komunikací* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 1. 2021

Bc. Lumír Junek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Dušanu Stehlíkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a poskytnutí materiálů při vypracování práce. Současně bych rád poděkoval Pavlu Strakovi z laboratoře ústavu pozemních komunikací za rady a ochotu pomoci při provádění zkoušek. Dále bych rád poděkoval své rodině a blízkým za podporu při studiu.

Obsah

1	Úvod	17
2	Teoretická část	18
2.1	Termíny a definice základních pojmů	18
3	Stavební a demoliční odpad (SDO)	22
3.1	Výroba recyklátů	23
3.2	Typy a druhy recyklačních linek	25
3.3	Mobilní drtící zařízení	25
3.4	Semimobilní drtící zařízení	26
3.5	Stacionární drtící zařízení	27
3.6	Typy a druhy drtičů recyklačních linek	29
3.6.1	Čelistový drtič	29
3.6.2	Odrazový drtič	32
3.6.3	Kuželový drtič	33
3.7	Užití recyklátů v pozemních komunikacích	34
3.7.1	Stavební recyklát do nestmelených vrstev	36
3.7.2	Stavební recyklát do stmelených vrstev	41
3.8	Stavební recyklát z ekonomického hlediska	44
3.9	Směsný recyklát	46
3.9.1	Zkoušky směsných recyklátů	49
3.9.2	Sítový rozbor – zrnitost	49
	Praní – vymytí jemných částic	49
	Prosévání	50
3.9.3	Proctorova zkouška	50
3.9.4	Zkouška míry namrzavosti – přímá metoda	52

3.9.5	Zkoušky CBR a IBI.....	53
3.10	Zkušenosti ze zahraničí	54
3.10.1	Čína	54
3.10.2	Lucembursko.....	56
3.10.3	Německo	57
3.10.4	Nizozemí	57
3.10.5	Švédsko	58
4	Praktická část	60
4.1	Použité materiály	60
4.2	Zkoušky	60
4.2.1	Stanovení zrnitosti.....	60
4.2.2	Proctorova zkouška	67
4.2.3	Míra namrzavosti zemin.....	73
4.2.4	Zkouška IBI a CBR.....	79
5	Závěr	88
6	Literární přehled	91
A	Stanovení míry namrzavosti	97

Seznam obrázků

Obr. 1	Vysvětlivky ke zkratkám [1]	20
Obr. 2	Řez násypem konstrukce [1]	20
Obr. 3	Popis jednotlivých vrstev komunikace [1]	21
Obr. 4	Produkce podnikových odpadů podle odvětví činnosti průvodce odpadu pro rok 2018 [5]	22
Obr. 5	Produkce podnikových odpadů podle druhu odpadu (Katalogu odpadů) pro rok 2018 [5]	23
Obr. 6	Blokové schéma recyklačního procesu [1]	24
Obr. 7	Schéma mobilního pásového recyklačního drtiče [29]	26
Obr. 8	Mobilní kolový recyklační drtič [30]	26
Obr. 9	Kontejnerová třídící jednotka TK6 - 3 1000 x 3000/2 [29]	27
Obr. 10	Stacionární recyklační linka [29]	28
Obr. 11	Řez jednovzpěrným čelist'ovým drtičem [29]	30
Obr. 12	Řez dvouvzpěrným čelist'ovým drtičem [30]	31
Obr. 13	Řez horizontálním odrazovým drtičem [30]	32
Obr. 14	Řez kuželovým drtičem [30]	33
Obr. 15	Doporučené užití RSM podle zastoupeného základního materiálu [15]	34

Obr. 16	Vlastnosti recyklovaného kameniva pro nestmelené směsi musí být upřesněny podle normy ČSN EN 13242+A1, pro vibrovaný štěrky podle ČSN 73 6126-2. [1]	37
Obr. 17	Konkrétní požadavky na recyklované kamenivo a směsi jsou uvedeny v národní příloze ČSN EN 13285 a jsou obsaženy v tabulce. [1]	38
Obr. 18	Požadavky na nestmelené směsi z RSM [1]	39
Obr. 19	Minimální tloušťky nestmelených vrstev [13]	40
Obr. 20	Doporučené požadavky na RSM pro stmelené směsi a prolévané vrstvy [13]	42
Obr. 21	Doporučené požadavky na recyklované kamenivo pro asfaltové směsi [13]	43
Obr. 22	Doporučené požadavky na recyklované kamenivo pro asfaltové směsi [13]	44
Obr. 23	Srovnání cen Dufonev r.c., a.s. a Českomoravského štěrku [24], [25]	45
Obr. 24	Ceník SOD pro rok 2020 [24]	45
Obr. 25	Použití směsného recyklátu v konstrukci pozemní komunikace [12]	46
Obr. 26	Použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa [2]	47
Obr. 27	Označení zemin z obrázku č. 26 [2]	47
Obr. 28	Typy podloží použité v kategoričkových listech vozovky [2]	48

Obr. 29	Požadované hodnoty CBR pro upravené zeminy pro aktivní zónu.[13]	49
Obr. 30	Křivky zrnitosti a síťový rozbor [14]	50
Obr. 31	Rozměry hmoždířů [15]	51
Obr. 32	Schéma Proctorova hmoždíře [15]	51
Obr. 33	Kritérium namrzavosti zeminy [16]	52
Obr. 34	Zpracování odpadu SOD v Číně s jinými zeměmi (v roce 2012) [18]	55
Obr. 35	Výsledné hodnoty CBR vynesené v grafu [18]	56
Obr. 36	Naměřené hodnoty při penetraci 2,5 a 5 mm [18]	56
Obr. 37	Požadavky na betonové recykláty [23]	59
Obr. 38	Horkovzdušná sušící komora	61
Obr. 39	Zhotovená tělesa směsného recyklátu	61
Obr. 40	Křivka zrnitosti směsného recyklátu MZ 36, frakce 0/32 mm	62
Obr. 41	Křivka zrnitosti směsného recyklátu MZ 6505, frakce 0/32 mm	63
Obr. 42	Křivka zrnitosti směsného cihelného recyklátu, frakce 0/32 mm	64
Obr. 43	Křivka zrnitosti směsného recyklátu s obsahem hlíny, frakce 0/32 mm	65
Obr. 44	Křivka zrnitosti směsného recyklátu s obsahem jílu, frakce 0/32 mm	66
Obr. 45	Připravená směs recyklátu s obsahem hlíny	68

Obr. 46	Příprava tělesa s obsahem hlíny	68
Obr. 47	Vyrobené těleso s obsahem hlíny	68
Obr. 48	Proctorova křivka směsného recyklátu, optimální vlhkost 6,0 %	70
Obr. 49	Proctorova křivka směsného recyklátu s obsahem zeminy, optimální vlhkost 9,5 %	71
Obr. 50	Proctorova křivka směsného recyklátu s obsahem jílu, optimální vlhkost 9 %	72
Obr. 51	Příprava optimálně nasyceného směsného recyklátu s obsahem hlíny	74
Obr. 52	Připravená tělesa recyklátu s obsahem hlíny pro zkoušku míry namrzavosti	74
Obr. 53	Tělesa vložena do chladícího zařízení	75
Obr. 54	Tělesa vložena do chladícího zařízení (detail)	75
Obr. 55	Tělesa po zkoušce míry namrzavosti – recyklát s obsahem hlíny	75
Obr. 56	Výsledné křivky míry namrzavosti směsného recyklátu	76
Obr. 57	Výsledné křivky míry namrzavosti směsného recyklátu s hlínou	77
Obr. 58	Výsledné křivky míry namrzavosti směsného recyklátu s jílem	78
Obr. 59	Zhotovené těleso pro zkoušku IBI, recyklát s obsahem hlíny	80
Obr. 60	Tělesa saturovaná pro zkoušku CBR	80
Obr. 61	Ukončení zkoušky IBI, Směsný recyklát s hlínou	80
Obr. 62	Vzorek směsného recyklátu s hlínou po penetraci , zkouška IBI	81

Obr. 63	Saturovaný vzorek směsného recyklátu s jílem po penetraci, zkouška CBR	81
Obr. 64	Rozebrání formy typu B, Saturovaný vzorek směsného recyklátu s jílem	81
Obr. 65	Vyhodnocení zkoušky IBI, směsný recyklát	82
Obr. 66	Vyhodnocení zkoušky CBR, směsný recyklát	82
Obr. 67	Vyhodnocení zkoušky IBI, směsný recyklát s hlinou	83
Obr. 68	Vyhodnocení zkoušky CBR, směsný recyklát s hlinou	84
Obr. 69	Vyhodnocení zkoušky IBI, směsný recyklát s jílem	85
Obr. 70	Vyhodnocení zkoušky CBR, směsný recyklát s jílem	85
Obr. 71	Tabulka s výsledným okamžitým indexem únosností jednotlivých recyklátů	86
Obr. 72	Tabulka s výsledným kalifornským poměrem únosnosti recyklátů	86

Seznam tabulek

Tab. 1	Tabulka zrnitosti směsného recyklátu MZ 36, frakce 0/32 mm	62
Tab. 2	Tabulka zrnitosti směsného recyklátu MZ 6505, frakce 0/32 mm	63
Tab. 3	Tabulka zrnitosti směsného cihelného recyklátu, frakce 0/32 mm	64
Tab. 4	Tabulka zrnitosti směsného recyklátu s obsahem hlíny, frakce 0/32 mm	65
Tab. 5	Tabulka zrnitosti směsného recyklátu s obsahem jílu, frakce 0/32 mm	66
Tab. 6	Tabulka: Vyhodnocení vzorku směsný recyklát	70
Tab. 7	Tabulka: Vyhodnocení vzorku směsný recyklát s obsahem hlíny	71
Tab. 8	Tabulka: Vyhodnocení vzorku směsný recyklát s obsahem jílu	72

1 Úvod

V dnešní době je veliký trend využívat či zpracovávat většinu odpadu vyprodukovaného lidstvem. Jedno z největších zastoupení mezi vyprodukovaným odpadem, má odpad stavební či demoliční, který tvoří zhruba 41–43 % celkového vyprodukovaného odpadu v České republice. Celkem se u nás za rok 2018 vyprodukovalo 28 353 238 tun odpadu, z něhož bylo celkem 11 601 305 tun stavebního a demoličního. Česká republika se zavázala Evropské unii dle odpadového hospodářství využívat opětovně stavební či demoliční odpad minimálně ze 70 % hmotnostní míry do roku 2020. Recyklace těchto materiálů je důležitá nejen ekonomického hlediska, ale i z hlediska šetření přírodních zdrojů, které mohou být v mnoha případech správnou recyklací nahrazeny tímto materiálem.

Teoretická část bude zahrnovat aktuálně dostupné informace na téma směsné recykláty v podloží vozovek. V této části bude postupně popisována jeho výroba, využitelnost a následně i ekonomické zhodnocení recyklátů vůči přírodním materiálům. Avšak největší pozornost bude věnována užití směsných recyklátů do aktivní zóny pozemních komunikací. Dále se zabývá problematikými vlastnostmi těchto materiálů. V samostatné kapitole jsou popsány zahraniční zkušenosti s využitím směsných recyklátů.

Praktická část popisuje konkrétní praktické úkony provedené v laboratoři, které byly použity na zkoušení jednotlivých materiálových směsí. Celkem byly zkoumány tři vzorky směsného recyklátu frakce 0/32 mm. Jedná se o čistý směsný recyklát, recyklát s hlinitou složkou a recyklát s jílovou složkou. Cílem práce je zhodnotit směsný recyklát z hlediska jeho míry namrzavosti a únosnosti, a tak určit jeho vhodnost použití do podkladních vrstev. Nejprve byla stanovena u jednotlivých vzorků míra zrnitosti dle normy ČSN EN 933-11, následně byly provedeny Proctorovy zkoušky pro stanovení maximální objemové hmotnosti a optimální vlhkosti dle ČSN EN 13286-2, míra namrzavosti zemin dle normy ČSN 72 1191 a v poslední řadě byly provedeny zkoušky Kalifornského poměru únosnosti a okamžitého indexu únosnosti dle ČSN EN 13286-47.

2 Teoretická část

2.1 Termíny a definice základních pojmů

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

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

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

„**Recyklát z vozovek** – je recyklované kamenivo získané drcením a tříděním betonu, vrstev stmelených asfaltem nebo hydraulickým pojivem případně nestmelených vrstev a hrubozrnných zemin s celkovým obsahem složek $R_c + R_a + R_u \geq 95$ % hm. Maximální obsah složky R_a je 30 % hm. Maximální obsah jiných, ostatních a plovoucích částic $(X+Y+FL)$ je 5 % hm.“ [1]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

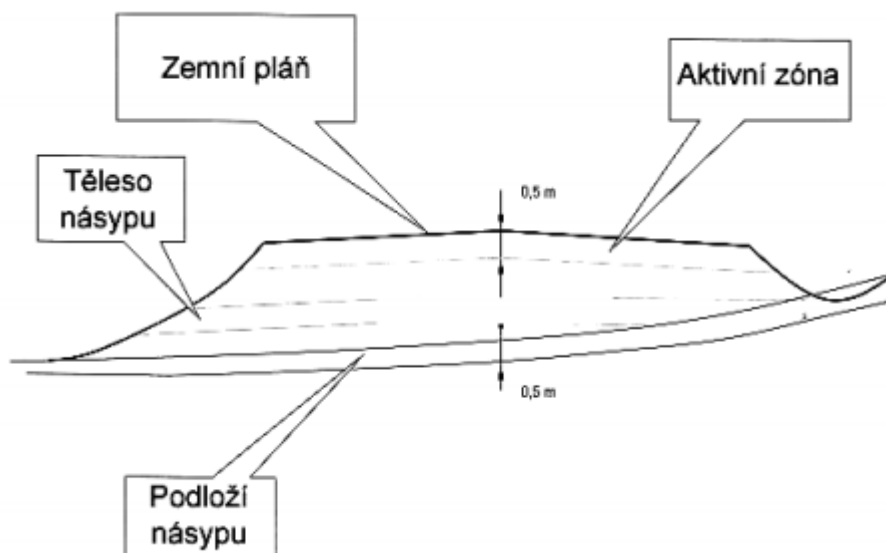
„**Aktivní zóna** – horní vrstva zemního tělesa na násypu i zářezu, o tloušťce zpravidla 0,5 m, do níž zasahují vlivy dopravní zatížení a klimatické vlivy.“ [2]

„**Zářez** – zemní těleso vzniklé vytěžením a odstraněním rostlé zeminy (horniny) do úrovně zemní pláň.“ [2]

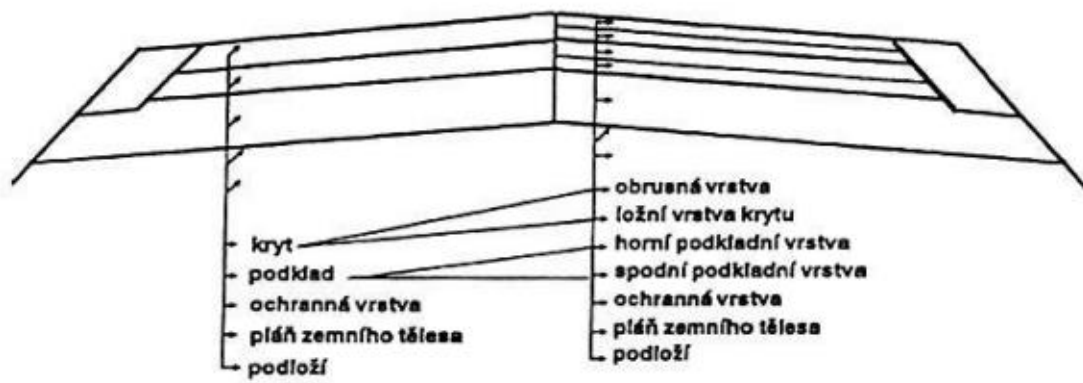
„**Násyp** – zemní těleso vytvořené nasypáním a zhutněním zeminy nebo horniny do předepsaných rozměrů, včetně úpravy svahů a zemní pláň.“ [2]

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

Obr. 1 Vysvětlivky ke zkratkám [1]



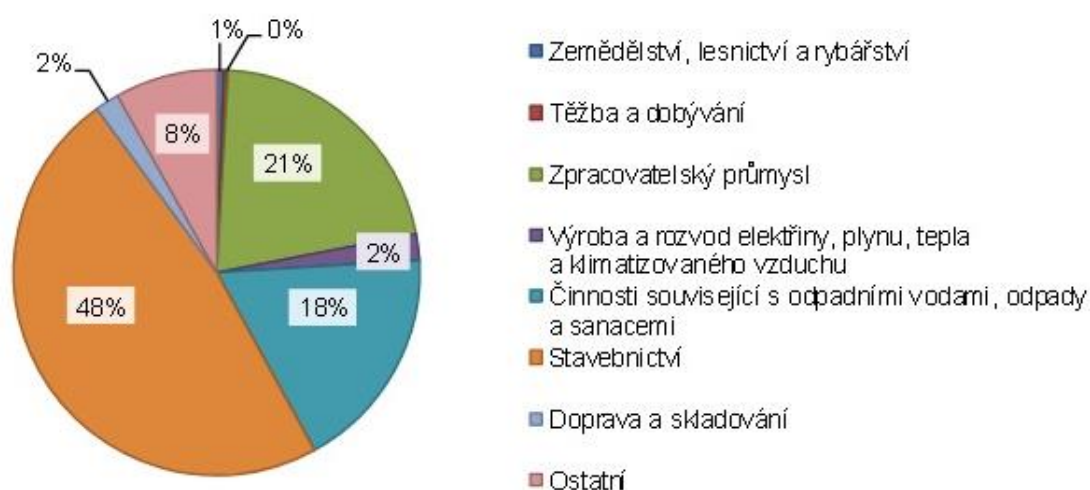
Obr. 2 Řez násypem konstrukce [1]



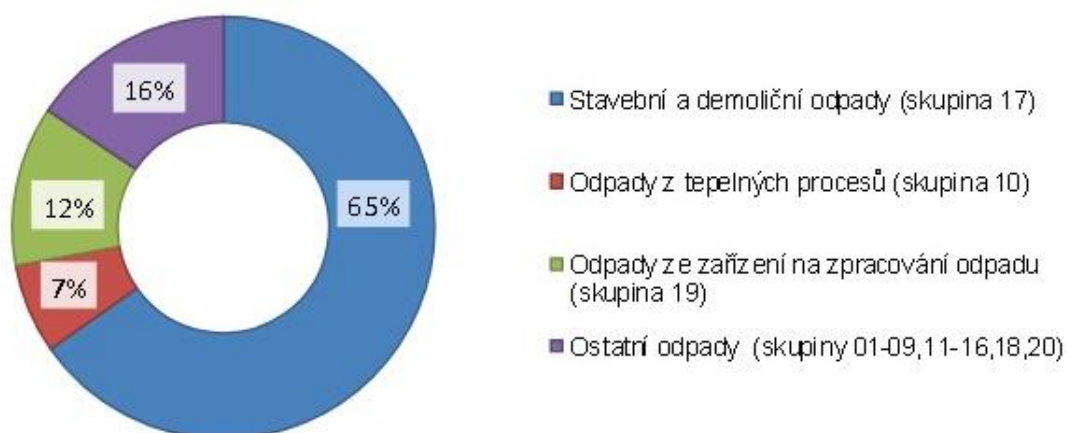
Obr. 3 Popis jednotlivých vrstev komunikace [1]

3 Stavební a demoliční odpad (SDO)

Produkce stavebních a demoličních odpadů vzniká v souvislosti se stavebními pracemi. Jedná se hlavně o odpady vzniklé při demolici pozemních a dopravních staveb. Mezi stavební a demoliční odpad řadíme také výkopovou zeminu a kamenivo, které jsou vykopány při realizaci nových staveb, jako jsou například budovy a liniové stavby. V současnosti je velmi důležité umět se stavebními a demoličními odpady nakládat, jelikož odpady uložené na skládkách či v různých terénních prohlubních za záminkou budoucí rekultivace jsou nevhodné. Na tyto skládky by měly být ukládány odpady, které jsou již už nevyužitelné nebo nebezpečné, jako jsou například odpady komunální. Z tohoto důvodu je rozvoj recyklace stavebních a demoličních odpadů velmi potřebný a má také značný význam na indikátory sledující množství ukládaných odpadů. Recykláty vyrobené ze stavebních a demoličních odpadů také významně šetří nerostné surovinové zdroje – a to jak kamenivo, tak také ropu (asfalty). Produkce recyklovaného kameniva ze stavebních a demoličních odpadů se pohybuje v jednotlivých zemích EU kolem 5 % až 30 % produkce přírodního stavebního kameniva a štěrkopísků. [4] Na obrázku č.4 můžeme vidět produkci odpadů dle odvětví činnosti v roce 2018 a následně na obrázku č. 5 produkci odpadu dle katalogu odpadů pro rok 2018.



Obr. 4 Produkce podnikových odpadů podle odvětví činnosti průvodce odpadu pro rok 2018 [5]



Obr. 5 Produkce podnikových odpadů podle druhu odpadu (Katalogu odpadů) pro rok 2018 [5]

Výsledné pevnostní charakteristiky a únosnost SDO závisí na kvalitě materiálu (zdivo, beton, asfaltová směs), ze kterého je recyklát vyroben. Velký vliv na chování recyklátu má jeho „čistota“, materiály jako dřevo, plasty, nízkopevnostní beton, cihly a ocelová výztuž degradují vlastnosti výsledného produktu – recyklovaného kameniva. Aktuálně jsou v ČR již dostupné mechanismy, které se běžně používají na separaci cizorodého materiálu, který jsou schopny do značné míry ze SDO odseparovat. Se získanými znalostmi těchto mechanismů jsou velmi dobré zkušenosti s použitím recyklovaného betonu do pozemních komunikací, kdy jeho charakteristiky jsou srovnatelné s přírodními materiály používanými do vozovky. [5]

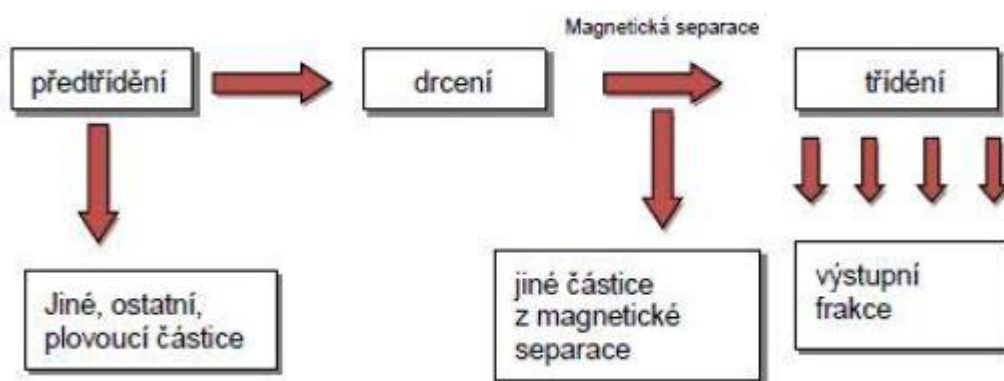
3.1 Výroba recyklátů

Recykláty jsou výsledným produktem recyklace SDO za jistých podmínek, kdy recyklát má dostatečnou kvalitu a lze ho použít jako náhradu přírodního kameniva do konstrukčních vrstev nebo zemního tělesa pozemních komunikací. Dle podmínek v TP 210 je důležité recyklovaný stavební materiál ukládat odděleně podle jakosti a druhu. Důležité je zabránit znehodnocení recyklovaného materiálu znečištěním, vyplavováním či smícháním. Nedílnou součástí skladovaného materiálu je jeho pravidelná kontrola homogenity i stejnorodosti pro kontrolu úrovně materiálu.[1]

Výrobní proces má zásadní vliv na výslednou kvalitu produkovaného recyklátu. Bylo zjištěno, že nejefektivnější, a dokonce i nejlevnější třídění materiálu SDO je už

rovnou přímo na stavbě, odkud SDO pochází než u výrobce recyklátu. Výhodou právě tohoto třídění je, že během demolice lze snadněji oddělit minerální sutě od veškerých cizorodých materiálů – zejména dřevo, plasty, sklo, kovy, dehtové lepenky apod. Třídění se netýká pouze cizorodých materiálů, ale musí být také odděleny materiály kontaminované od nekontaminovaných či roztrídění minerální sutě na suť cihelnou, betonovou, živičnou a výkopovou zeminu.

Kvalita recyklátu není ovlivněna pouze technologií, ale také organizací práce a logistickým systémem chodu recyklačního zařízení, včetně skladového hospodářství. [6] Z hlediska získání kvalitního recyklátu se za poslední roky v České republice osvědčila uznávaná a používaná konfigurace, naznačená blokovým schématem na obrázku č. 6.



Obr. 6 Blokové schéma recyklačního procesu [1]

Lze se setkat se zařízeními, která výše uvedené blokové schéma nedodrží, byť je nemyslitelné, že by recyklace proběhla bez třech základních technologických kroků, kterými jsou předtřídění – drcení – třídění. V blízké době se k těmto třem hlavním krokům přidá, jak již je dnes hojně využívána v jiných zemích EU, separace lehkých a prachovitých částic, popřípadě praní, kde se s touto technologií můžeme setkat u stacionárních recyklačních zařízení. [6]

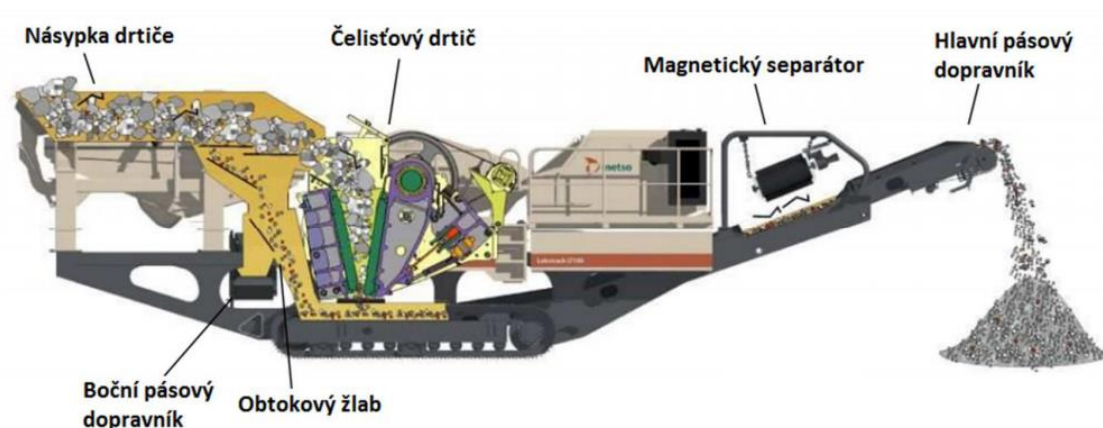
3.2 Typy a druhy recyklačních linek

Recyklační linky lze rozdělit do třech hlavních kategorií, na linky mobilní, semi-mobilní nebo stacionární. V České republice převažují linky mobilní, zpracovávají přibližně 90 % stavebního a demoličního odpadu. [6]

Před patnácti lety se začaly v České republice objevovat první recyklačních zařízení. Jednalo se o rozměrné stroje, které byly umístěny na mobilních přívěsech či návěsech. Drtiče byly zejména umísťovány do kontejnerových rámců, takže byla s nimi jednoduchá manipulace, co se týče přemísťování. Nevýhodou těchto linek byla jejich pohotovostní manipulace, což zapříčiňovalo dovoz SDO nakladači až na vzdálenosti stovek metrů, to mělo nevhodný dopad na celý proces. V roce 2000 došlo k velkému vývoji recyklačních linek na našem území, které byly opatřeny pásovými podvozky, které bylo možné ovládat dálkovými ovladači, které mohli ovládat strojníci z nakládacích strojů, jimiž byly drtiče plněny. [6]

3.3 Mobilní drtící zařízení

Jedná se o recyklační linky, které jsou poháněny dieselovými nebo i hybridními motory, pomocí nichž je možno jednotku připojit k externímu zdroji elektřiny. Motor pohání pásový (obrázek č. 7) nebo kolový podvozek (obrázek č. 8), byť od kolového podvozku se ustupuje, jelikož nemá dobrou průjezdnost v terénu jako pásový. Tyto stroje mohou disponovat různými druhy drtičů (kuželový, odrazový, čelistový). Výhodou této linky je schopnost pohybu k hromádám SDO. Jak jsem uvedeno výše, mobilní drtiče mohou být plněny nakladači, pásovými rypadly či dopravníky, které sypou materiál do násypné jímky, kde je pomocí hřebelového podavače odseparován jemný materiál (písek, hlína) na příčný pásový dopravník, kterým je tento materiál dopraven mimo soustavu na skladovací plochu. Velkozrnný materiál pokračuje do čelistového drtiče, kde je tento odpad podrcen a následně putuje pomocí dopravního pásu přes magnetický odlučovač kovů na haldovací dopravník. Hodinová výkonnost těchto strojů se pohybuje v rámci 50 až 150 tun. [7]



Obr. 7 Schéma mobilního pásového recyklačního drtiče [29]



Obr. 8 Mobilní kolový recyklační drtič [30]

3.4 Semimobilní drtící zařízení

Recyklační soupravy mohou být osazeny na kontejnerovém rámu s rámovou konstrukcí opatřené ližinami, nebo kolovým podvozkem. Nejčastěji mají soupravy šikmý podavač z důvodu velké výšky zásobníku na materiál, který z nízkého pomocného zásobníku plní hlavní zásobník soupravy. V porovnání s mobilními sestavami jsou levnější, ale jejich nevýhodou je, že k přemísťování potřebují podvalník nebo nákladní auto

s hydraulickou rukou. Některé semimobilní linky mohou být sestaveny z více jednotek, které se sestavují až na místě nasazení.



Obr. 9 Kontejnerová třídící jednotka TK6 - 3 1000 x 3000/2 [29]

3.5 Stacionární drtící zařízení

Stacionární linky jsou umístěny především ve vhodných lokalitách (například staré cihelny či lomy), ve kterých je nižší negativní dopad na životní prostředí. Linky jsou pevně ukotveny na základech, což neumožňuje jejich přesun. Stacionární linky mají vyšší výkonnost ve zpracování stavebního a demoličního odpadu, než jsou schopny zpracovávat linky mobilní a semimobilní, zároveň můžeme k lince připojit další zařízení, jako jsou řady drtičů, třídíčů a dalších speciálních zařízení. Pod speciálním zařízením si můžeme představit tlumiče hluku, filtry a odsávací zařízení, která nám zlepšují kvalitu výsledného recyklátu. Z důvodu rentability musí být zařízen dostatečný přísun stavebního a demoličního odpadu, proto se tyto linky staví v lokalitách, kde je velká zásoba SDO, popřípadě musí být zajištěna doprava materiálu z jiných skládek. Cena vyro-

beného recyklátu může být ovlivněna i dopravou. Stacionární technologické soupravy musí obsahovat prostory pro uskladnění odseparovaných materiálů, jako jsou například kovy, nerecyklovatelný odpad, nebezpečný odpad a jiné. Je velmi nutné, aby tato zařízení měla dostatek vody pro vlhčení materiálu před a během drcení z důvodu snížení prašnosti. Z ekonomických důvodů musí být opatřeny recyklační linky jímkami pro skladování kalů z odpadní vody. Oproti dvěma předešlým typům recyklačních linek jsou stacionární linky poháněny elektromotory, které jsou finančně méně nákladné, ale jsou náročnější na provoz vzhledem k obsluze stoje.



Obr. 10 Stacionární recyklační linka [29]

3.6 Typy a druhy drtičů recyklačních linek

Drcení je jedna z nejdůležitějších částí recyklace stavebního a demoličního odpadu. Drcení se dá popsat jako proces podrcení velkých zrn recyklátu na požadovanou zrnitost zrn. Typ a druh drtiče má vliv na předepsanou fyzikální vlastnost drceného materiálu a účel použití, ale především na množství vyrobeného materiálu. Drtiče můžeme nazvat jako srdce recyklační soustavy, které mají vliv na výsledný produkt. Technologie linek je vybavena čelistovým, odrazovým nebo kuželovým drtičem.

3.6.1 Čelistový drtič

Funkce drtiče spočívá v drcení materiálů pomocí dvou čelistí složených, z tvrdé a manganové oceli, jež je opatřena rýhováním. Drcení je založeno na stacionární a nestacionární čelisti. Drcený materiál je rozdrcen smykem, tlakem nebo lámáním. Užívá se mnoho druhů profilů, které se aplikují podle drceného materiálu. Čelistové drtiče jsou vyráběny s různými vstupními velikosti, na kterých je závislý výkon, ten se může pohybovat v desítkách až stovkách tun za hodinu. Všeobecně můžeme říci, že velikost šterbiny je vzdálenost mezi stacionární a pohyblivou částí drtiče v nejužším místě.

Výhody čelistových drtičů spočívají v:

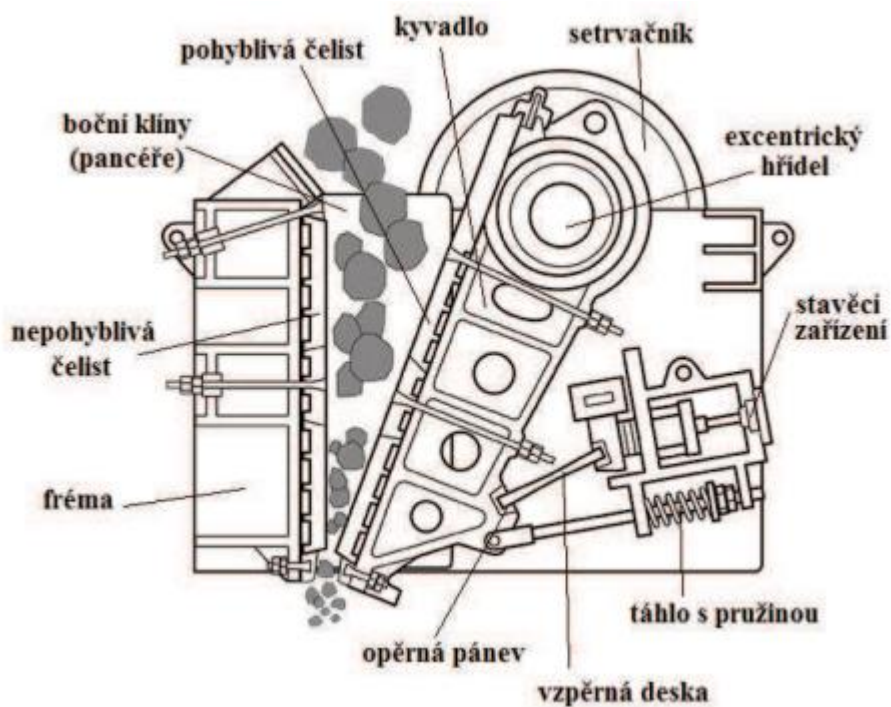
- vysoká spolehlivost a výkon,
- nízké náklady na údržbu a provoz,
- snadná výměna opotřeбенých částí drtiče,
- flexibilní možnost nasazení,
- optimální stupeň drcení,
- optimální tvar vstupního otvoru umožňující zpracovávat velké kusy recyklovaného materiálu.

Zejména mezi nevýhody řadíme tvarový index zrna, než je tomu u ostatních drtičů. Dále není vhodné v těchto drtičích drcit asfaltové kry, které drtič ucpávají, jelikož drtič se zalepí, avšak někteří výrobci uvádí, že se asfaltové kry mohou drcit při teplotách niž-

ších než je 5 °C, kdy asfalt přestává být lepivým. Nevhodným materiálem může být železobeton, kde nastává problém s obsahem betonářské výztuže, která může drtič zcpat, popřípadě porušit dopravníkový pas.

Jednovzpěrný čelistový drtič

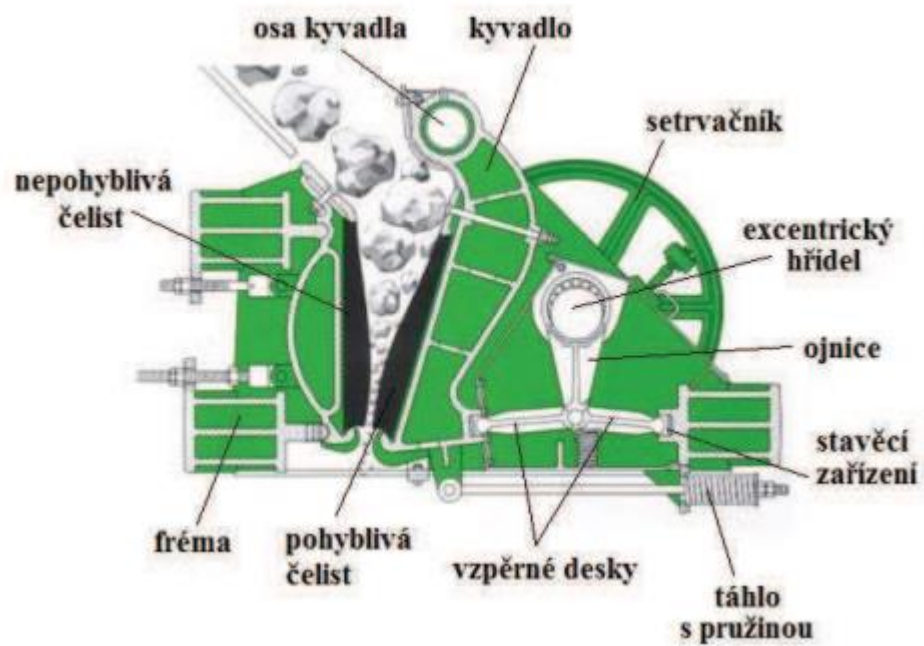
Materiál je drcen kývavým a zároveň posuvným pohybem drtící čelisti. To způsobuje drobnější drcení, než je tomu u typu dvouvzpěrného drtiče. Tento typ se nejčastěji osazuje do mobilních drtících linek z důvodu menších rozměrů a hmotnosti.



Obr. 11 Řez jednovzpěrným čelistovým drtičem [29]

Dvouzpěrný čelistový drtič

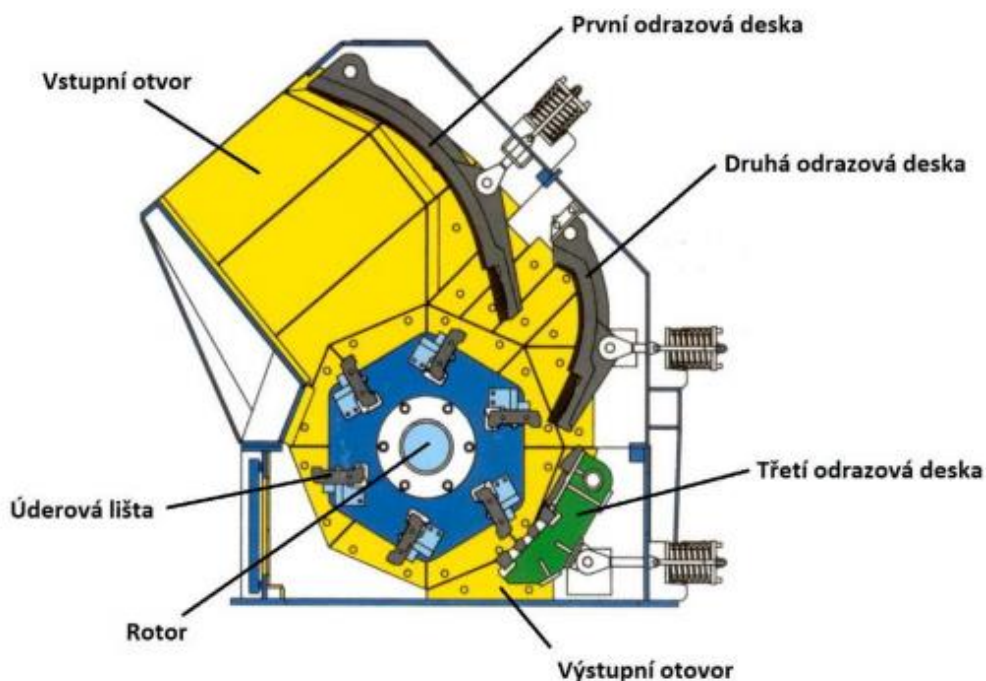
Materiál je drcen pomocí pákovému mechanismu, který tvoří kývavý pohyb. Tato konstrukce se využívá pro drcení velkých robustních zrn. Jeho nevýhodou je hmotnost, proto se ojediněle používá v mobilních drtičích zařízeních



Obr. 12 Řez dvouzpěrným čelistovým drtičem [30]

3.6.2 Odrazový drtič

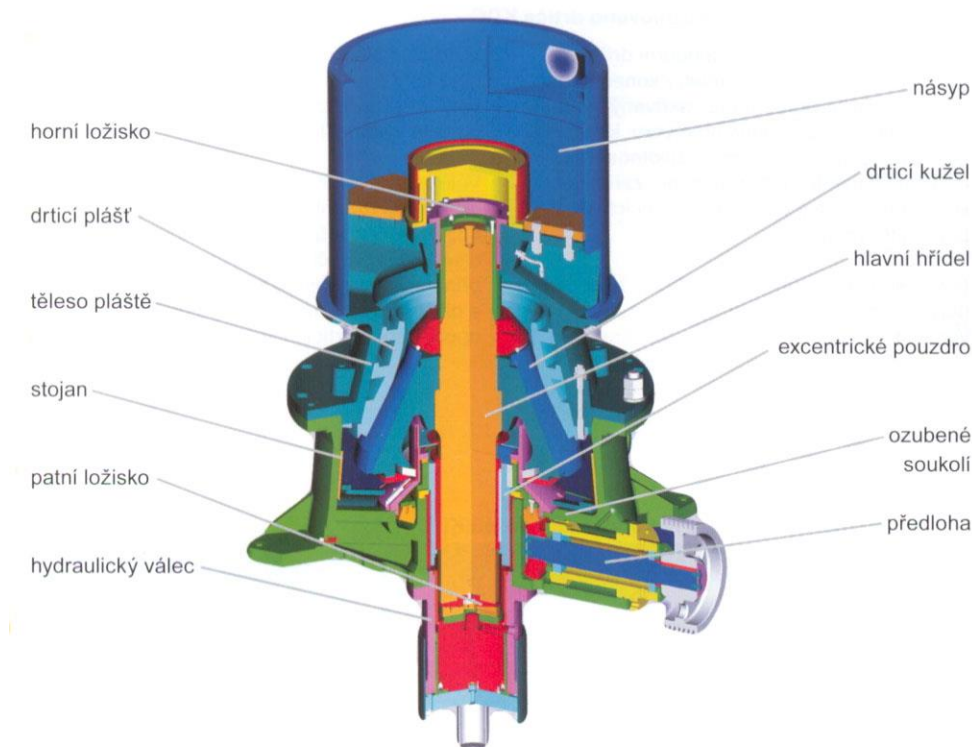
Recyklovaný materiál je drcen pomocí opakujících se rázů zrn o desky, při nichž se materiál drtí i sám o sebe. Rozdrcený materiál následně prochází nastavitelnou šterbinou umístěnou mezi rotujícími deskami a nárazovou deskou. Velikost materiálu lze ovlivnit nastavením polohy odrazových desek, otáčkami nebo polohou rotoru. Výhoda oproti čelistovému drtiči spočívá v regulaci míry podrceného materiálu, který zapříčiňuje stejnorodý stejnoměrně podrcený materiál. Další výhodou je menší drtící síla, kterou můžeme drtit středně tvrdé materiály. Nevýhodou drtičů bývá hlučnost, prašnost a celkové provozní náklady. Odrazové drtiče mohou být horizontální či vertikální. Vertikální drtič se používá pro konečné dodrcení kamenných drtí, jemných frakcí, které obsahují vysoký podíl kubických zrn.



Obr. 13 Řez horizontálním odrazovým drtičem [30]

3.6.3 Kuželový drtič

Drcený materiál je drcen mezi pláští dvou kuželů, kdy materiál je rozdrcen pomocí tlaku a smyku, které vznikají krouživým, kývavým pohybem drtícího kužele a stacionárního kužele. K drcení stavebního a demoličního odpadu se používá zřídka, z důvodu rizika výskytu nedrtitelných materiálů. Tento způsob drcení se využívá pro sekundární nebo terciální drcení hornin a nelepivých materiálů. Zrnitost materiálu je závislá na nastavení vzdálenosti štěrbin mezi kužely. Moderní drtiče jsou vybaveny hydraulickým zařízením pro nastavení štěrbin a jsou opatřeny automatickou ochranou proti přetížení, která zabráňuje vzniku velkého tlaku mezi drtícími kuželi. Výhodou těchto strojů jsou nízké náklady na provoz, údržbu a výsledný produkt má dobrý tvarový index.



Obr. 14 Řez kuželovým drtičem [30]

3.7 Užití recyklátů v pozemních komunikacích

Recykláty do zemního tělesa a podloží vozovky pozemních komunikací musí splňovat požadavky ČSN 73 6133. Podle procentuálního zastoupení hlavních složek recyklátů můžeme užití rozdělit dle obrázku č. 15. [1].

Typ RSM ³⁾	Konstrukční vrstvy pozemní komunikace									Podloží, zemní těleso ⁴⁾
	AB	CB	Nestmelené podkladní vrstvy (NV)				Stmelené podkladní vrstvy (SV)	Prolévané podkladní vrstvy (PV) a VŠ		
			MZK	ŠD _A	ŠD _B	MZ		Kostrá ₁₎	Výplň ₂₎	
Recyklát z betonu	+	0/-	+	+	+	+0	+	+0	+0	+0
Recyklát ze zdiva	-	-	-	0/-	+	+0	+	0/-	+0	+
Recyklát směsný	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+
Recyklát z vozovek	+	+0 ⁵⁾	+	+	+	+0	+	+0	+0	+0
Recyklát asfaltový	+	-	+0	+	+	0/-	+	0/-	0/-	0/-

Obr. 15 Doporučené užití RSM podle zastoupeného základního materiálu [15]

Vysvětlivky k obrázku č. 15:

+ doporučuje se používat

- nedoporučuje se používat

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

AB asfaltové vrstvy vozovek pozemních komunikací

CB cementobetonové kryty vozovek pozemních komunikací

1) Kostrá ... prolévaných vrstev např. kamenivo frakce 32/63, případně u vibrovaného šterku VŠ (dle normy 73 6126-2)

2) Výplň ... u prolévaných vrstev jako součást výplňové malty nebo vibrovaného šterku např. kamenivo frakce 8/11

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

4) Zrnitý materiál do podloží vozovek, vrstevnatých násypů (ztužující vrstva), případně nezpevněných krajnic vozovky PK

5) Pro recyklované kamenivo do CB krytů lze použít, po splnění požadavků ČSN EN 13877-1, pouze separovaný materiál drcený ze starého CB krytu. [1]

Recyklované materiály jako kamenivo do pozemních komunikací musí splňovat i tyto normy:

- **ČSN EN 13 043:2004 Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch** – v této normě jsou určeny požadované vlastnosti recyklátů (převážně betonového) jako kameniva pro užití v asfaltových směsích a v horních vrstvách pozemních komunikací, letišť a jiných dopravních ploch. Kamenivo je popisováno v normě jako získaný přírodní, umělý nebo recyklovaný materiál
- **ČSN EN 13 242:2004 Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace** – v této normě jsou určeny požadované vlastnosti recyklátů pro použití v nestmelených směsích a směsích stmelených hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace. Kamenivo je popisováno v normě jako získaný přírodní, umělý nebo recyklovaný materiál. [8]

Pro použití recyklátů do podkladních vrstev musí být provedeny i základní funkční zkoušky a musí být zjištěny jeho vlastnosti. Základní požadavky můžeme shrnout do třech hlavních kategorií: [9]

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 otěru,

- objemová hmotnost zrn,
- nasákavost.

Trvanlivost [9]

Mimo sledování těchto vlastností se musí u stavebního a demoličního odpadu hlídat jeho vstupní kvalita, jako je pevnost, stupeň chemického, fyzikálního a mechanického znečištění, ale především i jeho stáří. Podle použití SOD se musí určit způsob sekundárního zpracování, popřípadě musí být upraven pro danou přípravu čerstvých směsí pro zhotovení konstrukčních vrstev. Důležitý je i způsob ošetření materiálu a následné chování recyklátů v konstrukci, který je sledován běžnými fyzikálními a mechanickými metodami, nedestruktivními zkouškami nebo pomocí moderních laboratorních metod.

3.7.1 Stavební recyklát do nestmelených vrstev

Použití recyklátů ze stavebně demoličních materiálů bez použití pojiva v konstrukci vozovky do nestmelených vrstev se navrhuje podle normy ČSN 73 6126-1. Recyklované kamenivo jako šterkodrť $\check{S}D_A$ se používá maximálně do třídy dopravního zatížení TDZ III, pro častější využití jako $\check{S}D_B$ je to maximálně TDZ V. U použití recyklovaného kameniva jako vibrovaného šterku (VŠ) je maximální TDZ V. Pro použití recyklovaného kameniva jako mechanicky zpevněné zeminy (MZ) je maximální použití pro TDZ V. [10]

Směsný recyklát lze použít jako výplňové kamenivo do vibrovaného šterku (VŠ) i pro mechanicky zpevněnou zeminu (MZ). [1]

Vibrovaný šterk (VŠ) je vrstva vytvořená kostrou z hrubého kameniva se zavibrovaným výplňovým materiálem (směsným recyklátem). Kostra je tvořena frakcí 32/63 mm, výplňové kamenivo do velikosti zrna max. 16 mm. Únosnost vibrovaného šterku je postavena na únosnosti hrubého šterku, který má vyšší únosnost než šterkodrť a šterkopísek. Tuto vrstvu nelze klást na podloží, z důvodu nesplnění filtračního kritéria [1].

Mechanicky zpevněná zemina (MZ) je vrstva vozovky z nestmelené zeminy nebo náhradních materiálů (SDO) zrnitosti GE, splňující předepsané vlastnosti jako je únosnost $CBR_{SAT} = \text{minimálně } 20 \%$ a ekvivalent písku = minimálně 20 %. [1]

Článek normy ČSN EN 13285	Vlastnost	Požadavky		
		MZK	ŠDA	ŠDB
4.3.1	Označení směsi	0/32; 0/45	0/32; 0/45; 0/63	0/32; 0/45; 0/63
NA.4.5 tabulka NA.1	Všeobecné požadavky ¹⁾ na zrnitost	HK DK směs	G_C 85-15 G_F 85 G_A 85	—
NA.4.5 tabulka NA.1	HK – propad střed. sítím ¹⁾	$D/d < 4$ $D/d \geq 4$	GT_C 25/15 GT_C 20/17,5	—
NA.4.5 tabulka NA.1	Typická zrnitost ¹⁾	DK směs	GT_F 10 GT_A 10	—
NA.4.5 tabulka NA.1	Max. obsah jemných částic ¹⁾	HK DK směs	f_4 f_{16} f_0	—
NA.4.5 tabulka NA.1	Kvalita jemných částic ^{2) 3)}	$I_p \leq 4$, $w_L \leq 25\%$, SE_{30}		
¹⁾ Platí pro frakce recyklovaného kameniva podle ČSN EN 13242+A1 pro výrobu směsi MZK v centru. ²⁾ Nezkouší se u směsí z R-materiálu ³⁾ I_p index plasticity a w_L mez tekutosti podle ČSN CEN ISO/TS 17892-12. Pokud vzhledem k charakteru materiálu nelze stanovit mez plasticity, jedná se o materiál neplastický a platí $I_p = 0$.				

Obr. 16 Vlastnosti recyklovaného kameniva pro nestmelené směsi musí být upřesněny podle normy ČSN EN 13242+A1, pro vibrovaný štěrky podle ČSN 73 6126-2. [1]

Článek normy ČSN EN 13285	Vlastnost	Požadavky				
		MZK	ŠDA	ŠDB	VŠ ³⁾ (kostra)	VŠ ⁴⁾ (výplň)
04.03.2001	Označení směsi	0/32; 0/45	0/32; 0/45; 0/63	0/32; 0/45; 0/63	32/63	max. D 16
NA.4.5 tab. NA.1	Všeobecné požadavky na zrnitost ¹⁾					
	HK DK směs	G _c 85/15 G _F 85 G _A 85	G _c 80/20 G _F 80 G _A 80	G _c 85/15 - -	G _c 80/20 G _F 80 G _A 80	
NA.4.5 tab. NA.1	HK – na střed. síť ¹⁾ D/d < 4 D/d ≥ 4	GT _C 25/15 GT _C 20/17,5	GT _C 25/15	- -	GT _C 25/15 nebo GT _C 20/1 5	-
NA.4.5 tab. NA.1	Typická zrnitost ¹⁾ DK směs	GT _F 10 GT _A 10	GT _F 20 GT _A 20	-	-	
NA.4.5 tab. NA.1	Všeobecné požadavky na zrnitost ¹⁾ HK DK směs	f ₄ f ₁₆ f ₈	f ₄ f ₂₂ f ₁₂	f ₂ - -	f ₂ f ₇ f ₇	
NA.4.5 tab. NA.1	Kvalita jemných částic 2)	I _p ≤ 4, wL ≤ 25 %, SE30		-		
kap. 4.4 tab. 7 ČSN EN 13242A1	Procentní podíl drcených zrn v hrubém kamenivu	C _{90/3}				
kap. 5.2 tab. 9 ČSN EN 13242	Odolnost proti drcení Los Angeles max.(LA)	LA ₄₀	LA ₅₀	LA ₄₀	LA ₅₀	
kap. 07.03.2003 tab. 20 ČSN EN 13242	Odolnost proti zmrazování a rozmrazování (F)	F ₄				
kap. 07.03.2003 tab. 20 ČSN EN 13242	Trvanlivost síranem hořečnatým (MS) 5	MS ₁₈				

Obr. 17 Konkrétní požadavky na recyklované kamenivo a směsi jsou uvedeny v národní příloze ČSN EN 13285 a jsou obsaženy v tabulce. [1]

Vysvětlivky k obrázku č.17:

- 1) platí pro frakce recyklovaného kameniva podle ČSN EN 13242+A1
- 2) Ip index plasticity a wL mez tekutosti podle ČSN CEN ISO/TP 17892-12.
Pokud vzhledem k charakteru materiálu zkoušky nelze provést, pak platí IP= 0
- 3) požadavky pro VŠ (kamenná kostra) jsou uvedeny v ČSN 73 6126-2
- 4) požadavky pro VŠ (výplňové kamenivo) jsou uvedeny v ČSN 73 6126-2
- 5) k posouzení odolnosti kameniva proti zmrazování a rozmrazování se může použít zkouška zmrazování a rozmrazování podle ČSN EN 1367-1 nebo zkouška síranem hořčnatým podle ČSN EN 1367-2 splňuje uvedené požadavky, lze kamenivo považovat za mrazuvzdorné a není nutné stanovovat odolnost proti zmrazování a rozmrazování podle ČSN EN 1367-1.

Vlastnost	Požadavky, kategorie				
	Směs MZK-R (G _A , G _C)	Směs MZKO-R (G _A , G _C)	ŠD _A -R	ŠD _B -R	MZ-R ¹⁾
Doporučené směsi	0/32; 0/45		0/32; 0/45; 0/63	0/32; 0/45; 0/63; 0/125	0/32; 0/45
Maximální obsah jemných částic (≤0,063 mm)	UF ₉			UF ₁₂	UF ₁₅
Minimální obsah jemných částic (≤0,063 mm)	LF ₂			LF _N	LF _N
Nadsítné	OC ₉₀		OC ₈₅	OC ₈₀	OC ₈₅
Kategorie zrnitosti podle ČSN EN 13285	G _A ; G _C	G _O	G _E	G _N	G _E
Odchytky zrnitosti jednotlivých dávek podle ČSN EN 13285	Požaduje se splnění požadavků ČSN EN 13285, tabuky 7 a 8		bez požadavků		
Namrzavost podle ČSN 73 6133, příp. ČSN 72 1191	bez požadavků				β _{0,25} ²⁾
CBR po sycení ve vodě po dobu 96 hodin	min. 100%		bez požadavků		min. 20%
Laboratorní srovnávací objemová hmotnost a optimální vlhkost (nejčastěji z Proctorovy zkoušky modifikované)	Deklarovaná hodnota				
Vlhkost	Povolené odchytky vlhkosti směsi od deklarované hodnoty : -3 % až +2%		bez požadavků		
Deklarace vodou rozpustného obsahu síranů	bez požadavků				

Obr. 18 Požadavky na nestmelené směsi z RSM [1]

Vysvětlivky k obrázku č.18:

- 1) směs MZ-R (mechanicky zpevněná zemina z RSM) musí dále splňovat tyto parametry: ekvivalent písku (SE) podle ČSN EN 933-8 min. 25 %, vlhkost na mezi tekutosti a index plasticity podle ČSN CEN ISO/TS 17892-12, wL max. 25 % a index plasticity $IP \leq 6$.
- 2) Hodnocení namrzavosti MZ-R se provádí podle zrnitostního (Scheibleho) kritéria podle ČSN 73 6133:2010. U sporných případů se doporučuje stanovit hodnotu součinitele namrzavosti β podle ČSN 72 1191, musí být max. 0,25, případně hodnota mrazového zdvihu max. 3 mm.[13]

Nestmelené vrstvy v ojedinělých případech mohou tvořit i krytové vrstvy. Používají se pro účelové komunikace nebo k dočasným komunikacím. Používají se vrstvy s uzavřeným povrchem, který je vyplněný drobným kamenivem nebo recyklovanou asfaltovou směsí. Tyto vrstvy se používají v minimální tloušťce 150 až 300 mm, kdy dešťová voda je odváděna zvýšeným příčným sklonem.[13]

Druh podkladní vrstvy		Minimální tloušťka nestmelených podkladních vrstev, mm, pro vozovky s návrhovou úrovní porušení									
		D0			D1			D2 a D1 TDZ VI			
		pro zeminy v podloží vozovky o uvedeném modulu přetvárnosti $E_{def,2}$									
		45	60	90	45	60	90	30	45	60	90
ochranná vrstva	ŠP ¹⁾						-	200	200		
	MZ	200	150	-	200	150	-	150 ²⁾	150 ²⁾	150 ²⁾	-
	ŠD	150	150	-	150	150	-	150	150	150	-
(spodní) podkladní vrstva	ŠD	200	200	150	200	150	150	150 ³⁾	150 ³⁾	150 ³⁾	150
	MZK	200	150	150	200	150	150	-	-	-	-

Obr. 19 Minimální tloušťky nestmelených vrstev [13]

Poznámky k obrázku č. 19:

- 1) Štěrkopísek s obsahem jemných částic do 5 % hmotnosti není vhodný, porušuje se stavební doprava, povrch se musí zpevňovat drceným kamenivem nebo recyklovatelnou asfaltovou směsí a obvykle se nedoporučuje používat.
- 2) Namísto MZ může být použit cihelný recyklát splňující požadavky ČSN 73 6126.
- 3) Minimální tloušťka, v případě ochranné vrstvy z ŠD lze podklad nahradit zvýšením tloušťky ŠD na 200 mm.[13]

3.7.2 Stavební recyklát do stmelených vrstev

Recyklované materiály do stmelených směsí se nejčastěji používají frakce 0/22 mm, 0/32 mm, 0/45 mm, případně pro prolévané vrstvy frakce 16/32 mm a 32/63 mm. Hlavním požadavkem z hlediska návrhu čáry zrnitosti směsi stmelené hydraulickým pojivem je maximální obsah jemných částic 15 % a maximální nadsítné část 15 %. [10]

Jako pojivo se doporučuje cement, případně hydraulická silniční pojiva specifikovaná v normě ČSN EN 14227-1 a 5. Recyklovaná kameniva používaná do asfaltových směsí musí mít maximální velikosti zrna 22 mm pro ložní a podkladní asfaltové vrstvy ve vozovkách s TDZ II až VI. V některých případech je možné použít recyklované kamenivo do obrusných asfaltových vrstev. Důležité je sledovat maximální množství obsahu jemných částic hrubého recyklovaného kameniva do 2 % a minimální hodnotu ohladitelnosti PSV48. [10]

Recyklované stavebně demoliční materiály vyrobené a používané pro pozemní komunikace musí jednotlivým parametry vyhovět také ekologicky-technické klasifikaci podle nové vyhlášky ministerstva životního prostředí ČR č.294/2010 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. Vyhláška specifikuje způsob posouzení ekologické vhodnosti stanovením procentního množství sušiny jednotlivých prvků a doplňuje to stanovením ekotoxicky recyklovaného kameniva. [10]

Prováděcí předpis připravované novely zákona č.185/2001 Sb., o odpadech, který by měl poskytnout limity vyjmenovaných škodlivin, zatím není v platnosti. [10]

Vrstvy stmelené hydraulickými pojivy mají vysoký modul pružnosti, ale současně jsou náchylné k trhlinám. Tyto trhliny se šíří směrem vzhůru až k asfaltovým vrstvám, kde dochází k poruchám vozovky. Tomu se dá ale předejít pomocí správné technologie, dodržáním technických předpisů. [13]

Vlastnost	Požadavky na RSM pro směsi z míchacího centra s použitím pojiva	
	cement nebo jiné hydraulické pojivo	prolévané vrstvy asfaltem, asfaltovou emulzí nebo cementovou suspenzí
Označení směsi	0/16; 0/22; 0/32; 0/45	16/32; 32/63
Max. obsah jemných částic	f_{15}	f_{15}
Kvalita jemných částic	$I_p \leq 17$	$I_p \leq 17$
Nadsítné	15 %	15 %
Požadavky na zrnitost směsi ¹⁾	Příloha A, tab. A.1	Příloha A, tab. A.2
¹⁾ Platí pro směs recyklátu (RSM) bez přidaného pojiva		

Obr. 20 Doporučené požadavky na RSM pro stmelené směsi a prolévané vrstvy [13]

Deklarované vlastnosti recyklovaného kameniva pro asfaltové směsi musí odpovídat požadavkům uvedených podle ČSN EN 13108-1 až 7 (obrázek č. 21). V případě využití recyklovaného kameniva do asfaltové směsi například pro chodníky nebo jako ložní a podkladní vrstvy jsou požadavky uvedeny v obrázku č. 20. [13]

Asfaltové směsi pro:		Obrusné vrstvy ¹⁾	Ložní a podkladní vrstvy
Typ		bez označení, CH	+
Zrnitost DK ($D \leq 2$) G_F		G_F85	
Zrnitost SK ($D \leq 5$ (16) ²⁾ a $d = 0$) G_A		G_A85	
Tolerance zrnitosti DK a SK ($D \leq 8$) G_{TC}		$G_{TC}10$	
Obsah jemných částic f		f_{16}	
Kvalita jemných částic ³⁾ MB_F		MB_F10	
Zrnitost HK ($D > 2$) G_C		$G_C85/15$	$G_C85/20$
Tolerance zrnitosti G pro D/d	< 4	$G_{20/15}$	
	≥ 4	$G_{20/17,5}$	
Obsah jemných částic f		f_2	f_4
Tvarový index SI pro horní mez zrnění	$D < 11,2$	SI_{50}	
	$D \geq 11,2$	SI_{35}	
Odolnost proti drcení LA (zkouší se na frakci 10/14 nebo 8/11)		LA_{40}	
Ochladitelnost PSV		PSV deklarovaná 48	-
Nasákavost ⁴⁾ WA_{24}		$WA_{24} 2$	
Trvanlivost síranem hořečnatým ⁵⁾ MS		MS_{18}	MS_{25}
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování F		F_4	F_4

Obr. 21 Doporučené požadavky na recyklované kamenivo pro asfaltové směsi [13]

Vysvětlivky k obrázku č. 21:

HK – hrubé kamenivo, DK – drobné kamenivo, SK – směs kameniva (např. 0/4), HDK – hrubé drcené kamenivo, DDK – drobné drcené kamenivo, SDK – směs drceného kameniva, CH – „asfaltová směs pro chodníky“, + je kvalitativní označení asfaltové směsi podle ČSN EN 13108-1.

HK – hrubé kamenivo, DK – drobné kamenivo, SK – směs kameniva (např. 0/4), HDK – hrubé drcené kamenivo, DDK – drobné drcené kamenivo, SDK – směs drceného kameniva, CH – „asfaltová směs pro chodníky“, + je kvalitativní označení asfaltové směsi podle ČSN EN 13108-1.

1) Přílnavost pojiva ke kamenivu se stanoví podle ČSN 73 6161 a musí být minimálně vyhovující.

2) U směsi kvalitativní třídy (+) lze použít směs kameniva s $D \leq 16$ mm.

3) Při obsahu jemných částic větším než 3 % hmotnosti v DDK a/nebo ve SDK se jejich kvalita ověří metodou podle ČSN EN 13043:2004, kap. 4.1.5.

4) Pokud nasákavost kameniva podle ČSN EN 1097-6, kapitoly 7 a 8 je menší než 2 % pro směsi bez označení, lze kamenivo považovat za mrazuvzdorné a není nutné stanovovat trvanlivost nebo odolnost proti zmrazování a rozmrazování. V opačném případě se provede zkouška trvanlivosti síranem hořečnatým podle ČSN EN 1367-2 nebo zkouška odolnosti proti zmrazování a rozmrazování podle ČSN EN 1367-1.

5) Ve většině případů se při stanovení trvanlivosti kameniva používá zkouška síranem hořečnatým (podle ČSN EN 1367-2) nebo síranem sodným. Je to z důvodů jednoduššího zkušební postupu a zkušebního zařízení.

6) Pokud nasákavost kameniva podle kap.7 a 8 ČSN EN 1097-6:2001 je menší než 1% hmotnosti pro asfaltové směsi s označením „S“ a „+“ nebo 2% pro směsi bez označení, lze kamenivo považovat za mrazuvzdorné a není nutné stanovovat trvanlivost nebo odolnost proti zmrazování a rozmrazování. V opačném případě se provede trvanlivost kameniva zkouškou síranem hořečnatým podle ČSN EN 1367-2, případně zkouška odolnosti proti zmrazování a rozmrazování kameniva podle ČSN EN 1367-1.

7) Pokud trvanlivost kameniva síranem hořečnatým podle ČSN EN 1367-2 splňuje uvedené požadavky, lze kamenivo považovat za mrazuvzdorné a není nutné stanovovat odolnost proti zmrazování a rozmrazování podle ČSN EN 1367-1.

Požadavky na fyzikálně mechanické vlastnosti jsou stanoveny pro směsi 0/22 mm, 0/32 mm a 0/45 mm podle obrázku č. 22. [1]

Vlastnost	Požadavky pro směsi s použitím pojiva	
	cement nebo jiné hydraulické pojivo	
	ČSN EN 14227-1, 2, 3 a 5	
Optimální frakce směsi	0/22; 0/32; 0/45	
Požadavky na zrnitost směsi ¹⁾	Příloha A, těchto TP	
Laboratorní srovnávací objemová hmotnost a optimální vlhkost	Deklarovaná hodnota	
Vlhkost ¹⁾	-3 % až +2 % w_{opt}	
Min. pevnost v tlaku R_c po 28 dnech ²⁾	$C_{3/4}$ ³⁾	
Min. odolnost proti mrazu a vodě	85 % hodnoty pevnosti v tlaku	
Min. pevnost v příčném tahu R_{it} ²⁾	po 7 dnech	0,3 MPa
Odolnost proti mrazu a vodě (7 dní na vzduchu + 7 dní ve vodě)	po 14dnech	70% R_{it}
¹⁾ Doporučené požadavky pro směs z RSM před přidáním pojiva. ²⁾ Zkouší se směs stmelená cementem podle ČSN EN 14227-1 včetně možnosti provedení stanovení pevnosti v příčném tahu. Pokud je výsledná pevnost v tlaku navržené směsi větší než 6 MPa, nemusí se provádět zkoušení odolnosti proti mrazu a vodě podle ČSN EN 14227-1 NA. ³⁾ Třídy pevnosti podle ČSN EN 14227-1, ČSN EN 14227-2, ČSN EN 14227-3 a ČSN EN 14227-5.		

Obr. 22 Doporučené požadavky na recyklované kamenivo pro asfaltové směsi [13]

3.8 Stavební recyklát z ekonomického hlediska

Aktuálním trendem je nahrazení přírodního kameniva směsnými recykláty. Z ekonomického hlediska je důležité pro použití stavebních recyklátů jejich dostupnost, frakce a druh. Recykláty se vyplatí používat pouze u staveb poblíž recyklačních center nebo ve městech, jelikož cena dopravy kolikrát převyšuje cenu materiálu za tunu. Příkladem uvádím srovnání cen stavebních recyklátů a přírodního kamene (obrázek č. 23).

V České republice nejsou podmínky pro uložení stavebního odpadu stejné jako v západních a severních zemích v Evropské unii. Západní a severní státy Evropské unie mají poplatky za uložení stavebních odpadů nižší oproti České republice. Jako příklad uvádím ceník za uložení stavebního a demoličního odpadu do recyklačního centra Dufonev r.c., a.s. (obrázek č. 24).

Frakce	Dufonev R.C. a.s.			Českomoravský šterk – lom Bílý Kámen
	Betonový recyklát	Směsný recyklát	Cihelný recyklát	
0/16	150	-	-	160
0/32	115	-	-	200
0/63	150	35	-	195
0/90	-	-	35	-
32/63	160	-	-	320

Obr. 23 Srovnání cen Dufonev r.c., a.s. a Českomoravského šterku [24], [25]

Stavební odpad v vyšším návozem	Cena za 1t [Kč + DpH]
Beton	90
Beton lehce vyztužený/znečištěný	150
Beton silně vyztužený/znečištěný	250
Cihly	270
Tašky a keramické výrobky	270
Směsi nebo oddělené frakce betonu, cihel, tašek a keramických výrobků	290
Asfaltové směsi	650
Zemina a kamení	330
Stavební odpad s drobným návozem	Cena z 1t [Kč + DpH]
Do 5 % příměsí dřeva, železa, plastů, zeminy	400
Drobné návozy do 1 tuny	600/návoz
5 - 10 % příměsí dřeva, železa, plastů, zeminy	600

Obr. 24 Ceník SOD pro rok 2020 [24]

Skládky stavebního a demoličního odpadu vyžadují rozbor ukládaného materiálu. Rozbor vzorku musí obsahovat dvě zkoušky. Obě zkoušky jsou dle vyhlášky č. 294/2005 Sb., ve znění vyhlášky č. 61/2010, 93/2013 a 387/2016 Sb. - tab. 10.1 a tab.

10.2. sl. I a II. V tabulce 10.1 je rozbor zeminy dle fyzikálních parametrů, extrahovaných kovů, Btex, obsah polycyklických aromatických uhlovodíků atd. Tabulka 10.2 obsahuje ekotoxikologické testy zeminy.

3.9 Směsný recyklát

Směsný recyklát v České republice není specifikovaný, tudíž podíl hlavních složek není přesně určen, a proto jednotlivé stavební recykláty se mohou lišit dle výrobců v jejich kvalitě. Recyklát lze rozřadit podle čáry zrnitosti, obsahu prachových částic a plnění technických požadavků na zeminy do čtyř kvalitních tříd (obrázek č. 24) [11].

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

Obr. 25 Použití směsného recyklátu v konstrukci pozemní komunikace [12]

Vlastnosti těchto materiálů musí minimálně splňovat nebo převyšovat vlastnosti přírodních materiálů, přičemž bylo zjištěno, že standartní zkoušky se nemohou plně aplikovat na recyklované materiály. Z toho důvodu byly sestaveny nové metodologie pro zkoušení recyklovaných materiálů a současně byly vytvořeny databáze technických parametrů recyklátů. Recyklované materiály musí být analyzovány z hlediska chemického složení a rizika vylučování škodlivých látek do okolního prostředí. [11]

U těchto materiálů jsou zjišťovány fyzikální a ekologické vlastnosti stavebních hmot pomocí zkoušek zrychleného stárnutí. Mezi tyto zkoušky zrychleného stárnutí řadíme zkoušku mrazuvzdornosti nebo zkoušku cyklického namáhání.[26], [27]

Problematickou vlastností směsného recyklátu může být velký podíl cihelného odpadu s jemnozrnnými částicemi, kde je vysoká otlučivost (odolnost proti drcení).

Otloukavost u směsných recyklátů byla stanovena mezi 60 až 70 %. Avšak přírodní kamenivo nabývá hodnot 40 až 50 %. Z tohoto důvodu se nedoporučuje používat směsný recyklát s vysokým obsahem cihelných částic do podkladních vrstev, nýbrž pouze do horních vrstev či podloží vozovky. Směsný recyklát je velmi vhodný pro úpravu nevhodných jemnozrnných zemin v podloží vozovek. Přítomnost cihelného drceného materiál způsobuje snížení optimální vlhkosti zeminy v podloží a po promíchání upraví nevhodnou zrnitost zeminy do použitelných hodnot. [26], [27]

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

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

Obr. 26 Použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa [2]

ML	Hlína s nízkou plasticitou	CL	Jíl s nízkou plasticitou
MI	Hlína se střední plasticitou	CI	Jíl se střední plasticitou
MH	Hlína s vysokou plasticitou	CH	Jíl s vysokou plasticitou
MV	Hlína s velmi vysokou plasticitou	CV	Jíl s velmi vysokou plasticitou
ME	Hlína s extrémně vysokou plasticitou	CE	Jíl s extrémně vysokou plasticitou

Obr. 27 Označení zemin z obrázku č. 26 [2]

Použitelnost těchto zemin pro stavbu zemního tělesa se musí posoudit podle skutečných vlastností následujícím postupem:

- 1) Pokud $w_l > 50\%$ nebo $I_c \leq 0,5$ nebo $p_d \max$, $PS < 1\ 500\ \text{kg/m}^3$ (násyp); $p_d \max$, $PS < 1\ 600\ \text{kg/m}^3$ (aktivní zóna), zeminy se musí upravit;
- 2) Musí se upravit objemově nestabilní zeminy a horniny (bobtnavé jíly a jílovité břidlice)
- 3) Pokud zeminu nelze zpracovat, protože w_n není v intervalu přípustné vlhkosti a tuto vlhkost nelze ovlivnit, nebo se jedná o zeminu stejnozrnnou (např. vátý písek), zemina se musí upravit
- 4) Další posouzení se rozlišuje podle účelu použití:
 - a) při použití do aktivní zóny se zeminy dále posoudí podle únosnosti CBR. Zeminu je možné použít bez úpravy, pokud je hodnota CBR (po sycení ve vodě po dobu 96 hodin) rovna minimálně 15 % pro podloží P III, 30 % pro podloží P II, 50 % pro podloží P I;
 - b) při použití do násypu se zeminy dále posoudí podle IBI, v případě ztužující vrstvy vrstevnatého násypu podle CBR. Zeminu je možné použít i bez úpravy, pokud je hodnota IBI rovna min. 10 % pro násyp a 5 % pro pod-

loží násypu. Pro ztužující vrstvu vrstveného násypu musí být hodnota CBR (po nasycení ve vodě po dobu 96 h) min. 10 %. Pro účely návrhu se použitelnost posoudí podle dalších vlastností (např. zhutnitelnost, pevnostní parametry, stlačitelnost apod.) [2]

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

Typ podloží	Návrhový modul pružnosti 1)	Minimální modul pružnosti 2)	Namrzavost podloží
P I	120 MPa	90 MPa	Nenamrzavé
P II	80 MPa	60 MPa, 45 MPa 3)	Mírně namrzavé až namrzavé
P III	50 MPa	45 MPa, 30 MPa 3)	Nebezpečně namrzavé

Obr. 28 Typy podloží použité v kategoričích listech vozovky [2]

- 1) Návrhový modul pružnosti pro výpočet vozovky zastupuje chování podloží pod vozovkou za vlhkosti odpovídající návrhovému vodnímu režimu při krátkodobém zatížení přejezdem vozidla. Tento dokument je obsahově identický s oficiální tištěnou verzí. Byl vytvořen v systému TP online a v žádném případě nenahrazuje tištěnou verzi. přetvárnosti stanovený podle ČSN 72 1006 charakterizuje chování podloží vozovky pod statickým zatížením po dokončení podloží a představuje kontrolní (přejímací) zkoušku dokumentující vhodnost použitého materiálu a jeho dostatečné zhutnění za vlhkosti při zpracování (v blízkosti vlhkosti optimální). Proto nemůže existovat obecný matematický vztah mezi takto definovanými moduly. Za stejných podmínek je modul pružnosti vždy vyšší než modul přetvárnosti, který zahrnuje nepružnou složku přetváření.
- 2) Modul přetvárnosti zemní pláně při použití zlepšených zemin příměsí vápna se zkouší minimálně po třech dnech po provedení a při zlepšení cementem po 7 dnech po provedení. Dosažení požadovaného modulu přetvárnosti dříve, než je uvedeno, není na závadu díla.
- 3) Platí pro D1 v případě třídy dopravního zatížení VI a pro D2, hodnota 45 MPa u podloží P II platí pro zeminy S a G, neplatí pro zlepšení příměsí pojiv.

Způsob použití		Požadované hodnoty ^{a)}		
		CBR ^{c)}	Minimální vlhkost směsi	Okamžitý index únosnosti
Aktivní zóna ^{b)}	Podloží P III	CBR ₁₅	W _{0,9}	IBI _{DV}
	Podloží P II	CBR ₃₀	W _{0,9}	IBI _{DV}
	Podloží P I	CBR ₅₀	W _{0,9}	IBI _{DV}
^{a)} Kategorie podle ČSN EN 14227-10, 11, 12, 13 a 14. ^{b)} P I, P II, P III jsou typy podloží podle zvláštního předpisu. ⁶⁾ ^{c)} Zhotovení a zrání zkušebního tělesa se provádí podle příslušné ČSN EN 14227-10 až 14.				

Obr. 29 Požadované hodnoty CBR pro upravené zeminy pro aktivní zónu.[13]

3.9.1 Zkoušky směsných recyklátů

Před užitím směsných recyklátů do podloží vozovek musí být provedeno několik funkčních zkoušek. Zkoušky jsou uvedeny v kapitole 3.9. Směsný recyklát na straně 46 a 47.

3.9.2 Sítový rozbor – zrnitost

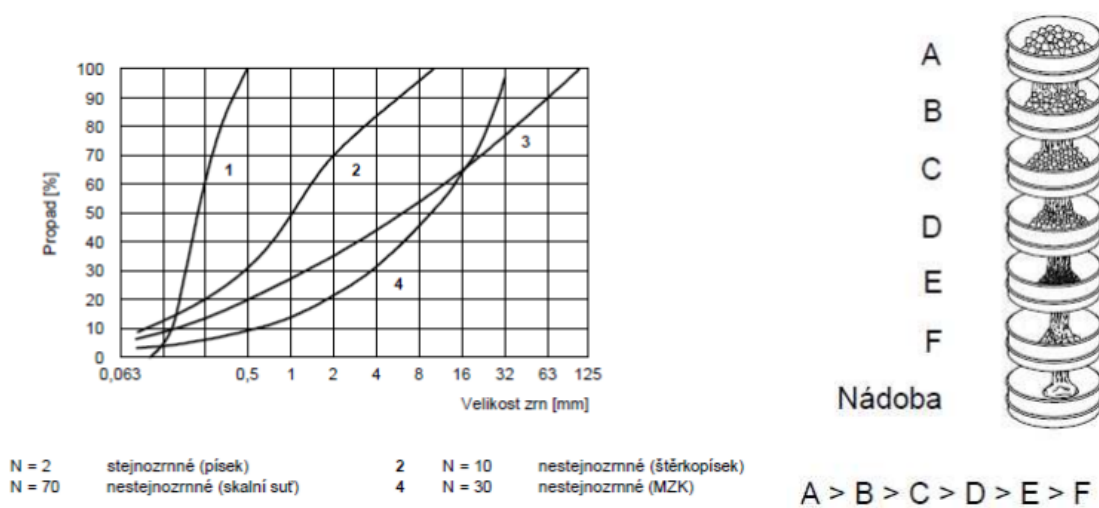
Zrnitost kameniva je určována dle normy ČSN EN ISO 17892-4. Sítový rozbor slouží k určení procentuálního zastoupení jednotlivých frakcí v daném množství směsi. Postupuje se dle těchto kroků:

Praní – vymytí jemných částic

Zkušební směs se vloží do nádoby, do které je přidáno dostatečné množství vody. Směs se promíchá s vodou, aby se očistila zrna recyklátu od jemných částic písků a jílu. Rozmočená směs je následně promývána přes nejmenší síto 0,063 mm. Poté se celá směs promyje přes sadu sít ve složení (0,063; 0,125; 0,250; 0,500; 1; 2; 4; 8; 16; 22 mm). Síta jsou prolévána čistou vodou do té doby, než bude vytékat čistá voda ze síta 0,063 mm. Následně se celá směs nechá vysušit v sušárně při (110 ± 5) °C do ustálené hmotnosti. [14]

Prosévání

Vysušená a vypraná směs se nasype na soustavu sít. Materiál se nasype na horní síto. Síta jsou sestavena od nejmenší frakce po nejvyšší (0,063; 0,125; 0,250; 0,500; 1; 2; 4; 8; 16; 22 mm). Následně se na dolní síto přidá dno, na horní síto víko a soustava sít se následně nechá mechanicky prosét. V dalším kroku se každé síto ještě manuálně proseje a poté bude na každém sítu zvážena zůstatková hmotnost navážky. V posledním kroku se výsledné hodnoty vynesou do grafu (obrázek č. 30). [14]



Obr. 30 Křivky zrnitosti a síťový rozbor [14]

3.9.3 Proctorova zkouška

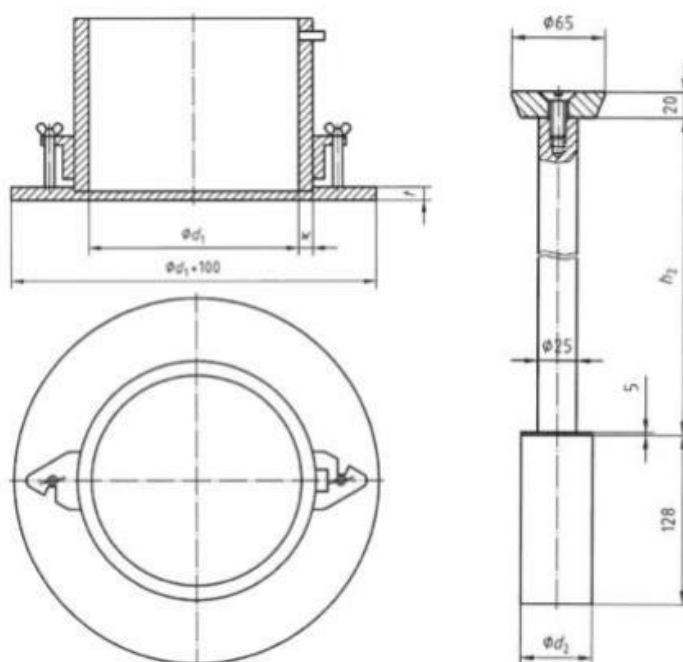
Zkouškou zajistíme zhutnitelnost zeminy za stavu maximální objemové hmotnosti $\rho_{d \max}$. Principem hutnění je vyplnění pórů mezi zrny, čímž dojde ke zvýšení objemové hmotnosti. Účinek hutnění je závislý na vlhkosti zkoumaného materiálu. Můžeme tedy říci, že čím je zkoumaný vzorek vlhčí, jeho objemová hmotnost se zvyšuje. To platí pouze do chvíle, než voda začne vyplňovat póry, která zabrání vyplnění pórů jemným materiálem. Z tohoto důvodu se určuje optimální vlhkost vzorků, abychom dosáhli maximální zhutnitelnosti daného vzorku. [15]

K této zkoušce je zapotřebí hutnicí přístroj a Proctorovy formy, které jsou specifikované v normě ČSN EN 13286-2. Nejčastěji se používají dvě metody pro zhutnění zemin, Proctor standard a Proctor modifikovaný. Proctor standard využívá pět

o hmotnosti 2,5 kg a výšku dopadu pěchu 305 ± 3 mm s celkovým počtem 3 hutnicích vrstev, kdy každá jednotlivá vrstva je hutněna 25 údery. Proctor modifikovaný využívá pech o hmotnosti 4,5 kg a výšku dopadu pěchu 457 ± 3 mm. Vzorek je hutněný v 5 vrstvách, kdy jednotlivá vrstva je hutněna 25 údery.

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 ± 3
B	$4,50 \pm 0,04$	$50,0 \pm 0,5$	457 ± 3
C	$15,00 \pm 0,04$	$125,0 \pm 0,5$	600 ± 3

Obr. 31 Rozměry hmoždířů [15]



Obr. 32 Schéma Proctorova hmoždíře [15]

3.9.4 Zkouška míry namrzavosti – přímá metoda

Zkouška se provádí pro zeminy, zlepšené zeminy a materiály, které mají více než 5 % částic menších 0,125 mm. Zeminy, které tuto podmínku nesplňují, jsou brány jako nenamrzavé. Zkouška simuluje chování zemin či materiálů, kdy ze spodu dochází k saturaci vrstvy vodou a ve vrchní části ke zchlazování vzorku teplotou $(-4 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Zkoušený vzorek musí být takto testován po dobu 5 dní (120 hodin). Během této zkoušky je napodobován účinek mrazu na vozovku při stálém vodo-tepelném režimu. Zdvih zkušební vzorku je vyjádřením postupného nárůstu ledových vrstviček, průběh tohoto nárůstu stanovuje míra namrzavosti vzorku. [16]

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

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

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

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

Obr. 33 Kritérium namrzavosti zeminy [16]

3.9.5 Zkoušky CBR a IBI

Zkoušky CBR (Kalifornský poměr únosnosti) a IBI (okamžitý index únosnosti) jsou zkoušky určené ke kontrole únosnosti jednotlivých vrstev podloží při výstavbě a jsou prováděny dle normy ČSN EN 13286-47. Princip zkoušky je založen na pronikání válcového pístu při dané rychlosti do zkušebního tělesa, čímž se zjistí vztah mezi silou a zatlačením. Zkoušený vzorek se zhutní pomocí Proctorovy zkoušky standartní nebo modifikované, kdy je použita forma B. Pro zkoušku IBI je již vzorek připraven na následné zkoušení, kdežto vzorek pro CBR musí být následně saturován 96 hodin ve vodě. Pro zatížení se použije válcový penetrační trn o průměru $50 \pm 0,5$ mm a jeho spodní konec musí být z tvrzené oceli. Zatěžovací lis musí mít minimální zatěžovací kapacitu 50 kN a rychlost penetrace $1,27 \pm 0,2$ mm/min. Zařízení měří s minimální přesností 5 N. Po ukončení měření se vytvoří křivka závislosti penetrace a zatěžovací síly. Z grafu jsou následně odečteny hodnoty síly při penetraci 2,5 a 5,0 mm a provede se porovnání vzhledem ke standartní síle, kde výsledek je uveden jako její procento.

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

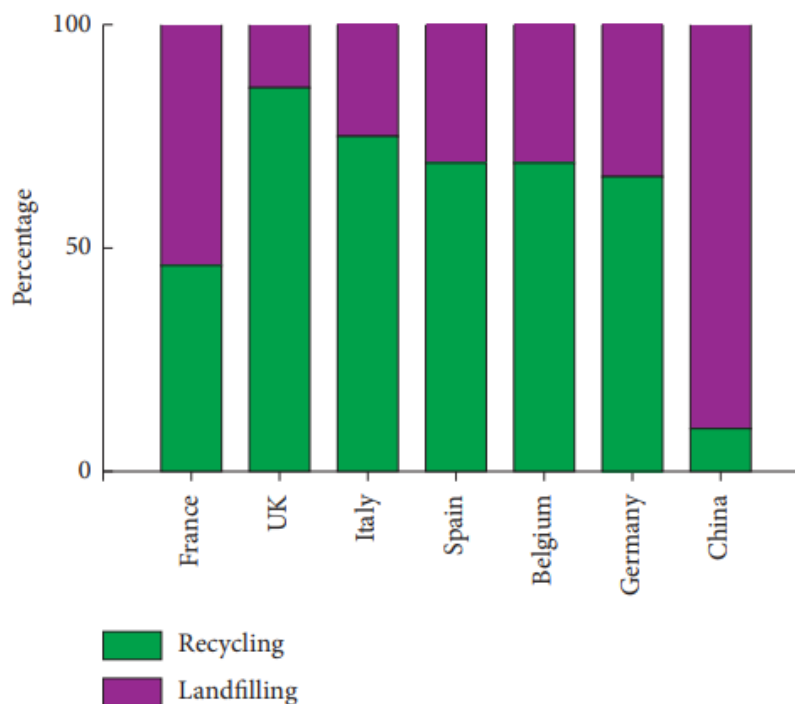
- F Síla potřebná k zatlačení trnu do stanovené hloubky ve zkoušené zemině [kN]
Fs Standartní síla potřebná k zatlačení do stanovené hloubky dle ČSN EN 13286-47 [kN]

3.10 Zkušenosti ze zahraničí

V Evropě každoročně stoupá množství vyprodukovaného stavebního a demoličního odpadu. Směrnice EU o odpadech vyžaduje zvýšenou recyklaci SOD a zavazuje se sedmdesáti procentní recyklací odpadu do roku 2020, ke které se zavázaly všechny členské země EU.

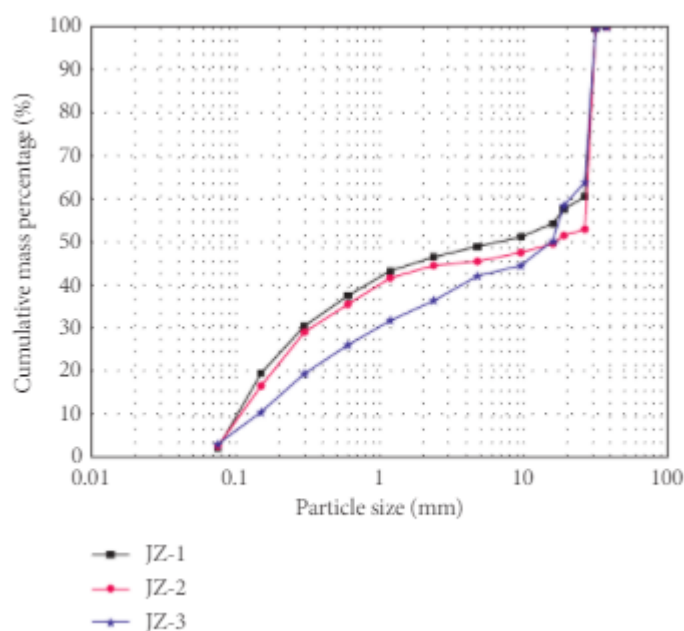
3.10.1 Čína

S rychlým rozvojem stavebnictví a zrychleným tempem urbanizace se v městských oblastech demoluje velké množství starých budov, což má za následek extrémně významné množství odpadu SOD. Stavební a demoliční odpad v Číně představuje 30 % - 40 % z celkového ročního odpadu. Zejména demolice budov o 1 m² vede k 0,5 – 1,0 m³ odpadu SOD a každých 10 000 m² výstavby povede k produkci 500 – 600 tun odpadu SOD. Průměrná roční produkce v Číně činila v období od roku 2003 do roku 2013 přibližně 2,36 miliardy tun. Odpad SOD se skládá převážně z kovu, betonu, cihel, dřeva a plastu, který by mohl být zpětně použit z 80 %. Doposud však byla většina odpadu SOD vyprodukovaného v Číně likvidována prostým skládkováním. V roce 2012 dosahovala míra recyklace pouze 9,5 %. Západní země Evropské unie v roce 2012 recyklovaly mezi 40 až 85 % SOD (obrázek č.34). [18]



Obr. 34 Zpracování odpadu SOD v Číně s jinými zeměmi (v roce 2012) [18]

V Číně byla budována silniční komunikace s obousměrným provozem, která byla navržena v násypu. Výška násypu se pohybovala mezi 2,5 až 4 metry. Z důvodu snížení celkových nákladů byl použit stavební a demoliční odpad, který pocházel z demolice místního obytného domu. Celkem bylo vyrobeno 6 zkušebních těles a ty byly následně hutněny ve 3 vrstvách s 98 údery v každé vrstvě. Výsledky laboratorních testů prokázaly, že zhutnění bylo nejlepší, pokud byl obsah vlhkosti regulován na 15 % - 16 %. Pevnost vzorku byla při optimální vlhkosti v rozmezí 0,62 MPa až 0,85 MPa. Průměrná hodnota CBR při penetraci 2,5 mm byla 34,7 %, při penetraci 5 mm 43,0 % (obrázek č.35,36). Modul pružnosti byl mezi 155 a 174 MPa. Na základě těchto výsledků byl právě SOD použit pro výstavbu silniční komunikace. [18]



Obr. 35 Výsledné hodnoty CBR vynesené v grafu [18]

TABLE 2: The results of UCS test.

Optimal moisture content conditions	Maximum pressure (P)	kN	15.0	13.0	13.5	12.5	13.5
	UCS (Rc)	MPa	0.85	0.62	0.74	0.76	0.71
Saturated conditions	Maximum pressure (P)	kN	10.9	9.7	10.1	8.9	9.4
	UCS (Rc)	MPa	0.62	0.55	0.58	0.50	0.53

TABLE 3: CBR test results of C&D waste.

Penetration (mm)	CBR (%)			Average value (%)
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	
2.5	38.6	24.1	41.4	34.7
5.0	49.3	35.7	44.0	43.0

Obr. 36 Naměřené hodnoty při penetraci 2,5 a 5 mm [18]

3.10.2 Lucembursko

Lucembursko dokázalo v roce 2012 recyklovat kolem 88,4 % svého stavebního a demoličního odpadu. Úřady mají zákonnou povinnost shromažďovat a třídit stavební a demoliční odpady v co největší míře. Pokud nejsou tříděny, měl by být směsný odpad v takové formě, kterou mohou zpracovat zařízení pro zpracování inertního odpadu. Před demolicí staveb musí být vyhotoven plán s nakládáním se stavebními odpady, včetně soupisu materiálů, kde je uvedeno, jak bude likvidován. V Lucembursku je zřízen stavební orgán, který je zodpovědný za podporu stavebního sektoru při minimalizaci od-

padu a pomáhá jim zlepšit stupeň třídění. Poskytuje bezplatný přístup k softwaru, pomocí kterého je nakládání s SOD zefektivňují. [28]

3.10.3 Německo

V roce 2016 bylo vyprodukováno 214,6 milionů tun minerálního stavebního odpadu a bylo celkem recyklováno 192,6 milionu tun (87,8 %). [19]

Recyklované materiály v nestmelených vrstvách jsou upřednostňovány při výstavbě pozemních komunikací, pro pěší a cyklistické stezky. Je to vrstva, která je vyrobena pouze z odstupňované recyklované směsi bez obsahu hydraulických pojiv. Dalším způsobem využití recyklovaného materiálu je jeho použití do ložních vrstev pro betonové či přírodní dlažby. [21]

Použití recyklovaného asfaltu je v Německu po léta nejmodernější. Pokud je asfalt odpadem při výstavbě silnic, musí být recyklován jako součást opatření pro výstavbu silnic. Hmotně nejcennějším druhem recyklace, který by se měl v zásadě hledat, je použití při výrobě nových asfaltových směsí, protože pouze tímto způsobem může být asfaltové pojivo znovu použito. Vzhledem k tomu, že asfalt je termoplastický stavební materiál, lze jej několikrát znovu použít. Předpokladem opětovného použití je mimo jiné to, že odstraňovaný asfalt neobsahuje cizí látky a škodlivé látky, například dehet. Asfaltové základní vrstvy již v průměru tvoří asi třetinu opětovně použitého asfaltu. Recyklovaný asfalt lze také použít v asfaltových obrusných vrstvách. [20]

3.10.4 Nizozemí

Nizozemí stanovilo cíl dosáhnout 90 % míry recyklace do roku 2000, které bylo dosaženo už v roce 1999. Předepisují certifikační schémata pro 23 demoličních procesů, které kontroluje Rada pro akreditaci. Pro certifikaci se postupuje podle následujících čtyř kroků:

1. Plán před demolicí: Zhotovitel demolice provádí soupis odpadů, které budou vytvořeny, spolu s možnými riziky při demolici a bezpečnostními riziky pro okolí.

2. Plán nakládání s odpady: V tomto kroku zhotovitel demolice vypracuje plán nakládání s odpady popisující plánovaný způsob demolice a odstranění vzniklého odpadu.
3. Realizace: Během provádění demolice je dodržován plán pro nakládání s odpady, který je striktně dodržován. Certifikovaní zhotovitelé demolice spolupracují s odborníky životního prostředí.
4. Závěrečná zpráva: Po dokončení projektu zhotovitel demolice vypracuje závěrečnou zprávu obsahující informace o vzniklém stavebním odpadu a následně je tato zpráva předána zákazníkovi.

Stavební a demoliční materiál pro opětovné použití se dělí do dvou kategorií na základě emisí a složení vybraného vzorku. Hodnoty emisí jsou stanoveny na základě maximálního množství vybraných anorganických složek, které se mohou následně rozptýlit do povrchových vod a půdy. Maximální hodnoty jsou stanoveny z výsledků výluhových zkoušek, které ale nemohou určit množství organických látek v materiálech.

Do kategorie 1 patří materiály, které nepřekračují žádný ze stanovených limitů. Ty mohou být použity bez dalších ochranných opatření. Materiály z kategorie 2 nepřekračují schválené hodnoty obsahu organických složek, ale nesplňují limity pro anorganické složky bez potřeby použití ochranných prostředků. Tyto materiály mohou být použity, pokud jsou technologicky izolovány a konečné hodnoty nepřekračují stanovené limity. Výjimku tvoří některé materiály, které nelze zařadit ani do jedné z těchto kategorií.[22]

3.10.5 Švédsko

Recyklované betony jsou klasifikovány do čtyř tříd, 1, 2, 3 a 4, podle jejich materiálových vlastností. Třídou 1 nebo 2 lze použít do podloží nebo do podkladních vrstev s nízkým dopravním zatížením, především se jedná o pěší komunikace nebo cyklostezky. Třída 3 může být použita jako krycí vrstva, třída 4 jako výplňový materiál. Kvalita každé třídy byla založena na vlastnostech betonu před drcením dle normy EN 12390-3 pro pevnost betonu v tlaku. Minimální požadavky na pevnost v tlaku betonu pro třídu 1 byly stanoveny na 30 MPa a pro 2 třídu na pevnost 20 MPa. Obrázek č. 37 poskytuje

shrnutí některých klíčových vlastností recyklovaných materiálů pro třídy 1 a třídy 2. Je nutno podotknout, že základní hornina ve Švédsku je žula. [23]

RCA Property	Class 1	Class 2
E-Modulus MPa	450	450
Optimum moisture content %	6	6
Maximum dry density kN/m ³	18	18
Porosity	0.32	0.32
Water saturation ratio	0.34	0.34
Micro-deval max	25	35
Foreign Material Limits		
Crushed concrete content % (min)	100	95
High density brick > 1.6 Mg/m ³ % (max)	0	5
Low density concrete < 1.6 Mg/m ³ % (max)	0	1.0
Other materials such as wood, plastics, etc % (max)	0	0.5

Obr. 37 Požadavky na betonové recykláty [23]

4 Praktická část

Praktická část diplomové práce se zabývá zkoušením směsného recyklátu a ověřením, jestli může nahradit běžně užívané přírodní materiály v podloží vozovek. Byly provedeny zkoušky geometrických vlastností kameniva pomocí síťového rozboru dle ČSN EN 933-1 pro 5 různých směsných recyklátů. Následně byly vytvořeny tři směsi směsného recyklátu. Jednalo se o čistý směsný recyklát, směsný recyklát s obsahem hlíny a směsný recyklát s obsahem jílu. U těchto tří vzorku byly provedeny zkoušky nestmelených směsí. Zkouška stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a optimální vlhkosti – Proctor modifikovaný dle normy ČSN EN 13286-2. Po vyhodnocení výsledků optimální vlhkosti byla vyrobena zkušební tělesa pro stanovení míry namrzavosti zemin dle normy ČSN 72 1191. Poslední zkouškou bylo stanovení poměru únosnosti CBR a okamžitého indexu únosnosti IBI dle ČSN EN 13286-47.

4.1 Použité materiály

Zkoušky byly prováděny v laboratoři pozemních komunikací, FAST, VUT Brno. Pro zkoušení byly dodány směsné recykláty frakce 0/32 mm z recyklační linky Dufonev R.C., a.s., která sídlí v Brně. Směsné recykláty byly odlišné svým složením, jeden recyklát byl převážně cihelný a druhý kamenitý. Hlína a jíl byly dodány také z recyklační linky.

4.2 Zkoušky

4.2.1 Stanovení zrnitosti

Tato zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozborový rozbor.

Podstatou této zkoušky je prosévání materiálu přes zkušební síta se sestupnou velikostí ok propadu, z důvodu zjištění zastoupení jednotlivých frakcí. Pro zkoušené recykláty byla použita síta od 22 mm po nejmenší síto 0,063 mm. Nejdříve byly jednotlivé směsi promývány přes sadu sít, aby byla zrna zbavena jemných částic, které by nám mohly výsledky zkoušek ovlivnit. Praní vzorku bylo ukončeno, až ze spodního síta

0,063 mm vytékala čistá voda. Následně testované směsi byly vloženy do sušárny, kde byly sušeny při teplotě $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ do ustálení hmotnosti. Po vysušení byla síta mechanicky proseta a následně po mechanickém prosetí byla ještě proseta manuálně, aby došlo k eliminování možné chyby výsledku. Po prosévání byly zváženy zůstatky recyklovaného materiálu na jednotlivých sítích, které byly poté následně vyhodnoceny a vloženy do grafu, čímž byla získána křivka zrnitosti.



Obr. 38 Horkovzdušná sušící komora



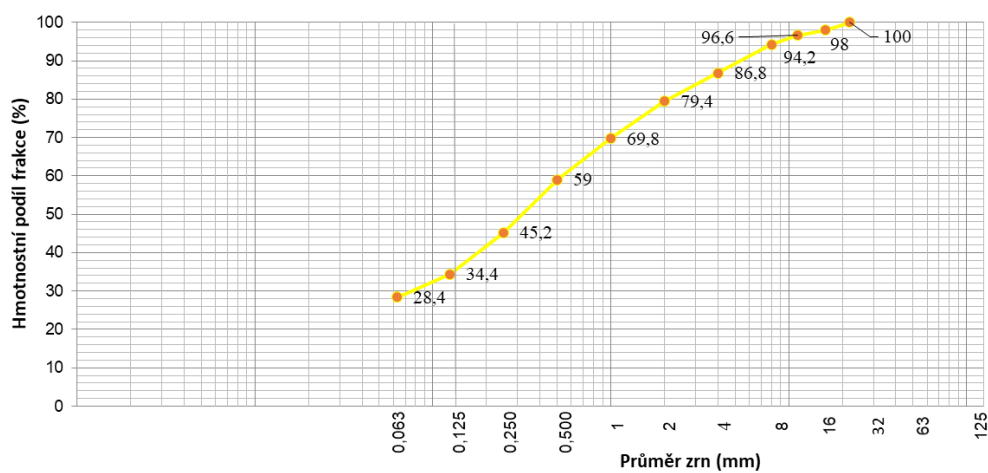
Obr. 39 Zhotovená tělesa směsného recyklátu

Vyhodnocení zkoušky:

Tab. 1 Tabulka zrnitosti směsného recyklátu MZ 36, frakce 0/32 mm

Vzorek MZ 36 = 500 g				
Síta [mm]	Hmotnost dílčího zbytku na síti [g]	Zastoupení frakce na síti [%]	Celkové frakce na síti [%]	Celkový propad sí- tem [%]
22	0	0	0	100
16	10	2	2	98
11,2	7	1,4	3,4	96,6
8	12	2,4	5,8	94,2
4	37	7,4	13,2	86,8
2	37	7,4	20,6	79,4
1	48	9,6	30,2	69,8
0,5	54	10,8	41	59
0,25	69	13,8	54,8	45,2
0,125	54	10,8	65,6	34,4
0,063	30	6	71,6	28,4
dno	142	28,4	100	0
Suma	500	100	-	-

Vzorek MZ 36 = 500g

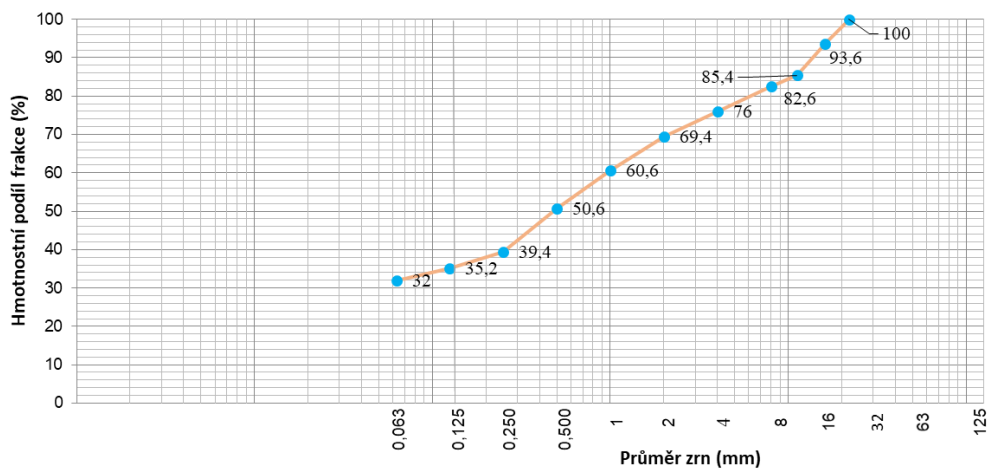


Obr. 40 Křivka zrnitosti směsného recyklátu MZ 36, frakce 0/32 mm

Tab. 2 Tabulka zrnitosti směšného recyklátu MZ 6505, frakce 0/32 mm

Vzorek 6505 = 500 g				
Síta [mm]	Hmotnost dílčího zbytku na síti [g]	Zastoupení frakce na síti [%]	Celkové frakce na síti [%]	Celkový propad sí- tem [%]
22	0	0	0	100
16	32	6,4	6,4	93,6
11,2	41	8,2	14,6	85,4
8	14	2,8	17,4	82,6
4	33	6,6	24	76
2	33	6,6	30,6	69,4
1	44	8,8	39,4	60,6
0,5	50	10	49,4	50,6
0,25	56	11,2	60,6	39,4
0,125	21	4,2	64,8	35,2
0,063	16	3,2	68	32
dno	160	32	100	0
Suma	500	100	-	-

Vzorek 6505 = 500g

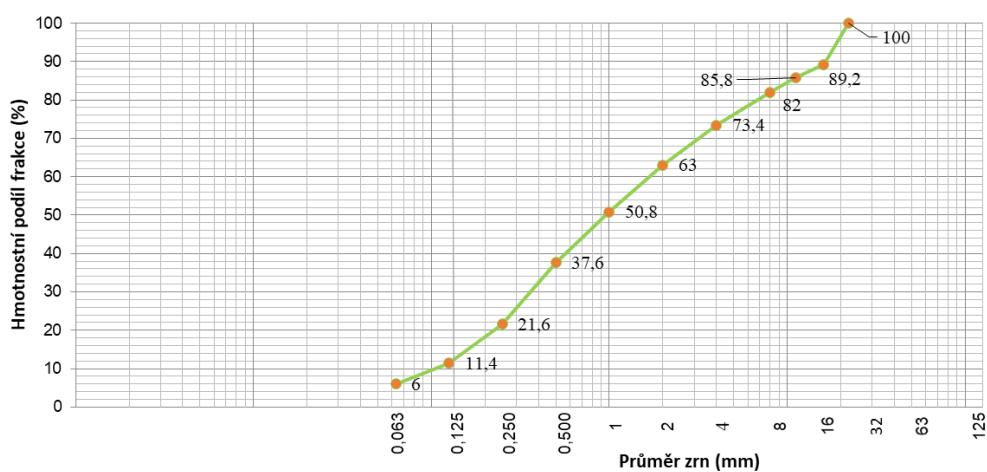


Obr. 41 Křivka zrnitosti směšného recyklátu MZ 6505, frakce 0/32 mm

Tab. 3 Tabulka zrnitosti směsného cihelného recyklátu, frakce 0/32 mm

Vzorek Cihelný = 500 g				
Síta [mm]	Hmotnost dílčího zbytku na síť [g]	Zastoupení frakce na síť [%]	Celkové frakce na sítě [%]	Celkový propad sí- tem [%]
22	0	0	0	100
16	54	10,8	10,8	89,2
11,2	17	3,4	14,2	85,8
8	19	3,8	18	82
4	43	8,6	26,6	73,4
2	52	10,4	37	63
1	61	12,2	49,2	50,8
0,5	66	13,2	62,4	37,6
0,25	80	16	78,4	21,6
0,125	51	10,2	88,6	11,4
0,063	27	5,4	94	6
dno	30	6	100	0
Suma	500	100	-	-

Vzorek Cihelný = 500g

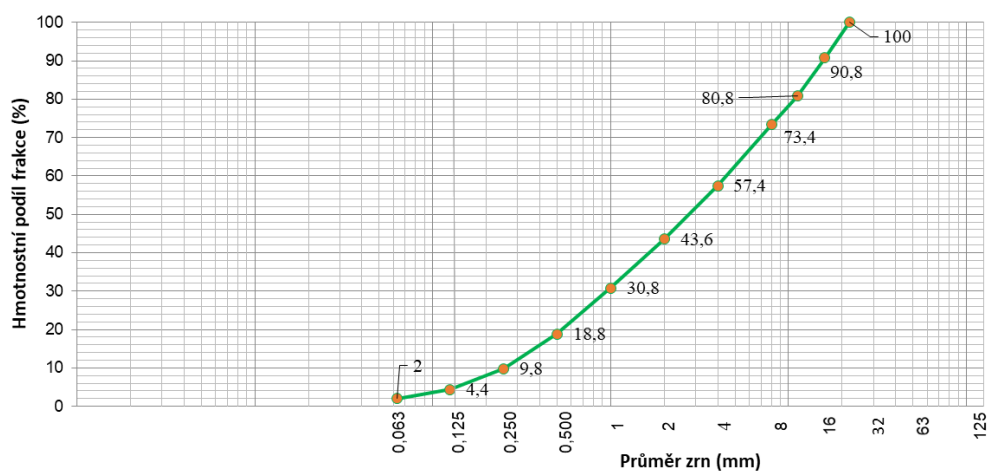


Obr. 42 Křivka zrnitosti směsného cihelného recyklátu, frakce 0/32 mm

Tab. 4 Tabulka zrnitosti směšného recyklátu s obsahem hlíny, frakce 0/32 mm

Vzorek MZ 46 = 500 g				
Síta [mm]	Hmotnost dílčího zbytku na síti [g]	Zastoupení frakce na síti [%]	Celkové frakce na síti [%]	Celkový propad sí- tem [%]
22	0	0	0	100
16	46	9,2	9,2	90,8
11,2	50	10	19,2	80,8
8	37	7,4	26,6	73,4
4	80	16	42,6	57,4
2	69	13,8	56,4	43,6
1	64	12,8	69,2	30,8
0,5	60	12	81,2	18,8
0,25	45	9	90,2	9,8
0,125	27	5,4	95,6	4,4
0,063	12	2,4	98	2
dno	10	2	100	0
Suma	500	100	-	-

Vzorek MZ 46 = 500g

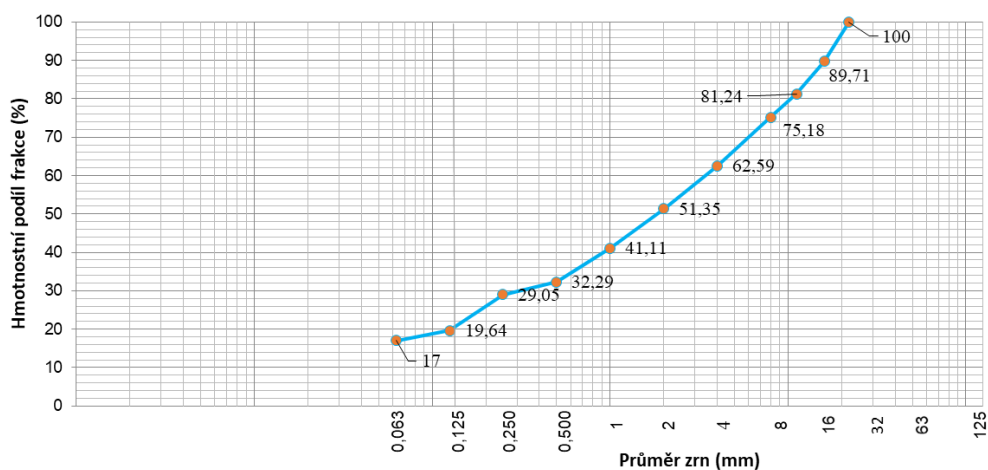


Obr. 43 Křivka zrnitosti směšného recyklátu s obsahem hlíny, frakce 0/32 mm

Tab. 5 Tabulka zrnitosti směsného recyklátu s obsahem jílu, frakce 0/32 mm

Vzorek Jílový = 1700 g				
Síta [mm]	Hmotnost dílčího zbytku na síti [g]	Zastoupení frakce na síti [%]	Celkové frakce na síti [%]	Celkový propad sí- tem [%]
22	0	0	0	100
16	175	10,29	10,29	89,71
11,2	144	8,47	18,76	81,24
8	103	6,06	24,82	75,18
4	214	12,59	37,41	62,59
2	191	11,24	48,65	51,35
1	174	10,24	58,89	41,11
0,5	150	8,82	67,71	32,29
0,25	55	3,24	70,95	29,05
0,125	160	9,41	80,36	19,64
0,063	44	2,59	83	17
dno	290	17,06	100	0
Suma	1700	100	-	-

Vzorek Jílový = 1700



Obr. 44 Křivka zrnitosti směsného recyklátu s obsahem jílu, frakce 0/32 mm

4.2.2 Proctorova zkouška

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

Zkušební vzorky byly vyrobeny Proctorovou modifikovanou zkouškou. Celkem byly zkoušeny tři druhy směšného recyklátu:

- Směsný recyklát
- Směsný recyklát s obsahem hlíny (50:50)
- Směsný recyklát s obsahem jílu (50:50)

Od každého směšného recyklátu bylo namícháno 5 zkušebních navážek, které se lišily množstvím vody. Množství vody bylo zvoleno mezi 3 až 5 % hmotnosti vzorku. Po přimíchání daného množství vody, byly navážky ponechány 24 hodin v klidu, aby se dosáhlo optimálního provlhčení celé směsi. Po uplynutí 24 hodin bylo možné vyrobit zkušební tělesa.

Zkušební vzorky byly hutněny v Proctorově formě typu A, na kterou byl připevněn plnicí nástavec. Vzorek byl plněn celkem v 5 vrstvách hutněných po 25 úderech. Po dokončení poslední vrstvy byl plnicí prstenec odejmut a horní povrch zkušebního vzorku byl zapraven pomocí pravítka a jemnozrnného materiálu. Následně byl vzorek z formy vyjmut a rozbit, aby mohla být z jeho středu odebrána navážka o hmotnosti 100 g. Ta byla zvážena a umístěna do sušárny, ve které byla vysušena. Po vysušení byla opět zvážena, aby byla zjištěno původní nasycení počáteční směsi. Výsledné hodnoty byly vyneseny do grafu, ze kterého byla odečtena optimální hodnota nasycení.



Obr. 45 Připravená směs recyklátu s obsahem hlíny



Obr. 46 Příprava tělesa s obsahem hlíny

Obr. 47 Vyrobené těleso s obsahem hlíny

Vyhodnocení zkoušky

Výpočet objemové hmotnosti vlhké směsi

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

Výpočet objemové hmotnosti suché směsi

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

Celková hmotnost vzorku

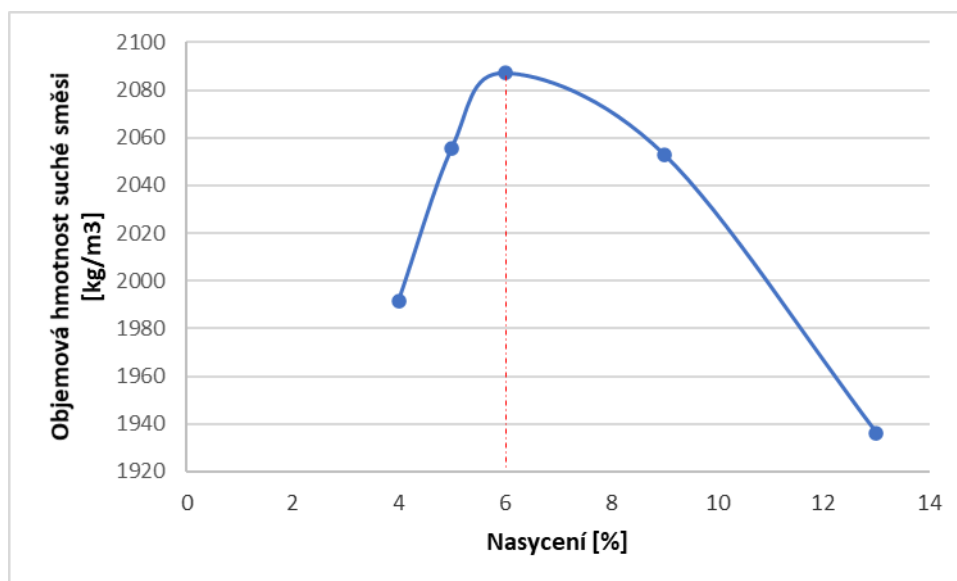
$$W = \frac{m - m_D}{m_D} \cdot 100 \text{ [%]}$$

m_2	je hmotnost formy a zhutněné směsi [g]
m_1	je hmotnost formy [g]
V	je objem formy [cm ³]
ρ_D	je objemová hmotnost suché směsi [kg/m ³]
ρ	je objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi [kg/m ³]
w	je vlhkost směsi [%]
m	je celková hmotnost vzorku [g]
m_D	je hmotnost vysušeného vzorku [g]

Vyhodnocení

Tab. 6 Tabulka: Vyhodnocení vzorku směsný recyklát

Vzorek - Směsný recyklát							
číslo vzorku	Celková hmotnost vlhkého vzorku [g]	Celková hmotnost nasyceného [g]	Procentuální podíl vody [%]	Celková hmotnost po vysušení [g]	Nasycení [%]	Celková hmotnost vzorku po vysušení [g]	Objemová hmotnost suché směsi [kg/m ³]
1	1952	100	3	96	4	1873,92	1991,48
2	2034	100	4	95	5	1932,30	2055,37
3	2085	100	5	94	6	1959,90	2087,03
4	2109	100	6	91	9	1919,19	2052,95
5	2062	100	7	87	13	1793,94	1936,15



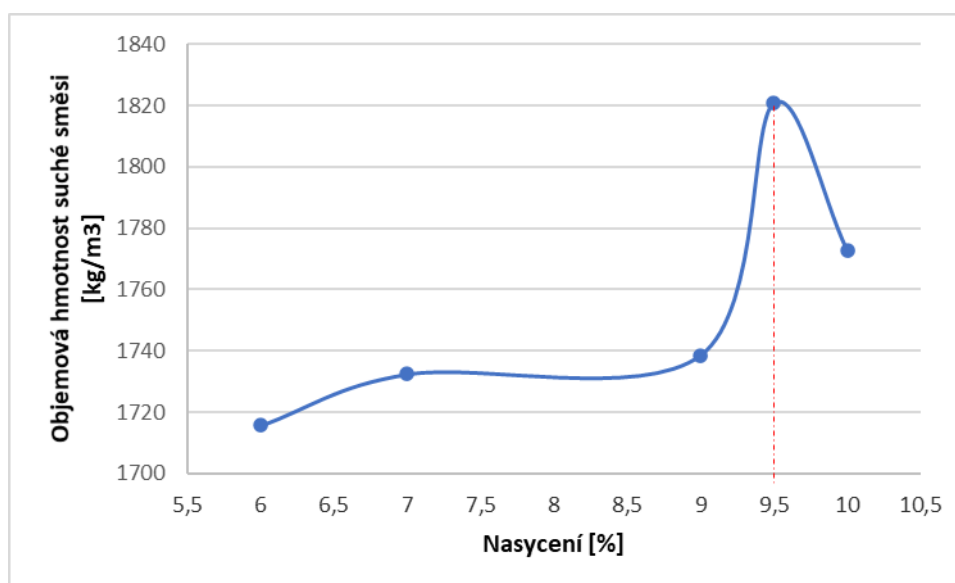
Obr. 48 Proctorova křivka směsného recyklátu, optimální vlhkost 6,0 %

Optimální vlhkost směsného recyklátu $w_{opt} = 6,0 \%$

Maximální objemová hmotnost směsného recyklátu $\rho_d = 2087 \text{ kg/m}^3$

Tab. 7 Tabulka: Vyhodnocení vzorku směsný recyklát s obsahem hlíny

Vzorek směsný recyklát s obsahem hlíny							
číslo vzorku	Celková hmotnost vlhkého vzorku [g]	Celková hmotnost nasyceného [g]	Procentuální podíl vody [%]	Celková hmotnost po vysušení [g]	Nasycení [%]	Celková hmotnost vzorku po vysušení [g]	Objemová hmotnost suché směsi [kg/m ³]
1	1714	100	3	94	6	1611,16	1715,67
2	1747	100	4	93	7	1624,71	1732,36
3	1786	100	5	91	9	1625,26	1738,54
4	1879	100	6	90,5	9,5	1700,50	1820,71
5	1838	100	7	90	10	1654,20	1772,89



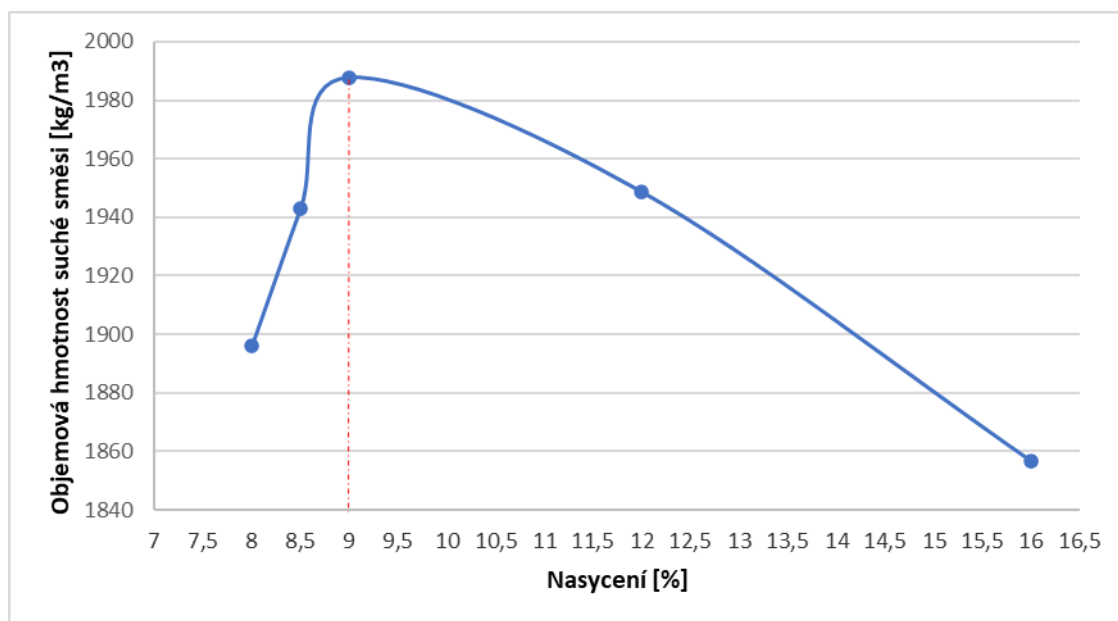
Obr. 49 Proctorova křivka směsného recyklátu s obsahem zeminy, optimální vlhkost 9,5 %

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

Maximální objemová hmotnost směsného recyklátu s hlínou $\rho_d = 1820 \text{ kg/m}^3$

Tab. 8 Tabulka: Vyhodnocení vzorku směsný recyklát s obsahem jílu

Vzorek směsný recyklát s obsahem jílu							
číslo vzorku	Celková hmotnost vlhkého vzorku [g]	Celková hmotnost nasyceného [g]	Procentuální podíl vody [%]	Celková hmotnost po vysušení [g]	Nasycení [%]	Celková hmotnost vzorku po vysušení [g]	Objemová hmotnost suché směsi [kg/m ³]
1	1930	100	0	92	8	1775,60	1896,11
3	1987	100	1	91,5	8,5	1818,11	1943,11
2	2042	100	2	91	9	1858,22	1987,73
4	2057	100	3	88	12	1810,16	1948,70
5	2030	100	4	84	16	1705,20	1856,81



Obr. 50 Proctorova křivka směsného recyklátu s obsahem jílu, optimální vlhkost 9 %

Optimální vlhkost směsného recyklátu s jílem $w_{opt} = 9 \%$

Maximální objemová hmotnost směsného recyklátu s jílem $\rho_d = 1987 \text{ kg/m}^3$

4.2.3 Míra namrzavosti zemin

Zkoušení bylo prováděno podle platné normy ČSN 72 1191 Zkoušení míry namrzavosti zemin. Jedná se o přímou metodu, jejíž podstatou je napodobit účinky mrazu na saturované podloží vozovky, kdy jsou vzorky syceny vodou a dochází k postupnému mrazovému zdvihu způsobeného vytvářením ledových vrstviček.

Příprava a výroba směsí zkoušených recyklátů byla identická s tělesy pro Proctorovu zkoušku, s tím rozdílem, že každá směs byla namíchána s optimálním nasycením vody. Po namíchání byly vzorky opět ponechány 24 hodin, aby se vlhkost ve zkoušeném materiálu co nejvíce z homogenizovala. Následně byly zhotoveny za pomoci Proctor modifikovaný 4 tělesa od každé zkoušené směsi. Každé těleso hutněno pomocí 5 vrstev s 25 údery na jednu vrstvu. Výška dopadu pěchu byla z výšky 457 mm podle normy ČSN EN 13286-2. Po dokončení hutnění byl opět sejmuto nástavec a výška horního povrchu zkoušeného tělesa byla zarovnána s horním okrajem formy typu A, následně byl vzorek opatrně vyjmut z Proctorovy formy. Připravené vzorky byly vloženy do simulačního zařízení a opatřeny zkušebními buňkami. Na takto připravené vzorky byla připevněna mrazicí deska, závaží a zařízení, které snímá mrazové zdvihy. Zkušební proces trval 5 dnů po dobu 120 hodin. Po celou dobu byly vzorky saturovány a při horním povrchu ochlazovány na teplotu - 4 °C. Měřicí snímače byly upevněny ve středu horní podstavky a monitorují časový průběh zdvihu v milimetrech.



Obr. 51 Příprava optimálně nasyceného směsného recyklátu s obsahem hlíny



Obr. 52 Připravená tělesa recyklátu s obsahem hlíny pro zkoušku míru namrzavosti



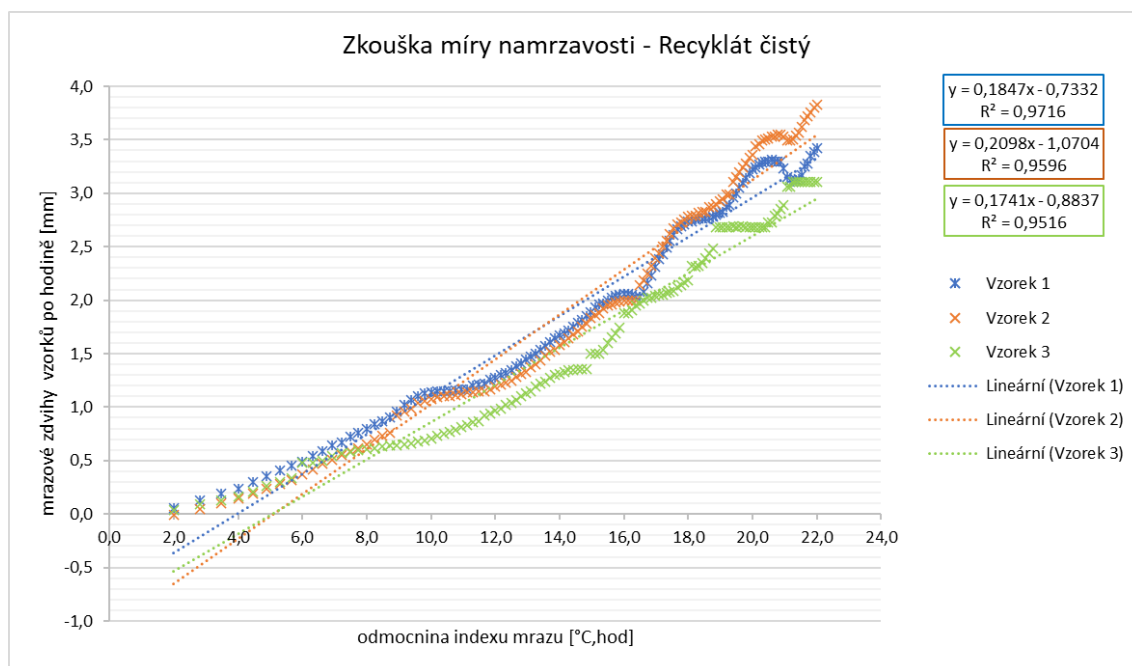
Obr. 53 Tělesa vložena do chladicího zařízení

Obr. 54 Tělesa vložena do chladicího zařízení (detail)



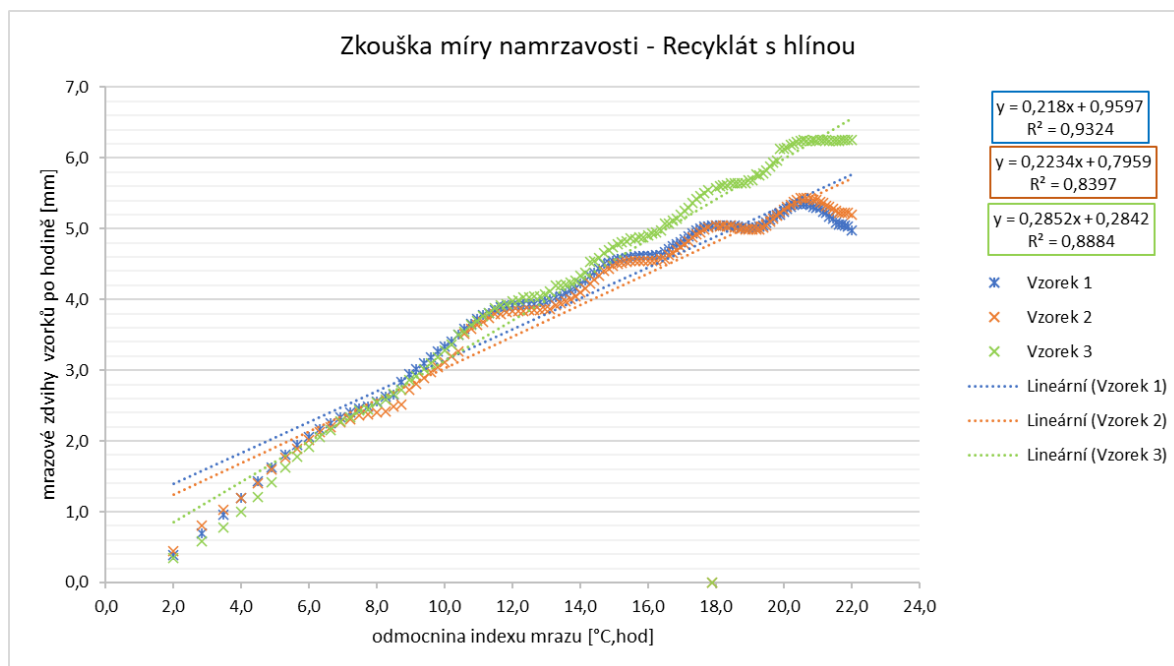
Obr. 55 Tělesa po zkoušce míry namrzavosti – recyklát s obsahem hlíny

Vyhodnocení zkoušky



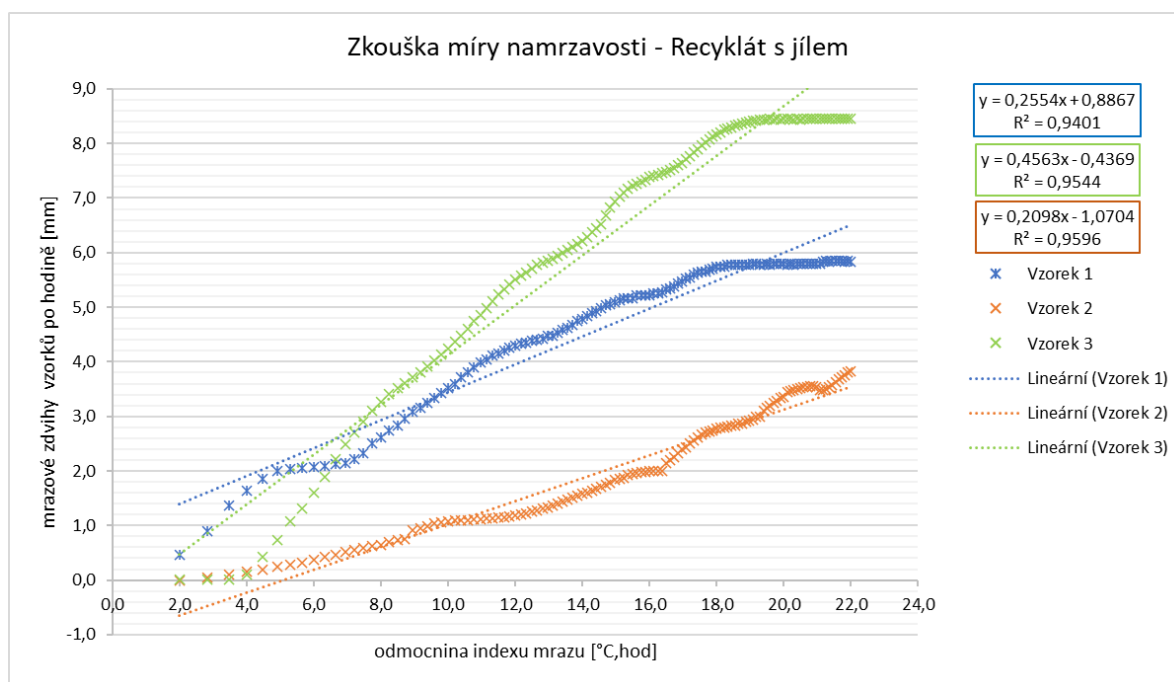
Obr. 56 Výsledné křivky míry namrzavosti směsného recyklátu

Na obrázku č. 56 jsou vyneseny hodnoty závislosti odmocniny indexu mrazu a mrazových zdvihů směsného recyklátu. Graf obsahuje 3 vzorky, na kterých byla měřena míra namrzavosti. Vzorek č. 1 je popsán rovnicí přímky $y = 0,1847x - 0,7332$, která zahrnuje součinitel mrazu $\beta_1 = 0,1847$. V tabulce (příloha č.1) je vypočítaná $\beta_1 = 0,186$. Vzorek č. 2 nabývá hodnoty $y = 0,2098x - 1,0704$, kdy $\beta_2 = 0,209$. Vypočítaná $\beta_2 = 0,226$. Vzorek č. 3 odpovídá rovnici přímky $y = 0,174x - 0,8837$, kdy $\beta_3 = 0,174$. Vypočítaná $\beta_3 = 0,182$. Výsledný součinitel $\beta = 0,196$, který řadí směsný recyklát mezi nenamrzavé zeminy.



Obr. 57 Výsledné křivky míry namrzavosti směsného recyklátu s hlínou

Obrázek č. 57 zobrazuje závislost odmocniny indexu mrazu na mrazových zdvihích. Vzorek č. 1 je popsán rovnicí přímky $y = 0,218x + 0,9597$, která zahrnuje součinitel mrazu $\beta_1 = 0,218$. V tabulce (příloha č.1) je vypočítaná $\beta_1 = 0,161$. Vzorek č. 2 nabývá hodnoty $y = 0,2234x + 0,7959$, kdy $\beta_2 = 0,223$. Vypočítaná $\beta_2 = 0,188$. Vzorek č. 3 odpovídá rovnici přímky $y = 0,2852x + 0,2842$, kdy $\beta_3 = 0,285$. Vypočítaná $\beta_3 = 0,264$. Výsledný součinitel $\beta = 0,204$, který řadí směsný recyklát s obsahem hlíny mezi nenamrzavé zeminy.



Obr. 58 Výsledné křivky míry namrzavosti směsného recyklátu s jílem

Obrázek č. 58 zobrazuje závislost odmocniny indexu mrazu na mrazových zdvihích. Vzorek č. 1 je popsán rovnicí přímky $y = 0,2554x + 0,8867$, která zahrnuje součinitel mrazu $\beta_1 = 0,255$. V tabulce (příloha č.1) je vypočítaná $\beta_1 = 0,211$. Vzorek č. 2 nabývá hodnoty $y = 0,2098x - 1,0704$, kdy $\beta_2 = 0,209$. Vypočítaná $\beta_2 = 0,255$. Vzorek č. 3 odpovídá rovnici přímky $y = 0,4563x - 0,4369$, kdy $\beta_3 = 0,456$. Vypočítaná $\beta_3 = 0,367$. Výsledný součinitel $\beta = 0,277$, který řadí směsný recyklát s obsahem jílu mezi mírně namrzavé až namrzavé zeminy.

4.2.4 Zkouška IBI a CBR

Zkoušení bylo prováděno dle normy ČSN EN 13286-47 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 47: Zkušební metoda pro stanovené kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání. Cílem této zkoušky je stanovení IBI (okamžitý index únosnosti) a CBR (kalifornský poměr únosnosti) pro zkoušený vzorek, kdy do zkušební vzorku proniká válcový píst o průřezu $50 \pm 0,5$ mm s rychlostí $1,27 \pm 0,2$ mm/min.

Nejdříve byly připraveny navážky jednotlivých vzorků, každý vzorek o celkové hmotnosti 15 kg. Tyto navážky byly ponechány celkem 4 dny v sušárně při teplotě 105 °C, aby se dosáhlo úplného vysušení. Následně každý vzorek byl upraven na jeho optimální vlhkost, aby z nich byla vyrobena zkušební tělesa dle normy ČSN EN 13286-2. Pro zhutnění těchto těles byla použita Proctorova forma typu B, která má průměr 150 mm a výšku 120 mm. Hutnicí pěch pro typ B váží 4,5 kg a dopadá z výšky 457 mm. Tělesa byla hutněna celkem v 5 vrstvách po 56 úderech v jednotlivé vrstvě. Takto připravené vzorky byly jednotlivě vloženy do zatěžovacího lisu. Válcový píst se umístil doprostřed vzorku a následně bylo spuštěno měření. Po ukončení měření byl horní povrch vzorků po penetraci válce zapraven a jednotlivé vzorky byly otočeny, aby zapravený povrch byl vespod formy. Vzorky byly vloženy do nádoby s vodou, kde byly plně ponořeny a zatíženy po dobu 4 dny / 96 hodin. Po skončení saturace byly vzorky ponechány 15 minut na suchu, aby přebytečná voda odkapala. Poté byly vzorky vloženy do zatěžovacího lisu, kde byly zatěžovány jako u zkoušky IBI s tím rozdílem, že na formu bylo vloženo závaží, které simulovalo přitížení od horních vrstev.

Výsledné hodnoty ze zatěžovacích zkoušek, byly vyneseny do grafů, kde na ose x byly hodnoty zdvihů (penetrace) a na ose y hodnoty zatěžovací síly.



Obr. 59 Zhotovené těleso pro zkoušku IBI, recyklát s obsahem hlíny



Obr. 60 Tělesa saturovaná pro zkoušku CBR



Obr. 61 Ukončení zkoušky IBI, Směsný recyklát s hlínou



Obr. 62 Vzorek směšného recyklátu s hlinou po penetraci , zkouška IBI

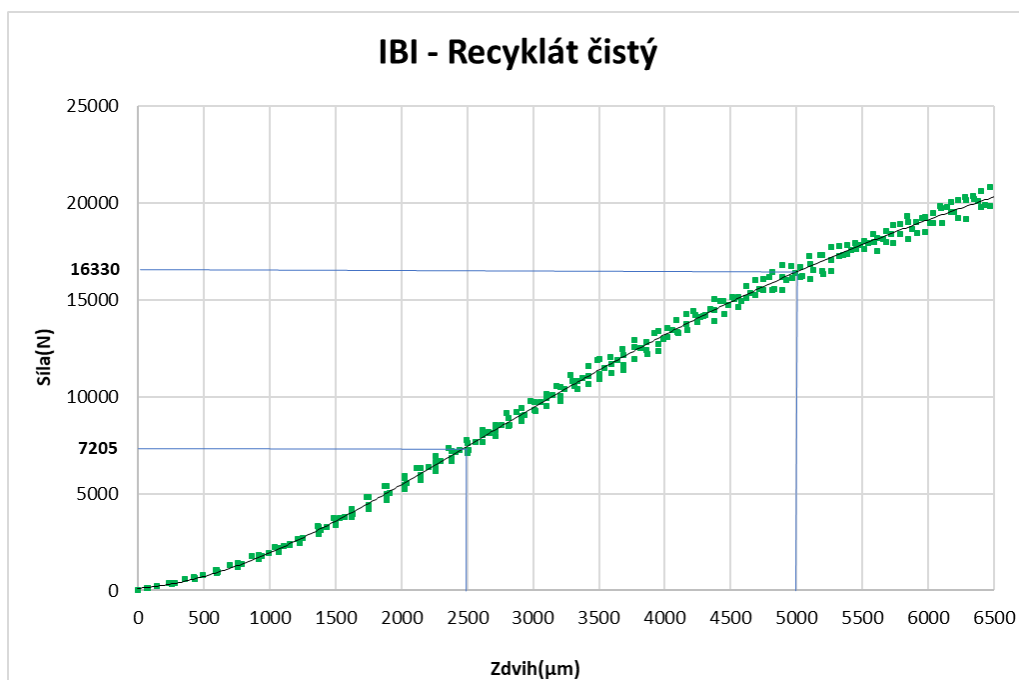


Obr. 63 Saturevaný vzorek směšného recyklátu s jílem po penetraci, zkouška CBR

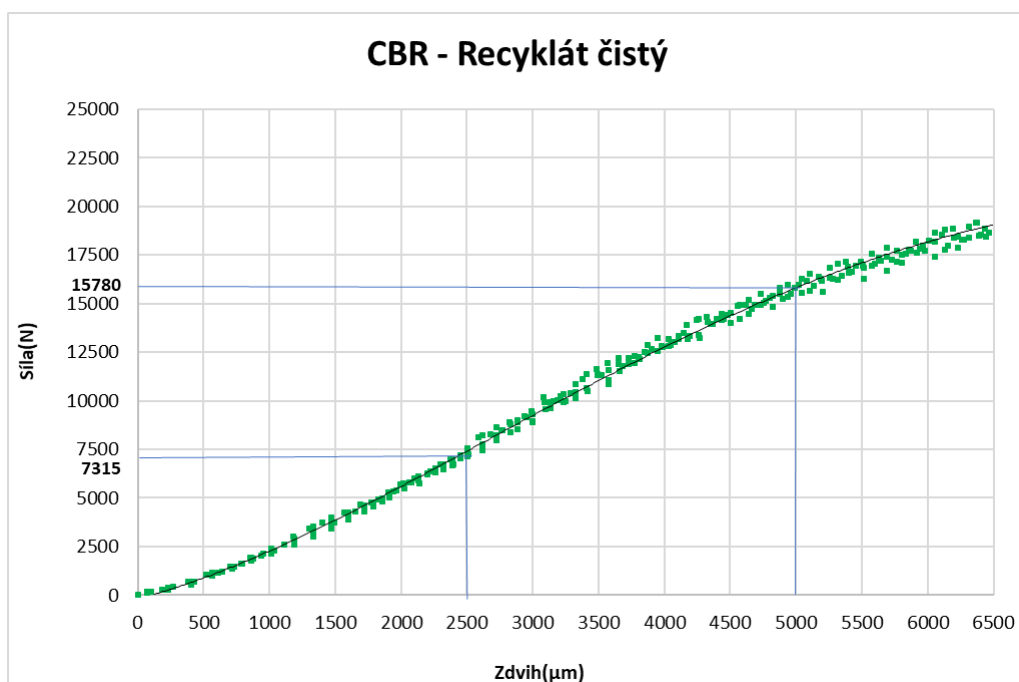


Obr. 64 Rozebrání formy typu B, Saturevaný vzorek směšného recyklátu s jílem

Vyhodnocení zkoušky



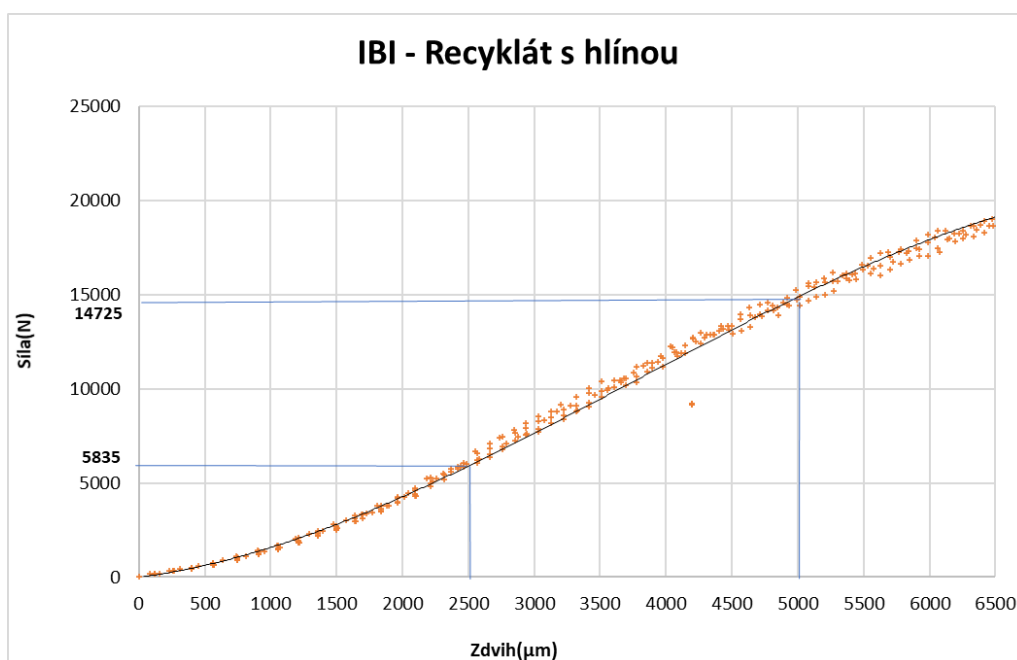
Obr. 65 Vyhodnocení zkoušky IBI, směsný recyklát



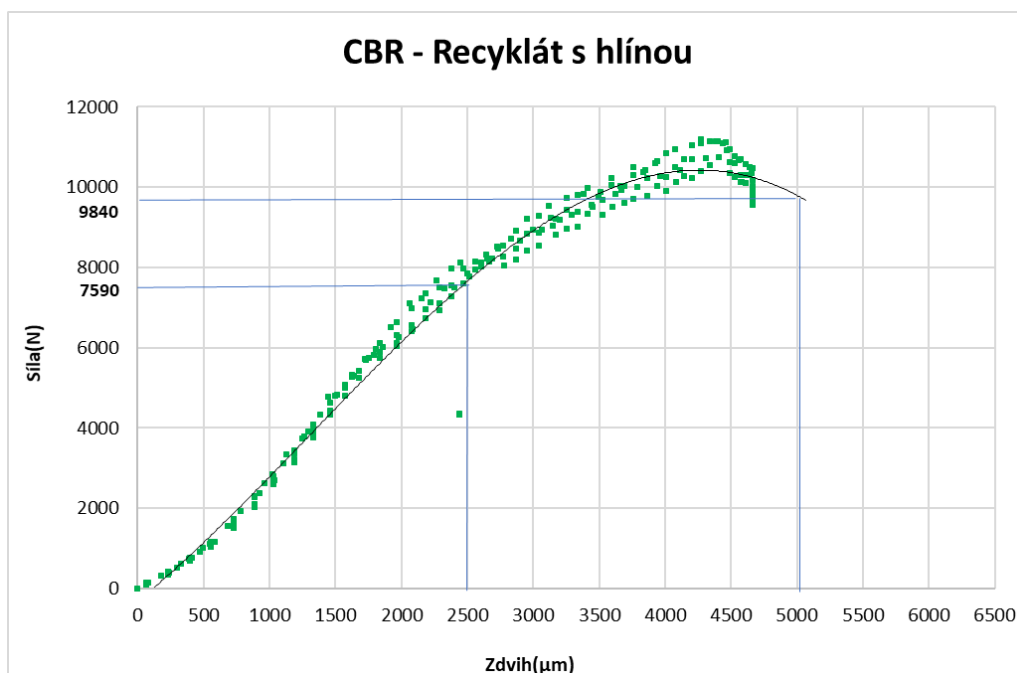
Obr. 66 Vyhodnocení zkoušky CBR, směsný recyklát

Na obrázku č. 65 je závislost penetrace (zdvihu) a síly během měření zkoušky IBI. Z grafu byly odečteny hodnoty při penetraci ve 2,5 mm a 5 mm. Síla při penetraci 2,5 mm je 7205 N, při penetraci 5 mm je 16330 N.

Na obrázku č. 66 je závislost penetrace (zdvihu) a síly během zkoušky CBR. Z grafu byly odečteny hodnoty při penetraci ve 2,5 mm a 5 mm. Síla při penetraci 2,5 mm je 7315 N, při penetraci 5 mm je 15780 N.



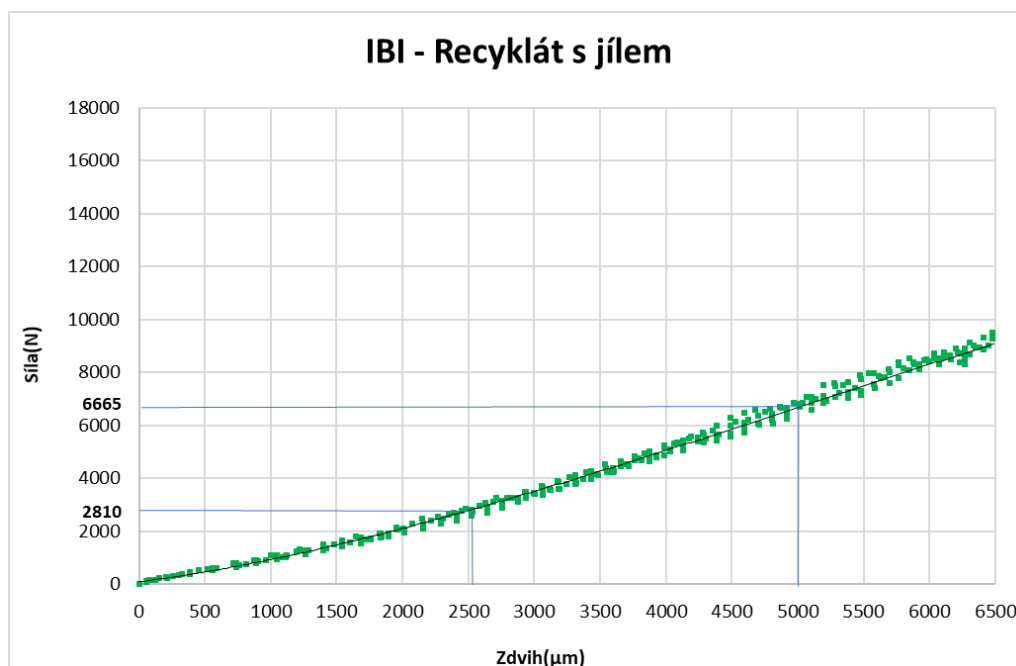
Obr. 67 Vyhodnocení zkoušky IBI, směsný recyklát s hlinou



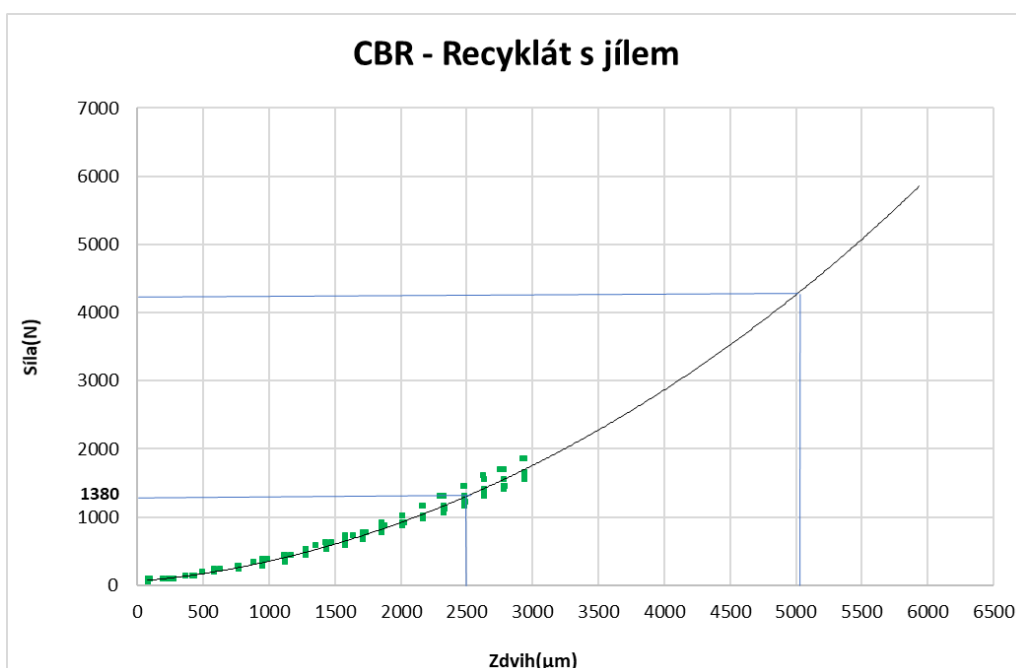
Obr. 68 Vyhodnocení zkoušky CBR, směsný recyklát s hlinou

Na obrázku č. 67 je závislost penetrace (zdvihu) a síly během měření zkoušky IBI. Z grafu byly odečteny hodnoty při penetraci ve 2,5 mm a 5 mm. Síla při penetraci 2,5 mm je 5835 N, při penetraci 5 mm je 14725 N.

Na obrázku č. 68 je závislost penetrace (zdvihu) a síly během zkoušky CBR. Z grafu byla odečtena pouze hodnota při penetraci ve 2,5 mm. Síla při penetraci 2,5 mm je 7590 N, při penetraci 5 mm je 9840 N.



Obr. 69 Vyhodnocení zkoušky IBI, směsný recyklát s jílem



Obr. 70 Vyhodnocení zkoušky CBR, směsný recyklát s jílem

Na obrázku č. 69 je závislost penetrace (zdvihu) a síly během měření zkoušky IBI. Z grafu byly odečteny hodnoty při penetraci ve 2,5 mm a 5 mm. Síla při penetraci 2,5 mm je 2810 N, při penetraci 5 mm je 6665 N.

Na obrázku č. 70 je závislost penetrace (zdvihu) a síly během zkoušky CBR. Z grafu byla odečtena pouze hodnota při penetraci ve 2,5 mm. Síla při penetraci 2,5 mm je 1380 N, při penetraci 5 mm nebyla změřena.

Recyklát	Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]	IBI	
			Síla [kN]	IBI [%]
Čistý	2,5	13,2	7,2	55%
	5	20	16,3	82%
S příměsí hlíny	2,5	13,2	5,8	44%
	5	20	14,7	74%
S příměsí jílu	2,5	13,2	2,8	21%
	5	20	6,7	33%

Obr. 71 Tabulka s výsledným okamžitým indexem únosnosti jednotlivých recyklátů

Recyklát	Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]	CBR	
			Síla [kN]	CBR [%]
Čistý	2,5	13,5	7,3	54%
	5	27,1	15,8	58%
S příměsí hlíny	2,5	13,5	7,6	56%
	5	27,1	9,8	36%
S příměsí jílu	2,5	13,5	1,4	10%
	5	27,1	-	-

Obr. 72 Tabulka s výsledným kalifornským poměrem únosnosti recyklátů

Obrázek č. 71 uvádí vypočítané okamžité únosnosti okamžitého indexu. Čistý recyklát dosáhl při penetraci 2,5 mm únosnosti 55 %, při penetraci 5 mm 82 %. Výsledná únosnost čistého recyklátu je 55 %. Tato hodnota únosnosti vypovídá zlepšené zemi ně s obsahem 2 až 3 % cementu. Recyklát s příměsí hlíny dosáhl hodnoty při penetraci 2,5 mm 44 %, při penetraci 5 mm 74 %. Výsledná únosnost recyklátu s příměsí hlíny je 44 %. Recyklát s příměsí jílu nabyl pevnosti při penetraci 2,5 mm 21 %, při penetraci 5 mm 33 %. Výsledná únosnost recyklátu s obsahem jílu je 21 %.

Obrázek č. 72 obsahuje vypočítané hodnoty kalifornského poměru únosnosti recyklátů. Čistý recyklát dosáhl při penetraci 2,5 mm únosnosti 54 %, při 5 mm 58 %. Výsledná únosnost čistého recyklátu je 54 %. Recyklát s příměsí hlíny při penetraci 2,5 mm dosáhl únosnosti 56 %, při penetraci 5 mm 36 %. Výsledná únosnost je 36 %. Recyklát s příměsí jílu nabyl při penetraci 2,5 mm únosnosti 10 %, při penetraci 5 mm

nebyla možná únosnost určit. To mohlo být způsobeno větším shlukem částic jílu a zatěžovací list zkoušku ukončil, jelikož pokles síly byl větší než 0,1 kN

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo zpracovat dostupné informace o využití směsných recyklátů do podloží vozovek pozemních komunikací. Zdůraznit problémy některých vlastností směsných recyklátů. Bylo zjištěno, že složení směsných recyklátů není pevně stanoveno a tím se může lišit výsledná kvalita. Pouze je technickými podmínkami upraveno množství cizorodých částic, které výslednou kvalitu recyklátu ovlivňují. Mezi cizorodé částice patří dřevo, plast, zbytky staré výztuže, sklo a jiné. Kvalita recyklátů se dá ovlivnit technologií, logistikou a organizací práce. Mezi technologii řadíme tzv. blokové schéma, které se velmi osvědčilo v Česko republice. Je velmi důležité klást důraz na kvality výsledných recyklátů, aby bylo dosaženo jeho nejvyšších kvalit a tím i možností jeho maximálního využití. Recyklované materiály se používají především do jednotlivých vrstev násypů či podloží vozovek, avšak se vyplatí používat v intravilánu z důvodu nákladné dopravy na stavenišť. V západních a severních zemích Evropské unie je využití recyklovaných materiálu až 90 %, které jsou schopny znovu použít.

V praktická část se zabývá zkouškami směsných recyklátů a ověřeními, zda směsné recykláty mohou být použity v praxi ve stavebnictví a jaké jsou jejich vlastnosti.

První zkouška zkoumala pět směsí směsných recyklátů, kdy u nich byla zkoumána jejich křivka zrnitosti. Všechny směsi byly frakce 0/32 mm a byly klasifikovány dle normy ČSN 73 6133. První vzorek MZ 36 byl klasifikován jako S4 SM, jedná se tedy o hlinitý písek, který je namrzavý a je podmíněčně vhodný do násypu i do aktivní zóny. Druhý vzorek byl označen jako 6505. Tento vzorek byl klasifikován také jako S4 SM, tudíž má stejné vlastnosti i podmínky využití jako vzorek MZ 36. Třetí vzorek cihelný byl klasifikován jako S3 S-F, je to písek s příměsí jemnozrné zeminy, který je určen dle jeho křivky zrnitosti, jako materiál nenamrzavý a je vhodný pro použití do násypu, tak i podmíněčně vhodný do aktivní zóny. Vzorek číslo čtyři pod označením MZ 46 byl dle křivky zrnitosti určen jako G2 GP, jedná se o štěrk špatně zrněný, který je nenamrzavý a je podmíněčně vhodný do násypu i aktivní zóny. Pátým vzorkem byl vzorek jílový, který byl klasifikován jako G5 GC, štěrk jílovitý, který je mírně namrzavý a je podmíněčně vhodný do násypu i aktivní zóny.

Druhou zkouškou byla pomocí Proctorovy zkoušky určena u třech směsných recyklátů jejich maximální objemová hmotnost při optimální vlhkosti. Byl použit směsný recyklát, směsný recyklát s příměsí hlíny a směsný recyklát s příměsí jílu. Směsný recyklát měl objemovou hmotnost 2087 kg/m^3 při optimálním nasycení 6 % vody. Směsný recyklát s příměsí hlíny s optimálním nasycením 9,5 % vody měl objemovou hmotnost 1820 kg/m^3 . U směsného recyklátu s příměsí jílu byla stanovena objemová hmotnost 1987 kg/m^3 při optimálním nasycení 9 % procenty vody. Všechny tři vzorky dle normy ČSN 73 6133 jsou vhodné pro použití do aktivní zóny i do násypů.

Třetí zkouškou byla míra namrzavosti, kdy byly testovány stejné směsné recykláty jako u Proctorovy zkoušky. Směsný recyklát byl testován ve 3 vzorcích. Vzorek č. 1 měl maximální mrazový zdvih během zkoušky 3,39 mm a jeho průměrný index mrazu $\beta_1 = 0,186$. Vzorek č. 2 s maximálním zdvihem 3,80 mm měl průměrný index mrazu $\beta_2 = 0,226$. Vzorek č. 3 s maximálním zdvihem 3,11 mm měl průměrný index mrazu $\beta_3 = 0,182$. Výsledný index mrazu pro směsný recyklát je $\beta = 0,196$. Tento recyklát je nenamrzavý. U směsného recyklátu s příměsí hlíny měl vzorek č. 1 maximální zdvih 5,35 mm a průměrným indexem mrazu $\beta_1 = 0,161$. Vzorek č. 2 s maximálním zdvihem 5,43 mm měl průměrný index mrazu $\beta_2 = 0,188$. Vzorek č. 3 měl maximální zdvih 6,25 mm a průměrný index mrazu $\beta_3 = 0,264$. Výsledný index mrazu pro směsný recyklát s příměsí hlíny je $\beta = 0,204$, tudíž tento recyklát je nenamrzavý. Vzorek č. 1 směsného recyklátu s obsahem jílu měl maximální zdvih 5,86 mm a jeho průměrný indexem mrazu byl $\beta_1 = 0,211$. Vzorek č. 2 měl maximální zdvih 6,94 mm a průměrný index mrazu $\beta_2 = 0,255$. Vzorek č. 3 s maximálním zdvihem 8,45 mm měl průměrným indexem mrazu $\beta_3 = 0,367$. Výsledný index mrazu pro směsný recyklát s příměsí jílu je $\beta = 0,277$, který řadí tento recyklát mezi mírně namrzavé a namrzavé materiály.

Poslední zkouškou a hlavní zkouškou byly zkoušky IBI a CBR, tedy okamžitý index únosnosti a kalifornský poměr únosnosti. Směsný recyklát dosáhl hodnoty při zkoušce IBI 55 %, při CBR 54 %. Tento recyklát může být použit dle ČSN 73 6133 v aktivní zóně ve všech kategoriích podloží P I – P III. Směsný recyklát s obsahem hlíny dosáhl při zkoušce IBI 44 % a při CBR 36 % tedy může být použit v aktivní zóně v podloží typu P II a PIII. Směsný recyklát s příměsí jílu dosáhl při zkoušce IBI 21 % a při CBR 10 %. Tento směsný recyklát může být použit jako dva recykláty předchozí

v podloží násypu, jelikož minimální hodnota IBI pro použití upravených zemin v podloží násypu je 10 %. V aktivní zóně tento recyklát nemůže být použit, protože minimální hodnota CBR pro použití upravených zemin do aktivní zóny je 15 %.

6 Literární přehled

- [1] TP 210, Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, obor pozemních komunikací, 2011. [cit. 2020-12-7].
- [2] ČSN 73 6133. Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací. Únor 2010. [cit. 2020-12-7].
- [3] STEHLÍK, Dušan. Praktické aplikace v pozemních komunikacích; Skriptům k přednáškám. 2006. vyd. VUT v Brně: Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací [cit. 2020-12-11].
- [4] MPO: Ministerstvo průmyslu a obchodu, Analýza současného stavu vybraných komodit druhotných surovin a jejich zdrojů včetně vize rozvoje daného odvětví [online][cit. 2021-12-13].
Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/politika-druhotnych-surovin-cr/2019/8/Analyza_materialove-toky_PDS-CR.pdf
- [5] STEHLÍK, D. Stavební a demoliční odpad v konstrukci pozemních komunikací [online]. Časopis stavebnictví, poslední aktualizace 9.4.2008, [cit. 2020-12-15].
Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/stavebni-a-demolicni-odpad-v-konstrukcipozemnich-komunikaci_N718
- [6] ŠKOPÁN, Miroslav. Vývojové trendy v technologiích pro recyklaci stavebních a demoličních odpadů [online]. 2007 [cit. 2020-12-15].
Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/trendy-v-technologiich-pro-recyklaci-odpadu>

-
- [7] 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. [cit. 2020-12-15].
- [8] KRUTIL, Karel. Posuzování shody výrobků ze stavebních a demoličních odpadů [online]. [cit. 2020-12-16].
Dostupné z: http://arasm.cz/dok/sbor_rec_2005/035_Krutil.pdf
- [9] ŠKOPÁN, Miroslav. Možnosti zvyšování jakosti recyklátů ze stavebních a demoličních odpadů [online]. 2008 [cit. 2020-12-16].
Dostupné z: <https://www.stavebnitechnika.cz/clanky/moznosti-zvysovani-jakosti-recyklatu-ze-stavebnich-a-demolicnichodpadu>
- [10] STEHLÍK, D. a V. ADAMEC. Využití recyklátů při výstavbě, opravách a rekonstrukcích vozovek pozemních komunikací. In: *Acta environmentalica universitatis comenianae Bratislava*, 2012, s. 109-114. ISSN 1335-0285. [cit. 2020-12-16].
- [11] POSPÍŠIL, Karel a Radka RÁKOSNÍKOVÁ. Podmínky použití recyklovaných materiálů [online]. [cit. 2020-12-16].
Dostupné z: <https://www.cdv.cz/file/clanek-podminky-pouziti-recyklovanых-materialu/>
- [12] MASAŘ, Daniel. Směsný recyklát pro zemní tělesa pozemních komunikací [online]. [cit. 2020-12-21].
Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=194959

- [13] TP 170. Navrhování vozovek pozemních komunikací. Listopad 2004
[cit. 2020-12-21].
- [14] 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. [cit. 2020-12-21].
- [15] ČSN 73 13286-2. Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška. 2011. [cit. 2020-12-22].
- [16] ČSN 72 1191. Zkoušení míry namrzavosti zemin. 2013.
[cit. 2020-12-22].
- [17] ČSN EN 13286-47: Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání. 2005.
[cit. 2020-12-22].
- [18] LI, Youyun, et al. Investigation into the Application of Construction and Demolition Waste in Urban Roads. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
[cit. 2020-12-22].
- [19] Bundesverband Baustoffe–Steine und Erden e.V. Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016, prosinec 2018. [cit. 2020-12-26].
Dostupné z: <http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/Bericht-11.pdf>

[20] Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., Baustoffe und Baustoffgemische. [cit. 2020-12-26].

Dostupné z: <https://www.asphalt.de/themen/technik/6-baustoffe-und-baustoffgemische/?L=0>

[21] Einsatzmöglichkeiten und Anforderungen, [cit. 2020-12-26].

Dostupné z: <https://kreislaufwirtschaft-bau.rlp.de/de/fachinformationen/recycling-baustoffe-im-strassen-und-wegebau/einsatzmoeglichkeiten-und-anforderungen/>

[22] POSPÍŠIL, K. a RÁKOSNÍKOVÁ, R. Podmínky použití recyklovaných materiálů. Centrum dopravního výzkumu [online], [cit. 2020-12-25].

Dostupné z: <https://www.cdv.cz/file/clanek-podminky-pouziti-recyklovanых-materialu/>

[23] D. A. CAMERON a A. GABR, *THE SPECIFICATION OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE FOR PAVEMENT CONSTRUCTION*. [cit. 2020-12-

26]. Dostupné z: <http://railknowledgebank.com/Presto/content/GetDoc.axd?ctID=MjE1ZTI4YzctZjc1YS00MzQ4LTkyY2UtMDJmNTgxYjg2ZDA5&rID=MTA0&pID=MTQ3Ng==&attchmnt=VHJlZQ==&uSesDM=False&rIdx=Nzg3Mg==&rCFU=>

[24] Dufonev RC a.s.

Dostupné z: <http://www.dufonev.cz/index.php/deponie-cernovice>

[25] ŠKOPÁN, M. Analýza produkce recyklátů ze SDO a možnosti jejich uplatnění na trhu. In: Sborník konference RECYCLING 2010: Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, [cit. 2020-12-27].

- [26] SOKOLOVÁ, Veronika. Vlastnosti recyklovaných kameniv používaných do pozemních komunikací. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D. [cit. 2020-12-28].
- [27] ŠKOPÁN, M. Systémy recyklace stavebních a demoličních odpadů [online]. 2012, poslední aktualizace 18.3.2012 [cit. 2020-12-28].
Dostupné z: <https://www.stavebnitechnika.cz/clanky/systemy-recyklace-stavebnich-a-demolicnich-odpadu>
- [28] 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 [cit. 2020-12-30].
Dostupné z: <https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/254135/1/254135.pdf>
- [29] LIMBERG, J. Drcení stavebního odpadu [online]. 2016, [cit. 2020-12-28].
Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66133/F1-BP-2016-Limberger-Jakub-BAKALARSKA%20PRACE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [30] PSP Engineering a.s. [cit. 2020-12-28].
Dostupné z: <http://www.pspeng.com/cz/produkty>

Přílohy

A Stanovení míry namrzavosti

STANOVENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI DLE ČSN 72 1191

Vypracoval: Lumír Junek
 Místo: Laboratoř ústavu pozemních komunikací, FAST VUT v Brně
 Datum: 18.11.2020
 Vzorek: Směsný recyklát

Počet zk. vzorků: 3
 Doba saturace: 96 hodin
 Doba namrzání: 120 hodin

Výsledné hodnoty - Směsný recyklát								
Čas [hod]	Teplota [°C]	\sqrt{Im}	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3	
			h1 [mm]	β_1	h2 [mm]	β_2	h3 [mm]	β_3
1	4	2,000	0,060	0,084	0,010	0,072	0,040	0,060
2	4	2,828	0,130	0,094	0,050	0,079	0,090	0,063
3	4	3,464	0,190	0,093	0,100	0,093	0,130	0,056
4	4	4,000	0,240	0,127	0,150	0,085	0,160	0,106
5	4	4,472	0,300	0,117	0,190	0,117	0,210	0,117
6	4	4,899	0,350	0,153	0,240	0,102	0,260	0,102
7	4	5,292	0,410	0,109	0,280	0,109	0,300	0,109
8	4	5,657	0,450	0,117	0,320	0,146	0,340	0,408
9	4	6,000	0,490	0,154	0,370	0,154	0,480	-
10	4	6,325	0,540	0,162	0,420	0,162	0,480	0,065
11	4	6,633	0,590	0,170	0,470	0,136	0,500	0,136
12	4	6,928	0,640	0,106	0,510	0,141	0,540	0,106
13	4	7,211	0,670	0,184	0,550	0,147	0,570	0,037
14	4	7,483	0,720	0,152	0,590	0,114	0,580	0,076
15	4	7,746	0,760	0,157	0,620	0,118	0,600	0,039
16	4	8,000	0,800	0,162	0,650	0,203	0,610	0,041
17	4	8,246	0,840	0,125	0,700	0,125	0,620	0,042
18	4	8,485	0,870	0,129	0,730	0,129	0,630	0,043
19	4	8,718	0,900	0,265	0,760	0,706	0,640	-
20	4	8,944	0,960	0,272	0,920	0,181	0,640	0,045
21	4	9,165	1,020	0,232	0,960	0,139	0,650	0,046
22	4	9,381	1,070	0,142	0,990	0,237	0,660	0,095
23	4	9,592	1,100	0,145	1,040	0,097	0,680	0,048
24	4	9,798	1,130	0,049	1,060	0,099	0,690	0,099
25	4	10,000	1,140	0,050	1,080	0,050	0,710	0,101
26	4	10,198	1,150	-	1,090	0,051	0,730	0,103
27	4	10,392	1,150	-	1,100	-	0,750	0,105
28	4	10,583	1,150	0,053	1,100	0,053	0,770	0,107
29	4	10,770	1,160	0,054	1,110	0,054	0,790	0,109
30	4	10,954	1,170	-	1,120	0,110	0,810	0,110
31	4	11,136	1,170	0,168	1,140	-	0,830	0,168
32	4	11,314	1,200	0,057	1,140	0,057	0,860	0,057

33	4	11,489	1,210	0,058	1,150	-	0,870	0,289
34	4	11,662	1,220	0,235	1,150	0,117	0,920	0,117
35	4	11,832	1,260	0,060	1,170	0,119	0,940	0,179
36	4	12,000	1,270	0,181	1,190	0,121	0,970	0,121
37	4	12,166	1,300	0,122	1,210	0,122	0,990	0,184
38	4	12,329	1,320	0,186	1,230	0,124	1,020	0,124
39	4	12,490	1,350	0,189	1,250	0,189	1,040	0,189
40	4	12,649	1,380	0,191	1,280	0,191	1,070	0,191
41	4	12,806	1,410	0,258	1,310	0,129	1,100	0,193
42	4	12,961	1,450	0,130	1,330	0,261	1,130	0,130
43	4	13,115	1,470	0,198	1,370	0,198	1,150	0,264
44	4	13,266	1,500	0,267	1,400	0,267	1,190	0,200
45	4	13,416	1,540	0,202	1,440	0,270	1,220	0,135
46	4	13,565	1,570	0,273	1,480	0,273	1,240	0,205
47	4	13,711	1,610	0,207	1,520	0,138	1,270	0,207
48	4	13,856	1,640	0,209	1,540	0,279	1,300	0,070
49	4	14,000	1,670	0,141	1,580	0,211	1,310	0,141
50	4	14,142	1,690	0,213	1,610	0,213	1,330	0,142
51	4	14,283	1,720	0,215	1,640	0,287	1,350	-
52	4	14,422	1,750	0,290	1,680	0,217	1,350	0,072
53	4	14,560	1,790	0,219	1,710	0,293	1,360	-
54	4	14,697	1,820	0,221	1,750	0,221	1,360	-
55	4	14,832	1,850	0,298	1,780	0,372	1,360	1,043
56	4	14,967	1,890	0,301	1,830	0,225	1,500	-
57	4	15,100	1,930	0,227	1,860	0,152	1,500	-
58	4	15,232	1,960	0,076	1,880	0,306	1,500	0,306
59	4	15,362	1,970	0,231	1,920	0,231	1,540	0,463
60	4	15,492	2,000	0,156	1,950	0,078	1,600	0,389
61	4	15,620	2,020	0,157	1,960	0,157	1,650	0,314
62	4	15,748	2,040	0,079	1,980	0,079	1,690	0,395
63	4	15,875	2,050	0,080	1,990	0,080	1,740	1,116
64	4	16,000	2,060	-	2,000	-	1,880	-
65	4	16,125	2,060	0,081	2,000	-	1,880	0,243
66	4	16,248	2,050	0,163	2,000	-	1,910	0,326
67	4	16,371	2,030	-	2,000	1,150	1,950	0,164
68	4	16,492	2,030	0,414	2,140	0,414	1,970	0,248
69	4	16,613	2,080	0,667	2,190	0,500	2,000	0,167
70	4	16,733	2,160	0,588	2,250	0,588	2,020	-
71	4	16,852	2,230	0,676	2,320	0,592	2,020	0,169
72	4	16,971	2,310	0,596	2,390	0,426	2,040	0,085
73	4	17,088	2,380	0,429	2,440	0,514	2,050	-
74	4	17,205	2,430	0,518	2,500	0,518	2,050	0,173
75	4	17,321	2,490	0,608	2,560	0,521	2,070	0,087
76	4	17,436	2,560	0,437	2,620	0,437	2,080	0,087
77	4	17,550	2,610	0,440	2,670	0,352	2,090	0,264
78	4	17,664	2,660	0,266	2,710	0,177	2,120	0,177
79	4	17,776	2,690	0,178	2,730	0,178	2,140	0,267
80	4	17,889	2,710	0,269	2,750	0,269	2,170	0,179
81	4	18,000	2,740	-	2,780	0,090	2,190	1,174
82	4	18,111	2,740	0,091	2,790	-	2,320	0,091

83	4	18,221	2,750	0,091	2,790	0,274	2,310	0,091
84	4	18,330	2,760	-	2,820	0,092	2,320	0,276
85	4	18,439	2,760	-	2,830	-	2,350	0,370
86	4	18,547	2,760	0,093	2,830	0,372	2,390	0,465
87	4	18,655	2,770	0,094	2,870	-	2,440	0,374
88	4	18,762	2,780	0,188	2,870	0,282	2,480	1,881
89	4	18,868	2,800	0,189	2,900	0,284	2,680	-
90	4	18,974	2,820	0,095	2,930	0,095	2,680	-
91	4	19,079	2,830	0,383	2,940	0,478	2,680	-
92	4	19,183	2,870	0,192	2,990	-	2,680	-
93	4	19,287	2,890	0,677	2,990	1,160	2,680	0,097
94	4	19,391	2,960	0,389	3,110	0,389	2,690	0,097
95	4	19,494	3,000	0,489	3,150	0,489	2,680	0,098
96	4	19,596	3,050	0,491	3,200	0,393	2,690	-
97	4	19,698	3,100	0,395	3,240	0,395	2,690	0,099
98	4	19,799	3,140	0,496	3,280	0,496	2,680	-
99	4	19,900	3,190	0,299	3,330	0,299	2,680	-
100	4	20,000	3,220	0,200	3,360	0,802	2,680	-
101	4	20,100	3,240	0,302	3,440	0,201	2,680	-
102	4	20,199	3,270	0,202	3,460	0,304	2,680	-
103	4	20,298	3,290	0,102	3,490	0,102	2,680	-
104	4	20,396	3,300	-	3,500	0,102	2,680	0,511
105	4	20,494	3,300	0,103	3,510	0,205	2,730	-
106	4	20,591	3,310	0,103	3,530	-	2,730	0,619
107	4	20,688	3,300	-	3,530	0,207	2,790	0,207
108	4	20,785	3,300	-	3,550	-	2,810	0,417
109	4	20,881	3,300	0,732	3,550	0,209	2,850	0,419
110	4	20,976	3,230	0,841	3,530	0,420	2,890	1,787
111	4	21,071	3,150	0,317	3,490	-	3,060	-
112	4	21,166	3,120	0,106	3,490	0,106	3,060	0,530
113	4	21,260	3,110	0,107	3,500	0,426	3,110	-
114	4	21,354	3,120	0,107	3,540	0,321	3,110	-
115	4	21,448	3,130	0,430	3,570	0,537	3,110	-
116	4	21,541	3,170	0,863	3,620	0,648	3,110	-
117	4	21,633	3,250	0,325	3,680	0,434	3,110	-
118	4	21,726	3,280	0,762	3,720	0,435	3,110	-
119	4	21,817	3,350	0,437	3,760	0,437	3,110	-
120	4	21,909	3,390	0,329	3,800	0,329	3,110	-
121	4	22,000	3,420	-	3,830	-	3,110	-
			$\beta_1 =$	0,186	$\beta_2 =$	0,226	$\beta_3 =$	0,182
			Výsledný součinitel β		0,196			

STANOVENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI DLE ČSN 72 1191

Vypracoval: Lumír Junek
 Místo: Laboratoř ústavu pozemních komunikací, FAST VUT v Brně
 Datum: 09.12.2020
 Vzorek: Směsný recyklát s hlinou (50:50)

Počet zk. vzorků: 3
 Doba saturace: 96 hodin
 Doba namrzání: 120 hodin

Výsledné hodnoty - Recyklát s hlinou								
Čas [hod]	Teplota [°C]	$\sqrt{t_m}$	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3	
			h1 [mm]	β_1	h2 [mm]	β_2	h3 [mm]	β_3
1	4	2,000	0,390	0,374	0,450	0,435	0,350	0,278
2	4	2,828	0,700	0,409	0,810	0,346	0,580	0,315
3	4	3,464	0,960	0,429	1,030	0,317	0,780	0,411
4	4	4,000	1,190	0,508	1,200	0,445	1,000	0,445
5	4	4,472	1,430	0,445	1,410	0,445	1,210	0,492
6	4	4,899	1,620	0,459	1,600	0,408	1,420	0,535
7	4	5,292	1,800	0,383	1,760	0,356	1,630	0,411
8	4	5,657	1,940	0,321	1,890	0,379	1,780	0,408
9	4	6,000	2,050	0,370	2,020	0,308	1,920	0,431
10	4	6,325	2,170	0,259	2,120	0,227	2,060	0,292
11	4	6,633	2,250	0,305	2,190	0,237	2,150	0,441
12	4	6,928	2,340	0,212	2,260	0,141	2,280	0,212
13	4	7,211	2,400	0,220	2,300	0,220	2,340	0,331
14	4	7,483	2,460	0,114	2,360	0,076	2,430	0,076
15	4	7,746	2,490	0,276	2,380	0,079	2,450	0,354
16	4	8,000	2,560	0,244	2,400	0,081	2,540	0,203
17	4	8,246	2,620	0,167	2,420	0,293	2,590	0,335
18	4	8,485	2,660	0,731	2,490	0,129	2,670	0,258
19	4	8,718	2,830	0,486	2,520	0,883	2,730	0,574
20	4	8,944	2,940	0,362	2,720	0,407	2,860	0,272
21	4	9,165	3,020	0,371	2,810	0,371	2,920	0,417
22	4	9,381	3,100	0,379	2,890	0,379	3,010	0,427
23	4	9,592	3,180	0,388	2,970	0,339	3,100	0,388
24	4	9,798	3,260	0,396	3,040	0,396	3,180	0,495
25	4	10,000	3,340	0,353	3,120	0,353	3,280	0,404
26	4	10,198	3,410	0,463	3,190	0,412	3,360	0,721
27	4	10,392	3,500	0,420	3,270	1,259	3,500	0,262
28	4	10,583	3,580	0,427	3,510	0,374	3,550	0,480
29	4	10,770	3,660	0,326	3,580	0,326	3,640	0,326
30	4	10,954	3,720	0,331	3,640	0,276	3,700	0,387
31	4	11,136	3,780	0,168	3,690	0,281	3,770	0,224
32	4	11,314	3,810	0,228	3,740	0,285	3,810	0,399
33	4	11,489	3,850	0,232	3,790	0,058	3,880	0,232
34	4	11,662	3,890	0,059	3,800	0,117	3,920	0,117
35	4	11,832	3,900	0,119	3,820	0,060	3,940	0,238

36	4	12,000	3,920	-	3,830	0,060	3,980	0,060
37	4	12,166	3,920	0,061	3,840	-	3,990	0,245
38	4	12,329	3,930	-	3,840	0,062	4,030	-
39	4	12,490	3,930	0,063	3,850	-	4,030	0,063
40	4	12,649	3,940	0,127	3,850	-	4,040	0,064
41	4	12,806	3,960	0,129	3,850	0,064	4,050	0,129
42	4	12,961	3,980	0,130	3,860	0,065	4,070	0,261
43	4	13,115	4,000	0,198	3,870	0,330	4,110	0,594
44	4	13,266	4,030	0,133	3,920	0,200	4,200	-
45	4	13,416	4,050	0,270	3,950	0,202	4,200	0,067
46	4	13,565	4,090	0,273	3,980	0,205	4,210	0,205
47	4	13,711	4,130	0,207	4,010	0,276	4,240	0,207
48	4	13,856	4,160	0,418	4,050	0,348	4,270	0,487
49	4	14,000	4,220	0,352	4,100	0,422	4,340	0,281
50	4	14,142	4,270	0,426	4,160	0,426	4,380	1,066
51	4	14,283	4,330	0,359	4,220	0,431	4,530	0,072
52	4	14,422	4,380	0,435	4,280	0,435	4,540	0,362
53	4	14,560	4,440	0,439	4,340	0,439	4,590	0,439
54	4	14,697	4,500	0,148	4,400	0,295	4,650	0,369
55	4	14,832	4,520	0,223	4,440	0,298	4,700	0,298
56	4	14,967	4,550	0,150	4,480	0,225	4,740	0,301
57	4	15,100	4,570	-	4,510	0,076	4,780	0,227
58	4	15,232	4,570	0,153	4,520	0,076	4,810	0,153
59	4	15,362	4,590	0,077	4,530	0,077	4,830	0,231
60	4	15,492	4,600	-	4,540	-	4,860	0,078
61	4	15,620	4,600	0,078	4,540	0,078	4,850	0,235
62	4	15,748	4,610	-	4,550	0,079	4,880	-
63	4	15,875	4,610	0,080	4,540	0,080	4,880	0,239
64	4	16,000	4,620	0,080	4,550	-	4,910	0,161
65	4	16,125	4,610	0,162	4,550	-	4,930	0,162
66	4	16,248	4,630	-	4,550	0,163	4,950	0,163
67	4	16,371	4,630	0,329	4,570	-	4,970	0,904
68	4	16,492	4,670	0,331	4,570	0,497	5,080	-
69	4	16,613	4,710	0,333	4,630	0,250	5,080	0,333
70	4	16,733	4,750	0,252	4,660	0,336	5,120	0,252
71	4	16,852	4,780	0,254	4,700	0,338	5,150	0,423
72	4	16,971	4,810	0,341	4,740	0,341	5,200	0,426
73	4	17,088	4,850	0,343	4,780	0,429	5,250	0,429
74	4	17,205	4,890	0,432	4,830	0,432	5,300	0,604
75	4	17,321	4,940	0,261	4,880	0,348	5,370	0,434
76	4	17,436	4,970	0,350	4,920	0,262	5,420	0,437
77	4	17,550	5,010	0,176	4,950	0,352	5,470	0,352
78	4	17,664	5,030	-	4,990	0,266	5,510	0,354
79	4	17,776	5,030	0,178	5,020	44,759	5,550	49,485
80	4	17,889	5,050	-	-	45,220	-	50,065
81	4	18,000	5,050	-	5,040	0,090	5,580	0,181
82	4	18,111	5,050	-	5,030	0,091	5,600	0,182
83	4	18,221	5,050	-	5,040	0,091	5,620	-
84	4	18,330	5,050	0,092	5,030	0,092	5,620	0,184
85	4	18,439	5,040	-	5,040	0,185	5,640	-
86	4	18,547	5,040	0,093	5,020	-	5,640	0,093

87	4	18,655	5,030	-	0,094	5,020	-	0,187	5,650	-	
88	4	18,762	5,020	-	0,094	5,000	-	0,094	5,650	-	0,094
89	4	18,868	5,010	-	-	4,990	-	-	5,640	-	0,378
90	4	18,974	5,010	-	0,095	4,990	-	-	5,680	-	0,095
91	4	19,079	5,020	-	-	4,990	-	-	5,690	-	0,765
92	4	19,183	5,020	-	0,096	4,990	-	-	5,770	-	0,096
93	4	19,287	5,030	-	0,193	4,990	-	0,290	5,760	-	0,193
94	4	19,391	5,050	-	0,389	5,020	-	0,292	5,780	-	0,389
95	4	19,494	5,090	-	0,391	5,050	-	0,489	5,820	-	0,586
96	4	19,596	5,130	-	0,393	5,100	-	0,491	5,880	-	0,491
97	4	19,698	5,170	-	0,296	5,150	-	0,296	5,930	-	0,395
98	4	19,799	5,200	-	-	5,180	-	0,397	5,970	-	1,588
99	4	19,900	5,200	-	0,399	5,220	-	0,499	6,130	-	-
100	4	20,000	5,240	-	0,401	5,270	-	0,401	6,130	-	0,100
101	4	20,100	5,280	-	0,302	5,310	-	0,302	6,140	-	0,504
102	4	20,199	5,310	-	0,304	5,340	-	0,405	6,190	-	0,101
103	4	20,298	5,340	-	0,102	5,380	-	0,305	6,200	-	0,305
104	4	20,396	5,350	-	-	5,410	-	0,204	6,230	-	0,102
105	4	20,494	5,350	-	-	5,430	-	-	6,240	-	0,103
106	4	20,591	5,350	-	-	5,430	-	-	6,250	-	0,103
107	4	20,688	5,350	-	0,104	5,430	-	-	6,240	-	-
108	4	20,785	5,340	-	0,312	5,430	-	0,208	6,240	-	0,104
109	4	20,881	5,310	-	0,209	5,410	-	-	6,250	-	0,105
110	4	20,976	5,290	-	-	5,410	-	0,315	6,240	-	0,105
111	4	21,071	5,290	-	0,528	5,380	-	0,211	6,250	-	-
112	4	21,166	5,240	-	0,106	5,360	-	0,318	6,250	-	-
113	4	21,260	5,230	-	0,639	5,330	-	0,213	6,250	-	0,107
114	4	21,354	5,170	-	0,321	5,310	-	0,321	6,240	-	-
115	4	21,448	5,140	-	0,537	5,280	-	0,215	6,240	-	-
116	4	21,541	5,090	-	0,324	5,260	-	0,432	6,240	-	-
117	4	21,633	5,060	-	-	5,220	-	-	6,240	-	0,108
118	4	21,726	5,060	-	0,109	5,220	-	0,109	6,250	-	-
119	4	21,817	5,050	-	0,219	5,230	-	0,109	6,250	-	-
120	4	21,909	5,030	-	0,549	5,220	-	0,220	6,250	-	-
121	4	22,000	4,980	-	-	5,200	-	-	6,250	-	-
			$\beta_1 =$	0,161	$\beta_2 =$	0,188	$\beta_3 =$	0,264			
Výsledný součinitel β			0,204								

STANOVENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI DLE ČSN 72 1191

Vypracoval: Lumír Junek
 Místo: Laboratoř ústavu pozemních komunikací, FAST VUT v Brně
 Datum: 18.12.2020
 Vzorek: Směsný recyklát s jílem (50:50)

Počet zk. vzorků: 3
 Doba saturace: 96 hodin
 Doba namrzání: 120 hodin

Výsledné hodnoty - Recyklát s jílem								
Čas [hod]	Teplota [°C]	$\sqrt{t_m}$	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3	
			h1 [mm]	β_1	h2 [mm]	β_2	h3 [mm]	β_3
1	4	2,000	0,470	0,507	0,430	0,422	0,010	-
2	4	2,828	0,890	0,739	0,780	0,582	0,010	-
3	4	3,464	1,360	0,522	1,150	0,634	0,010	0,168
4	4	4,000	1,640	0,445	1,490	0,805	0,100	0,699
5	4	4,472	1,850	0,351	1,870	0,773	0,430	0,703
6	4	4,899	2,000	0,102	2,200	0,739	0,730	0,866
7	4	5,292	2,040	0,055	2,490	0,630	1,070	0,657
8	4	5,657	2,060	0,058	2,720	0,525	1,310	0,845
9	4	6,000	2,080	0,031	2,900	0,339	1,600	0,924
10	4	6,325	2,090	0,097	3,010	0,065	1,900	1,004
11	4	6,633	2,120	0,102	3,030	-	2,210	0,949
12	4	6,928	2,150	0,247	3,030	-	2,490	0,778
13	4	7,211	2,220	0,404	3,030	0,037	2,710	0,735
14	4	7,483	2,330	0,647	3,020	-	2,910	0,723
15	4	7,746	2,500	0,433	3,020	-	3,100	0,630
16	4	8,000	2,610	0,528	3,020	-	3,260	0,609
17	4	8,246	2,740	0,376	3,020	-	3,410	0,460
18	4	8,485	2,830	0,559	3,020	-	3,520	0,387
19	4	8,718	2,960	0,530	3,020	0,044	3,610	0,486
20	4	8,944	3,080	0,317	3,030	-	3,720	0,407
21	4	9,165	3,150	0,464	3,030	3,292	3,810	0,510
22	4	9,381	3,250	0,427	3,740	-	3,920	0,522
23	4	9,592	3,340	0,388	3,740	-	4,030	0,533
24	4	9,798	3,420	0,445	3,740	1,633	4,140	0,544
25	4	10,000	3,510	0,454	4,070	-	4,250	0,555
26	4	10,198	3,600	0,566	4,070	1,544	4,360	0,618
27	4	10,392	3,710	0,524	4,370	-	4,480	0,682
28	4	10,583	3,810	0,480	4,370	-	4,610	0,694
29	4	10,770	3,900	0,434	4,370	1,738	4,740	0,597
30	4	10,954	3,980	0,387	4,690	-	4,850	0,718
31	4	11,136	4,050	0,337	4,690	-	4,980	0,730
32	4	11,314	4,110	0,228	4,690	-	5,110	0,684
33	4	11,489	4,150	0,347	4,690	2,141	5,230	0,521
34	4	11,662	4,210	0,294	5,060	-	5,320	0,587
35	4	11,832	4,260	0,238	5,060	-	5,420	0,477

36	4	12,000	4,300	0,181	5,060	-	5,500	0,483
37	4	12,166	4,330	0,122	5,060	0,061	5,580	0,367
38	4	12,329	4,350	0,186	5,070	- 0,062	5,640	0,434
39	4	12,490	4,380	0,189	5,060	-	5,710	0,377
40	4	12,649	4,410	0,127	5,060	1,909	5,770	0,255
41	4	12,806	4,430	0,258	5,360	-	5,810	0,258
42	4	12,961	4,470	0,065	5,360	-	5,850	0,261
43	4	13,115	4,480	0,396	5,360	-	5,890	0,330
44	4	13,266	4,540	0,267	5,360	-	5,940	0,334
45	4	13,416	4,580	0,337	5,360	-	5,990	0,405
46	4	13,565	4,630	0,341	5,360	0,886	6,050	0,341
47	4	13,711	4,680	0,414	5,490	0,069	6,100	0,414
48	4	13,856	4,740	0,279	5,500	0,836	6,160	0,418
49	4	14,000	4,780	0,352	5,620	-	6,220	0,492
50	4	14,142	4,830	0,426	5,620	0,853	6,290	0,640
51	4	14,283	4,890	0,287	5,740	0,144	6,380	0,431
52	4	14,422	4,930	0,435	5,760	0,580	6,440	0,580
53	4	14,560	4,990	0,366	5,840	0,805	6,520	1,243
54	4	14,697	5,040	0,148	5,950	-	6,690	1,034
55	4	14,832	5,060	0,298	5,950	-	6,830	0,745
56	4	14,967	5,100	0,225	5,950	1,578	6,930	0,676
57	4	15,100	5,130	0,227	6,160	-	7,020	0,607
58	4	15,232	5,160	-	6,160	-	7,100	0,535
59	4	15,362	5,160	0,077	6,160	-	7,170	0,386
60	4	15,492	5,170	0,311	6,160	-	7,220	0,389
61	4	15,620	5,210	-	6,160	-	7,270	0,235
62	4	15,748	5,210	-	6,160	- 0,158	7,300	0,316
63	4	15,875	5,210	-	6,140	0,239	7,340	0,319
64	4	16,000	5,210	0,321	6,170	- 0,080	7,380	0,161
65	4	16,125	5,250	-	6,160	-	7,400	0,243
66	4	16,248	5,250	0,245	6,160	-	7,430	0,245
67	4	16,371	5,280	0,329	6,160	1,890	7,460	0,164
68	4	16,492	5,320	0,248	6,390	-	7,480	0,248
69	4	16,613	5,350	0,250	6,390	-	7,510	0,333
70	4	16,733	5,380	0,420	6,390	-	7,550	0,420
71	4	16,852	5,430	0,338	6,390	0,930	7,600	0,338
72	4	16,971	5,470	0,426	6,500	0,085	7,640	0,596
73	4	17,088	5,520	0,171	6,510	-	7,710	0,514
74	4	17,205	5,540	0,518	6,510	1,208	7,770	0,604
75	4	17,321	5,600	0,261	6,650	-	7,840	0,521
76	4	17,436	5,630	0,262	6,650	-	7,900	0,612
77	4	17,550	5,660	-	6,650	0,528	7,970	0,440
78	4	17,664	5,660	0,266	6,710	0,443	8,020	0,443
79	4	17,776	5,690	0,089	6,760	-	8,070	0,535
80	4	17,889	5,700	0,359	6,760	0,090	8,130	0,359
81	4	18,000	5,740	-	6,770	- 0,090	8,170	0,271
82	4	18,111	5,740	-	6,760	0,091	8,200	0,454
83	4	18,221	5,740	0,366	6,770	1,371	8,250	0,183
84	4	18,330	5,780	-	6,920	-	8,270	0,276
85	4	18,439	5,780	-	6,920	- 0,092	8,300	0,185
86	4	18,547	5,780	-	6,910	0,093	8,320	0,279

87	4	18,655	5,780	-	6,920	-	8,350	0,094
88	4	18,762	5,780	-	6,920	-	8,360	0,188
89	4	18,868	5,780	-	6,920	-	8,380	0,189
90	4	18,974	5,780	0,095	6,920	0,095	8,400	0,190
91	4	19,079	5,790	-	6,930	- 0,096	8,420	-
92	4	19,183	5,790	- 0,096	6,920	-	8,420	0,096
93	4	19,287	5,780	-	6,920	-	8,430	0,097
94	4	19,391	5,780	0,097	6,920	-	8,440	-
95	4	19,494	5,790	- 0,098	6,920	-	8,440	0,098
96	4	19,596	5,780	0,196	6,920	-	8,450	- 0,098
97	4	19,698	5,800	- 0,099	6,920	-	8,440	0,099
98	4	19,799	5,790	-	6,920	-	8,450	- 0,099
99	4	19,900	5,790	-	6,920	-	8,440	0,100
100	4	20,000	5,790	- 0,100	6,920	-	8,450	-
101	4	20,100	5,780	0,201	6,920	-	8,450	-
102	4	20,199	5,800	- 0,202	6,920	0,101	8,450	- 0,101
103	4	20,298	5,780	0,102	6,930	- 0,102	8,440	0,102
104	4	20,396	5,790	-	6,920	-	8,450	- 0,102
105	4	20,494	5,790	-	6,920	-	8,440	0,103
106	4	20,591	5,790	-	6,920	-	8,450	-
107	4	20,688	5,790	0,104	6,920	-	8,450	-
108	4	20,785	5,800	- 0,104	6,920	0,104	8,450	-
109	4	20,881	5,790	0,105	6,930	- 0,105	8,450	-
110	4	20,976	5,800	- 0,105	6,920	-	8,450	-
111	4	21,071	5,790	0,528	6,920	-	8,450	-
112	4	21,166	5,840	0,106	6,920	-	8,450	-
113	4	21,260	5,850	- 0,107	6,920	-	8,450	-
114	4	21,354	5,840	0,107	6,920	0,214	8,450	-
115	4	21,448	5,850	-	6,940	- 0,107	8,450	-
116	4	21,541	5,850	-	6,930	-	8,450	-
117	4	21,633	5,850	-	6,930	0,108	8,450	-
118	4	21,726	5,850	- 0,109	6,940	- 0,218	8,450	-
119	4	21,817	5,840	0,219	6,920	0,219	8,450	-
120	4	21,909	5,860	- 0,220	6,940	- 0,110	8,450	-
121	4	22,000	5,840	-	6,930	-	8,450	-
			$\beta_1 =$	0,211	$\beta_2 =$	0,255	$\beta_3 =$	0,367
Výsledný součinitel β			0,277					