



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM TRVANLIVOSTI BETONŮ S BETONOVÝMI A CIHELNÝMI RECYKLÁTY

STUDY OF DURABILITY OF CONCRETE WITH RECYCLED CONCRETE AND BRICK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Voráč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jiří Voráč
Název	Studium trvanlivosti betonů s betonovými a cihelnými recykláty
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

ČSN P 73 2404/Z1 - Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace

ČSN EN 12 620 – Kamenivo do betonu

Hela.R: Technologie betonu I a II, učební opory VUT FAST Brno

Sborníky z českých a mezinárodních konferencí

České a zahraniční časopisy

Internetové zdroje, Science Direct apod.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Vzhledem k mizícím zdrojům přírodních kameniv pro výrobu betonů se začíná stále více i v ČR uvažovat o využívání recyklovaných drtí vznikajících při demolicích starých objektů. V úvahu přicházejí recykláty vzniklé z betonových či cihelných sutí. S využitím těchto materiálů jako částečné či úplné náhrady přírodních kameniv je v ČR zatím minimum praktických zkušeností, což je částečně způsobeno i chybějící legislativou. V normách pro výrobu betonu ČSN EN 206 +A1 a ČSN 73 2404-1 není této problematice věnována náležitá pozornost. Při drcení a následném třídění těchto materiálů mohou být vyrobeny běžné frakce 0/4, 4/8,8/16 či 11/22mm. Problém spočívá v rozmanitosti jejich mechanických vlastností, které závisí na původních vlastnostech betonů či zdiva a rozdílné nasákavosti drtí.

Cílem práce bude v teoretické části zpracovat rešerže z tuzemských a hlavně zahraničních odborných publikací, které popisují požadavky na vlastnosti těchto recyklátů jako je granulometrie, objem škodlivých částic, čistota, mechanické vlastnosti, nasákavost, mrazuvzdornost atd., které je nutné dodržet pro zabudování do betonů pevnostních tříd C16/20 až C35/45. Popsat dopady na výsledné vlastnosti čerstvých (spotřeba vody, udržení konzistence po dobu cca 120minut) a zatvrdlých betonů (pevnosti v tlaku, tahu za ohybu, moduly pružnosti, trvanlivost v prostředí XF a XA). Vydefinovat základní požadavky na vlastnosti recyklátů pro frakce 0/4mm a hrubých frakcí do 22mm.

V experimentální části navrhnete složení betonů C25/30 a C30/37 s náhradou přírodních hrubých kameniv betonovým a cihelným recyklátem. Provedte ekonomické porovnání nákladů na výrobu 1m³ betonu s přírodními hrubými kamenivy a při jejich náhradě betonovým a cihelným recyklátem.

V závěru vymezte možné oblasti a dávky obou recyklátů ve výrobě konstrukčních betonů.

Rozsah práce cca 50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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).

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou recyklovaných betonů. V teoretické části je popsán proces recyklace stavebně demoličního odpadu a shrnutí požadavků na recyklované kamenivo a recyklovaný beton v České republice a některých členských státech EU. Experimentální část je zaměřena na návrh betonu s náhradou přírodního hrubého kameniva betonovým a cihelným recyklátem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Recyklace, produkce odpadu, stavební a demoliční odpad, recyklovaný beton, recyklované kamenivo, betonový recyklát, cihelný recyklát.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with issues of recycled concrete. The theoretical part describes the process of recycling the construction and demolition waste and describes requirements for recycled aggregate and recycled concrete in Czech republic and some of the member states of EU. The experimental part is focused on design of concrete with a substitution of coarse aggregate with a recycled concrete and brick aggregate.

KEYWORDS

Recycling, waste production, construction and demolition waste, recycled concrete, recycled concrete aggregate, recycled brick aggregate.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Jiří Voráč *Studium trvanlivosti betonů s betonovými a cihelnými recykláty*. Brno, 2021. 56 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Studium trvanlivosti betonů s betonovými a cihelnými recykláty* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 28. 5. 2021

Jiří Voráč
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Studium trvanlivosti betonů s betonovými a cihelnými recykláty* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2021

Jiří Voráč
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. za cenné rady v průběhu zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a nejbližším přátelům za podporu při studiu.

OBSAH

1. ÚVOD.....	10
2. VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ	11
3. STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPAD	12
3.1. Právní předpisy související s SDO	13
3.2. Rozdělení SDO	13
3.2.1. Stavební suť	14
3.2.2. Stavební odpady ze stavební výroby	15
3.2.3. Demoliční odpad ze silnic a komunikací.....	15
3.2.4. Zeminy a horniny z výkopových prací.....	15
3.2.5. Dělení stavebních odpadů dle Vyhlášky č. 8/2021 Sb.	15
3.3. Nebezpečné složky SDO	16
3.4. Produkce SDO v České republice.....	16
4. ORGANIZACE BOURACÍCH A DEMOLIČNÍCH PRACÍ	17
4.1. Technologie provádění bouracích a demoličních prací	18
4.1.1. Postupná ruční demontáž stavebních objektů a konstrukcí	18
4.1.2. Postupné ruční bourání jednotlivých stavebních konstrukcí	18
4.1.3. Strojní mechanické bourání a dělení stavebních konstrukcí.....	18
4.2. Postup demontáže objektu.....	19
5. RECYKLACE.....	21
5.1. Recyklace sestupného typu	21
5.2. Recyklace vzestupného typu	22
5.3. Cirkulární ekonomika	22
5.4. Technologie recyklace SDO.....	23
5.4.1. Stacionární recyklační linky	23
5.4.2. Mobilní recyklační linky	24
5.5. Třídače SDO	25
5.5.1. Roštové třídače	26
5.5.2. Vibrační třídače	26
5.5.3. Magnetické třídění.....	26
5.6. Úprava velikosti částic	27
5.6.1. Čelistový drtič	27
5.6.2. Kládíkové drtiče	28
5.6.3. Odrazové drtiče	28
5.6.4. Kuželové drtiče	29
5.6.5. Srovnání čelistových a odrazových drtičů	29
5.6.6. Srovnání čelistových a kuželových drtičů	29

6. RECYKLOVANÉ KAMENIVO	30
6.1. Požadavky na recyklované kamenivo	30
6.1.1. Německo	30
6.1.2. Rakousko	32
6.1.3. Belgie	32
6.1.4. Nizozemsko	33
6.1.5. Dánsko	33
6.1.6. Portugalsko	34
6.1.7. Česká republika	35
6.2. Zkoušky recyklovaného kameniva	36
6.3. Vlastnosti recyklovaného kameniva	37
6.3.1. Objemová hmotnost recyklovaného kameniva	37
6.3.2. Nasákavost recyklovaného kameniva	37
6.3.3. Látky znečišťující recyklované kamenivo	38
6.3.4. Alkalicko-křemičitá reakce s recyklovaným kamenivem	40
6.4. Druhy recyklovaných kameniv	40
6.4.1. Cihelný recyklát	40
6.4.2. Betonový recyklát	41
6.4.3. Směsný recyklát	41
6.4.4. Asfaltový recyklát	41
7. BETON Z RECYKLOVANÉHO KAMENIVA	42
7.1. Beton z recyklovaného betonu	42
7.2. Cihlobeton	43
8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	45
8.1. Beton s cihelným recyklovaným kamenivem	45
8.2. Beton s betonovým recyklovaným kamenivem	46
8.3. Ekonomický dopad na 1 m ³ betonu	46
9. ZÁVĚR	50
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	52
SEZNAM OBRÁZKŮ	55
SEZNAM TABULEK	56
SEZNAM GRAFŮ	56

1. ÚVOD

Vzhledem k tomu, že neustálý vzrůstající objem odpadů negativně ovlivňuje životní prostředí, je třeba hledat cesty, jak tyto odpady využít. Jako jedna z možností se jeví recyklace stavebně demoličního odpadu, který tvoří v ČR téměř 2/3 produkce odpadů [5] a jeho následné využití jako náhrada přírodního kameniva do betonu.

Využití recyklovaného kameniva jakožto plniva betonu však s sebou nese řadu nevýhod, na které je třeba brát zřetel. Oproti přírodnímu kamenivu vykazuje recyklované kamenivo nižší objemovou hmotnost, vyšší nasákavost a také možné vyšší znečištění kontaminujícími látkami. Tyto skutečnosti vedou k tomu, že použitím recyklovaného kameniva dochází ke zhoršení mechanických vlastností betonu, zejména pevností, modulu pružnosti, ale také smrštění a dotvarování. Zmíněné negativní faktory mají za následek některá omezení, zejména množství použitého recyklovaného kameniva do betonu a také jeho použití z hlediska expozičních tříd betonu.

Cílem této práce je v teoretické části zpracování požadavků na vlastnosti recyklovaného kameniva a jejich dopady na vlastnosti čerstvých a zatvrdlých betonů. V experimentální části je věnována pozornost návrhu složení betonu C25/30 a C30/37, ve kterých je přírodní hrubé kamenivo nahrazeno betonovým a cihelným recyklátem společně s ekonomickými dopady na 1 m³ betonu.

2. VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Odpadem rozumíme každou movitou věc, které se osoba zbavuje, má úmysl nebo povinnost se jí zbavit. Dle Katalogu odpadů je dělíme do 20 skupin a jejich podskupin.

Stavební a demoliční odpad je odpad, který vzniká při stavebních a demoličních činnostech. V Katalogu odpadů je řazen do skupiny č. 17.

Opětovné použití jsou postupy, kdy se výrobky či jejich části znovu využijí pro stejný účel, ke kterému byly určeny původně, díky čemuž se nestávají odpadem.

Využívání odpadů jsou veškeré činnosti uvedené v příloze č. 2 k zákonu o odpadech č. 541/2020 Sb., mezi které spadá zejména materiálové využívání odpadů jako náhrada prvotních surovin stavebními a demoličními odpady nebo využití látkových vlastností, a to k účelu původnímu nebo k jiným účelům. Výjimku tvoří bezprostřední získávání energie.

Úprava odpadů je každá činnost, díky které dojde ke změně chemických, biologických nebo fyzikálních vlastností odpadů, a to včetně jejich třídění, za účelem snížení jejich nebezpečných vlastností, které jsou uvedeny v zákonu o odpadech č. 541/2020 Sb. Pro stavební a demoliční odpad je klíčové zejména drcení a třídění včetně vytřídění kovů.

Recyklát ze stavebního a demoličního odpadu je materiálový výstup získávaný z recyklačních linek, který je charakterizován zrnitostí a velikostní frakcí. Na trh může být uváděn jako výrobek v souladu se zvláštními právními předpisy (zákon č. 22/1997 Sb., nařízení vlády č. 163/2002 Sb. a nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011) nebo jako upravený odpad na povrchu terénu v souladu se zákonem o odpadech č. 541/2020 Sb. a vyhláškou č. 294/2005 Sb.

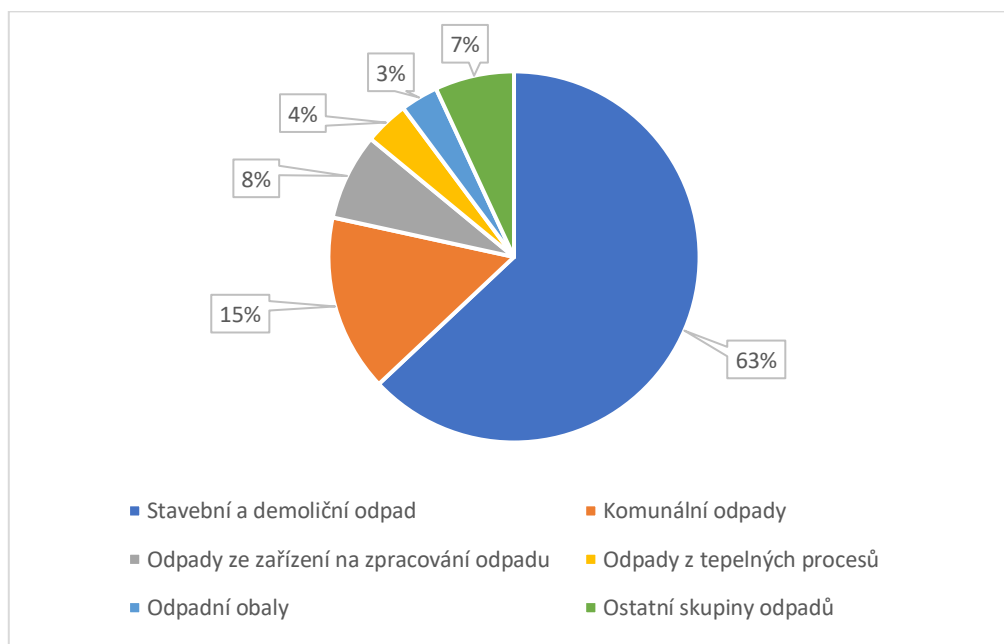
Druhotná surovina je materiál, který má charakter vedlejších produktů nebo upravených odpadů, které díky splněným kritériím a podmínkám, pokud jsou stanovena, přestaly být odpadem. Dále materiály získané z výrobků podléhající zpětnému odběru, materiály z dalších výrobků využitelných pro další zpracování včetně nespotřebovaných vstupních surovin a materiály předávané k novému využití. Druhotná surovina slouží jako vstup pro výrobu a nahrazuje prvotní surovinu.

Vedlejší produkt je movitá věc, která není odpadem, ale vznikla při výrobě, při které není prvotním cílem výroba nebo získání této věci. [1] [2]

3. STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPAD

Stavební a demoliční odpady (dále SDO) vznikají při různých stavebních činnostech, ať už se jedná o výstavbu, rekonstrukci nebo demolici. SDO jsou významnou kategorií odpadu tvořící 63 % z celkové produkce odpadů v ČR v roce 2019. Jsou také významným potencialem zdrojem druhotných surovin, proto je upřednostňována recyklace oproti skládkování. Recyklace SDO se stala od poloviny 90. let běžnou technologií pro využívání SDO. Mezi technologické procesy recyklace patří zejména zdrobňování, třídění a separace stavebních sutí a odpadů. Dále to jsou také postupy, které vedou k opětovnému využití stavebních prvků či dílců.

Jeden z hlavních faktorů, který je zodpovědný za efektivitu a kvalitu celého procesu recyklace, je třídění demoličního materiálu přímo na místě jejich vzniku. Je prokázáno, že třídění in situ je nejenom účinnější, ale také levnější než od výrobce recyklátu. [3] [4] [5]



Graf č. 1: Celková produkce odpadů v roce 2019 (CENIA) [5]

3.1. Právní předpisy související s SDO

Od 1.1. 2021 vstoupil v platnost nový zákon o odpadech (zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech), který například uvádí, že od 1. ledna 2030 bude zakázáno skládkovat recyklovatelné odpady. [1][4]

Mezi stěžejní právní předpisy, které souvisejí s SDO a jejich následnou recyklací, patří:

- Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech
- zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, ve zn. pozd. předp.,
- zákon č. 102/2001 Sb. o obecné bezpečnosti výrobků, ve zn. pozd. předp.,
- zákon č. 183/2006 Sb. o územním plánování a stavebním řádu, ve zn. pozd. předp.,
- zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech
- nařízení vlády č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky, ve zn. pozd. předp.,
- nařízení vlády č. 352/2014 Sb. o Plánu odpadového hospodářství České republiky,
- vyhláška č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby, ve zn. pozd. předp.,
- vyhláška č. 94/2016 Sb. o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů
- vyhláška č. 499/2006 Sb. o dokumentaci staveb, ve zn. pozd. předp.,
- metodický návod odboru odpadů Ministerstva životního prostředí pro řízení vzniku stavebních a demoličních odpadů a pro nakládání s nimi (Věstník MŽP č. 3/2008).

3.2. Rozdělení SDO

SDO lze rozdělit dle několika kritérií. Mezi první patří rozdělení z hlediska časového horizontu jeho vzniku na:

- Odpady ze stavebních objektů zařízení staveniště podmiňující výstavbu,
- odpady, vznikají při realizaci vlastních stavebních procesů na stavbě,
- odpady při přípravných pracích a dopravě materiálu,
- odpady vznikající při odstraňování staveb (demolice).

Stavební a demoliční odpad zahrnuje širokou škálu materiálů. Charakter tohoto druhu odpadu přímo souvisí se stavebními technikami, které byly za vzniku konstrukcí, jež jsou nyní demolovány, použity. Dále závisí na druhu a stáří stavby. Kvalita SDO je dále ovlivněna vlastnostmi surovin použitých při výstavbě, způsobem zpracování SDO, skladováním a čistotou. [4]

Mezi hlavní složky SDO se řadí:

- Stavební kamenivo (drobné, mezi které patří písky, dále štěrky a kamenivo hrubé),
- cihly a cihlářská keramika,
- ostatní keramické materiály,
- betony,
- omítky,
- asfalt, dehty,
- dřevo a materiály na bázi dřeva,
- plasty,
- kovy (železné a neželezné),
- papír,
- barvy, laky,
- lepidla, tmely. [4]

3.2.1. Stavební suť

Stavební suť je tvořena směsí stavebních odpadů, která vzniká při demolici zejména pozemních staveb. Její složení je zpravidla ovlivněno druhem, konstrukčním řešením, stářím staveb, ale také technologií, kterou se provádí demoliční práce. Směs se může skládat z betonu, železobetonu, cihelného zdiva, zeminy, keramiky, kamenné dlažby, vápenopískových materiálů, maltovin, sádry, dřeva a materiálů na bázi dřeva, oceli, písku, štěrku, plastů, kovů, papíru, asfaltu, dehtu, tmelů, barev a lepidel.

Mezi hlavní recykláty získané z této směsi patří cihelná a betonová drť, které lze využít jako kamenivo do betonu. Předpokladem pro splnění vlastností kladených na tyto recykláty z hlediska využití do betonových směsí je roztřídění drti podle druhu na betonová a cihelná zrna, dále odstranění nežádoucích příměsí, kde řadíme zejména sádro, asfalt, dřevo a plasty. Pro svou nízkou pevnost v tlaku se cihelná drť používá zejména pro méně náročné stavební hmoty, mezi které řadíme například cihlobeton. Mnohem častěji se však využívá jako násypový materiál. Jemnou cihelnou drť lze použít jako antuku pro povrchy sportovišť.

Dřevo a materiály na bázi dřeva se nejčastěji využívají jako palivo, lze je však využít i přímo na staveništi. Oddělená betonářská armatura lze využít také přímo na stavbě nebo častěji jako železný šrot. Plasty a další příměsí se obvykle skládkují nebo spalují. [4]

3.2.2. Stavební odpady ze stavební výroby

Zde spadají všechny odpady, které vznikají při provádění stavebních prací na novostavbách a rekonstrukcích staveb. Z více jako 50 % tvoří tyto odpady inertní materiály, jako například kamenivo, písek, cihly, beton a zemina. Z dalších cca 30 % to jsou spalitelné látky, kde řadíme zejména dřevo a materiály na bázi dřeva, lepenka, papír apod. Zbytek tvoří především plasty. [4]

3.2.3. Demoliční odpad ze silnic a komunikací

Tento typ odpadů je tvořen obvykle z materiálu na bázi asfaltů, dehtů a hydraulických pojiv. Spadají sem kusy cementobetonových krytů vozovek, asfaltové kry, obrubníky, dlažební kostky, písek, štěrk, zemina apod. Využívají se především jako násypový materiál nebo do konstrukčních vrstev vozovek. Odpady s obsahem asfaltu lze znovu zpracovat a využít do nových stavebních hmot obsahující asfaltové pojivo. [4]

3.2.4. Zeminy a horniny z výkopových prací

Objemově tvoří největší složku ze stavebních odpadů. Skládají se z materiálů, které mají inertní vlastnosti a využívají se zejména pro zemní stavební konstrukce. Své využití naleznou přímo na staveništi pro dosažení vyrovnané bilance zemních prací (výkopů a násypů). [10]

3.2.5. Dělení stavebních odpadů dle Vyhlášky č. 8/2021 Sb.

Stavební odpady se dělí dle vyhlášky č. 8/2021 Sb., která rozděluje odpady do skupin od 1 do 20. Skupiny jsou dále rozděleny do podskupin, které blíže specifikují původ odpadu. V tabulce níže jsou uvedeny hlavní podskupiny SDO. [6]

Tabulka č. 1: Rozdělení SDO dle vyhlášky č. 8/2021 Sb. [6]

17	STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPADY
17 01	Beton, cihly, tašky a keramika
17 02	Dřevo, sklo a plasty
17 03	Asfaltové směsi, dehet a výrobky z dehtu
17 04	Kovy (včetně jejich slitin)
17 05	Zemina (včetně vytěžené zeminy z kontaminovaných míst), kamení, vytěžená hlušina
17 06	Izolační materiály a stavební materiály s obsahem azbestu
17 08	Stavební materiály na bázi sádry
17 09	Jiné stavební a demoliční odpady

3.3. Nebezpečné složky SDO

Pokud je překročeno alespoň jedno z kritérií nebezpečnosti, je SDO hodnocen jako nebezpečný. Mezi tato kritéria patří výbušnost, oxidační schopnost, hořlavost, dráždivost, škodlivost zdraví, toxicita, karcinogenita, žíravost, infekčnost, teratogenita (porucha reprodukce), mutagenita (dědičné genetické vady) a schopnost uvolňovat nebezpečné látky do životního prostředí, ať už při nebo po jejich odstranění. Mezi takové složky SDO patří:

- Stavební materiály s obsahem azbestu (potrubí instalací, střešní krytiny, zvukové a protipožární izolace atd.),
- nátěrové hmoty, tmely, lepidla (sloučeniny rtuti, cínu, olova, PCB),
- zářivky a výbojky
- dehet, dehtové hydroizolační lepenky, dehtem impregnované dřevo
- topné a mazací oleje
- olovo a olovněné materiály (klempířské prvky, staré instalace potrubí vodovodu atd.),
- neinertní složky (sádra, plasty, podlahové krytiny, pryž, elektroodpad atd.).

Výše zmíněné nebezpečné složky SDO se musí oddělovat přímo v místě vzniku. Pro shromažďování jsou určeny kontejnery na vyhrazeném prostoru. Je třeba vést evidenci o nebezpečných SDO, které jsou pak následně předány specializované oprávněné společnosti k využití či odstranění. [4]

3.4. Produkce SDO v České republice

Produkci odpadů v ČR lze sledovat dle evidenční databáze Českého statistického úřadu (ČSÚ) a dle Informačního systému odpadového hospodářství (ISOH). Pokud tato data srovnáme, lze si povšimnout, že nejsou stejná. To je dáno tím, že každá databáze používá rozdílnou metodiku zjišťování. ISOH poskytuje data, které více odpovídají reálnému stavu, protože je tvořena ze skutečné evidence původců SDO, zatímco ČSÚ využívá tzv. rotační model, kdy je část dat zjišťována pouze jednou za 3 roky. [4]

V tabulce č.2 jsou data převzata z evidenční databáze ČSÚ pro období 2014 až 2018. [7]

Tabulka č. 2: Produkce vybraných skupin SDO v letech 2014-2018 [7]

Skupina odpadu	Název odpadu	2014	2015	2016	2017	2018
		[t]	[t]	[t]	[t]	[t]
17 01 01	Beton	955 859	1 407 492	1 189 312	1 154 648	1 406 850
17 01 02	Cihly	334 941	333 858	371 013	369 035	308 735
17 01 03	Tašky/keramické výrobky	4 560	5 448	5 069	4 148	10 147
17 01 06	Směsi betonu/cihel/tašek	21 887	25 448	13 110	18 124	29 642
17 01 07	Jiné směsi betonu/cihel	765 956	691 999	674 514	602 969	968 754
17 03 01	Asfaltové směsi s dehtem	1 976	6 107	679	8 445	11 860
17 03 02	Asfaltové směsi bez NL*	452 476	681 681	622 203	616 289	723 086
17 05 03	Zemina/kamení s NL*	218 630	164 876	109 328	92 076	220 527
17 05 04	Zemina/kamení bez NL*	7 878 481	9 531 192	7 731 821	7 141 740	9 340 462
17 05 06	Vytěžená hlušina bez NL*	52 430	102 447	513 746	37 116	9 652
17 05 07	Štěrky ze železnice s NL*	11 115	59 799	36 048	31 040	84 028
17 05 08	Štěrky ze železnice bez NL*	117 676	539 593	358 222	279 679	290 193
17 09 03	Stavební/demoliční odp.s NL*	4 755	11 173	6 011	15 815	24 124
17 09 04	Směsné stavební/demol.odp.	220 797	266 676	258 130	306 740	365 408

*NL=nebezpečné látky

4. ORGANIZACE BOURACÍCH A DEMOLIČNÍCH PRACÍ

Efektivita celého procesu recyklace spolu s kvalitou recyklátu je přímo úměrná způsobu a kvalitě prováděných demoličních prací. Stěžejní je zejména úroveň třídění přímo na místě vzniku odpadů. Při přípravě bouracích a demoličních prací je vhodné, aby byl zvolen takový způsob, který umožňuje efektivní a důsledné třídění. Způsob, jakým budou prováděny bourací a demoliční práce, ovlivňuje do značné míry možnosti recyklace SDO a jeho další využití. Je proto na místě dodržovat některé zásady, mezi které patří:

- Oddělení kontaminovaných materiálů od nekontaminovaných,
- oddělení cizorodých materiálů od minerálních stavebních sutí určených pro recyklaci,
- rozřídění inertní minerální stavební sutě alespoň na základní druhy (betonová suť, cihelná suť, živičné suť, výkopová zemina).

Tento proces velmi často komplikuje neexistence projektové dokumentace, díky které by bylo možné zjistit výskyt nebezpečných stavebních odpadů nebo míst s možnou kontaminací stavebního materiálu. Proto je nutné provádět stavební průzkum, do kterého náleží dokumentace a zařídění stavebních materiálů. Pokud měl v minulosti objekt funkci

skladu, zdravotnického zařízení či průmyslové výroby, je nutné odebírat i vzorky pro chemickou analýzu, která ověří, zda se v objektu vyskytují nebezpečné látky. [4]

4.1. Technologie provádění bouracích a demoličních prací

4.1.1. Postupná ruční demontáž stavebních objektů a konstrukcí

Technologie vhodná například při postupném odstraňování panelové výstavby. Obvodové i vnitřní panely se postupně odstraňují po jednotlivých sekcích. Styky panelů se narušují diamantovými řezacími kotouči, vrtáky nebo elektropneumatickými kladivy. Následně se pomocí hydraulické soupravy panely oddělí a jeřábem přemístí na místo dočasného uložení. Nepoškozené panely jsou dále využity například pro zpevňování krytu hlavních polních cest, pro výstavbu dočasných účelových cest či dočasné komunikace na skládkách odpadů nebo pro výstavbu jednoduchých účelových stavebních objektů jako např. garáže. V případě poškozených panelů se panely z místa dočasného uložení odváží k dalšímu zpracování pro výrobu recyklátu. [4]

4.1.2. Postupné ruční bourání jednotlivých stavebních konstrukcí

Tato technologie je srovnatelná s předchozí, ovšem díky vyššímu podílu ruční práce je pracnější a nákladnější. Používají se různé typy bouracích ručních kladiv s vyměnitelnými nástroji, pomocí kterých se konstrukce rozdělují na drobnější části. [4]

4.1.3. Strojní mechanické bourání a dělení stavebních konstrukcí

V tomto odvětví se využívá různých technologií provádění, mezi které řadíme zejména:

- Ramenové demoliční výložníky,
- gravitační metoda,
- strhávací hák,
- bourací a štípací kleště,
- vylamovací a drtící čelisti,
- stříhací nůžkové čelisti,
- nesená hydraulická bourací kladiva,
- rozpínací soupravy pro hydraulické dělení velkých a hmotných celků. [4]

4.2. Postup demontáže objektu

Pro zajištění co nejvyšší kvality materiálů vzniklých demolicí je nezbytné objekt zmapovat a naplánovat pracovní postup, který je pro každý objekt individuální. Nedílnou součástí je vyklizení objektu od zařizovacích předmětů a komunálního odpadu.

Demontáž objektu začíná od střechy, kde je nutno odstranit krytinu. Pokud krytina obsahuje azbestové materiály, tak se odstraňuje nedestruktivně kvůli tomu, aby se do ovzduší neuvolňovaly částičky azbestu. Následuje demontáž krovu. Pokud bude mít materiál další použití, tak se demontuje ručně, aby nedošlo k poškození prvků. V opačném případě se demontuje strojně.

V dalším kroku probíhá demontování oken a dveří, které lze často druhotně využít. Dále se demontují podhledy a povrchy podlah. Dřevěné prvky, které nejsou znehodnoceny, lze použít opětovně jako stavební prvky, bednění nebo jako ochrana staveb při demolicí. Pokud je tomu naopak, tak dochází k energetické recyklaci.

U tepelných izolací je třeba sledovat stav a charakter izolace. Dle těchto kritérií se dělí na použitelné a nepoužitelné. Například degradovaná skelná vata již nemá další využití a putuje rovnou na skládku. U polystyrenu je třeba zjistit, zda při jeho výrobě nebyly použity nebezpečné látky a není tak hodnocen jako nebezpečný odpad. Pokud tyto látky polystyren neobsahuje, tak jej lze rozdrtit a použít jako lehčivo do betonu. V opačném případě je možné EPS energeticky recyklovat.

Během demolice se betony, železobetony a stavební suť třídí a samostatně se odváží do recyklačního střediska, kde jsou podle druhu ukládány na určené místo. Dále jsou odstraněny vyztužovací prvky a nežádoucí příměsi, kde patří např. plasty, papír atd. Vytríděný materiál je zpracován drtící a třídící linkou na požadované frakce. [8]

V následující tabulce č. 3 jsou vypsány jednotlivé druhy stavebních odpadů. U každého druhu odpadu jsou pak nastíněny možnosti, jak je lze recyklovat spolu s možnými riziky.

Tabulka č. 3: Rizika recyklace a možné způsoby využití recyklovaných surovin z SDO [8]

Druh SDO	Překážky bránící použití recyklovaného materiálu	Způsoby možného využití recyklované suroviny
Betony z podlah a základů	Víceúrovňové třídění pro odseparování zeminy	Podsypy pod základové desky Obsypy instalací Násypy
Konstrukční betony	Nutnost komplexní recyklace (oddělení výztuže a dalších nežádoucích látek), dostatek a nízká cena přírodních surovin	Materiál pro výrobu betonových směsí (zejména pro základové konstrukce a konstrukce v interiéru) Jemnozrnné složky jako suroviny pro alternativní pojiva Jemnozrnné složky jako filery
Betonové kaly (výplachy z mixu)	Různorodé složení, možná kontaminace nebezpečnými látkami	V současné době končí na skládce Po vysušení lze přidat do betonového odpadu pro provlhčení (snížení prašnosti) Způsoby využití jako vstupní suroviny pro výrobu betonu jsou předmětem výzkumu
Zdíci prvky	Potřeba odstranit malty, omítky	Znovupoužití celého prvku
Cihla plná pálená – cihelný recyklát	Různorodé vlastnosti, Různý poměr složení (cihla, malta, omítka, ostatní zdíci prvky, lepidla atd.)	Kamenivo do betonu Podkladní vrstva pod základovou vrstvou RD Obsypy instalací
Cihla plná pálená – cihelný prach	Různorodé vlastnosti	Antuka Plnivo do betonu Může obsahovat pucolánové složky – po mikromletí může částečně nahradit cement v betonové směsi
Keramické tvárnice	Různorodé vlastnosti	Plnivo do betonu Násypy, podsypy, obsypy
Sádra	Kontaminace při nesprávné demontáži	Surovina pro výrobu nových sádrokartonových desek (100 % a opakovaně recyklovatelná) Recyklovaná sádra (např. pro produkci cementu)
Papír	Kontaminace při nesprávné demontáži	Recyklace papíru
Konstrukční dřevo	Nutná pečlivá demontáž Riziko napadení biologickými škůdci	Znovupoužití celého prvku Energetické recyklace Výroba dřevovláknitých desek a izolací
Ploché sklo	Dostatečné oddělení od ostatních materiálů (plastový rám, hliníkové profily atd.)	Surovina pro výrobu nového skla (100% a opakovaně recyklovatelná) Při kontaminaci plnivo do betonu
Expandovaný polystyren (EPS)	Znečištění (lepidla, tmely atd.) Obsah zhášedel (HBCD)	Foukaná izolace Vylehčení betonu Regranulace Energetické využití

5. RECYKLACE

Slovo recyklace pochází z anglického slova recycling = recirkulace neboli vrácení zpět do procesu. Znamená to tedy znovuvyužití nebo také znovuuvedení do cyklu. V širším pojetí můžeme chápat pojem recyklace i to, že původní materiál použijeme pro jiný účel a systém, než ve kterém vznikl

V dnešní době, kdy se ve velkých množstvích využívají neobnovitelné nerostné zdroje, se jeví recyklování materiálů jako jedno z možných východisek, jak alespoň tenhle proces zpomalit. Recyklování šetří přírodní zdroje a omezuje zatěžování prostředí škodlivinami. Samotná těžba přírodního kameniva zatěžuje přírodu nejenom zplodinami z těžebních strojů, ale také výbušninami, které jsou při těžbě používány. Po vytěžení surovin je navíc nutné provést rekultivaci. Tyhle rušivé faktory mají negativní vliv na místní obyvatele, ale i na místní ekosystém. Další výhodou recyklace je snížení objemu demoličního materiálu, který se ukládá na skládky tomu určených, jelikož uložení takového materiálu na skládky komunálního odpadu nebo do volné přírody je zakázáno. [9] [10] [11]

5.1. Recyklace sestupného typu

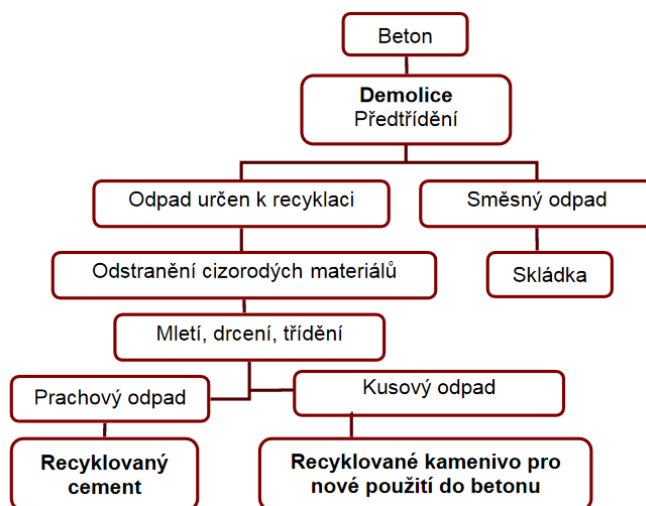
Recyklace sestupného typu neboli down-cycling je nejčastějším typem recyklace betonu u nás i ve světě. Výstupem je recyklát, který je v dalším cyklu použit jako materiál s nižšími užitnými vlastnostmi. [12]



Obrázek č. 1: Schéma recyklace sestupného typu [12]

5.2. Recyklace vzestupného typu

Recyklace vzestupného typu jinak také nazývána up-cycling je oproti recyklaci sestupného typu náročnější na technologické vybavení a energii. Výsledkem je však produkt, který má stejné nebo lepší vlastnosti, než tomu bylo před recyklací. [12]



Obrázek č. 2: Schéma recyklace vzestupného typu [12]

5.3. Cirkulární ekonomika

Cirkulární ekonomika nebo také oběhové hospodářství je systém, kde se přidaná hodnota produktů uchovává co nejdéle a zároveň se snižuje množství odpadu. Až produkt dosáhne limitu své životnosti, ponechá se jako zdroj, který se pak dále využije ve výrobě, čímž se získá další přidaná hodnota.

Opakem cirkulárního systému je systém lineární, který se v zásadě skládá ze několika fází: získání zdrojů, výroba, distribuce, spotřeba a likvidace. [13]



Obrázek č. 3: Cirkulární a lineární ekonomika [31]

5.4. Technologie recyklace SDO

Recyklace SDO je složitý technologický proces, který vyžaduje vysoce kvalitní strojní techniku a kvalifikovaný obslužný personál dodržující stanovený technologický postup. Mezi základní technologické postupy řadíme zejména předtřídění, drcení a třídění. Je třeba odseparovat kontaminované látky, oddělit cizorodé částice a rozdělit suť na jednotlivé složky.[4] [14] [15] Pro recyklaci SDO lze základní provozní systémy rozdělit na:

- Stacionární recyklační linky,
- mobilní recyklační linky,
- semimobilní recyklační linky.

5.4.1. Stacionární recyklační linky

Tento typ recyklačních linek je uzpůsoben k přípravě kvalitních recyklátů při vysokém výkonu. Skládá se zpravidla z více strojů, mezi které patří drtiče, třídiče, vodní či větrné separátory, kalové hospodářství atd. Uspořádání strojů je voleno tak, aby bylo co nejvíce variabilní a schopné reagovat na případné odlišnosti v požadavcích na výrobu recyklátu. Většinou bývají tato pracoviště vybavena laboratoří, ve které se kontroluje kvalita produkce, která je stěžejní pro certifikované frakce.

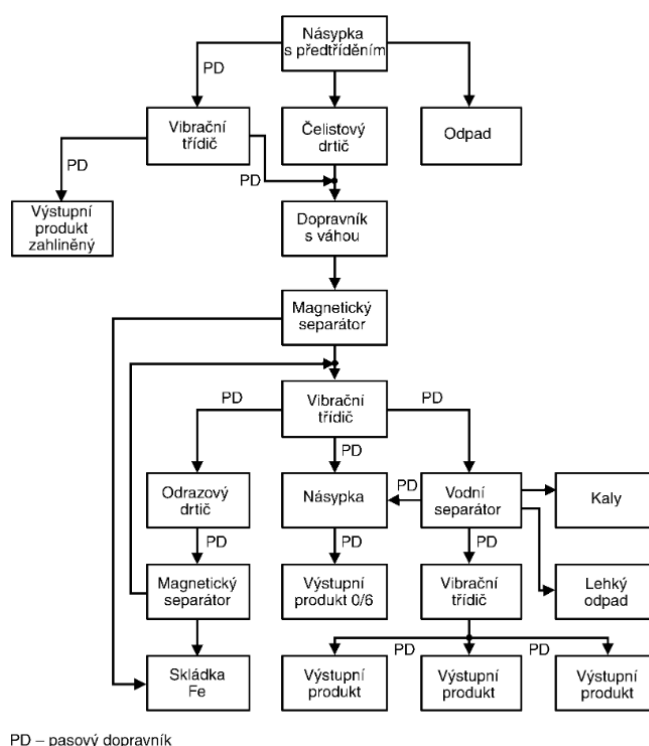
Mezi základní předpoklady kvalitně recyklovaného kameniva patří odpovídající kvalita SDO. Stavební suť je skladována odděleně podle druhu nejlépe po větších množstvích 2 až 10 tisíc tun. Stacionární linky jsou z důvodu evidence zpracovaných materiálů vybaveny přesným systémem vážení.

Všechny stacionární linky jsou vybaveny minimálně dvojstupňovým systémem drcení stavební suti. První stupeň drcení nazýváme jako primární, kde se nadrtí největší kusy. Mezi primární drtiče řadíme čelistový drtič, který bývá jedno nebo dvouzpěrný. Výstupní štěrbina drtiče se běžně nastavuje v hodnotách 150 až 250 mm doprovázena minimálním vznikem jemných částic. Následně materiál putuje do odlučovače železa, kde je s vysokou účinností všechno železo odděleno. Následuje vibrační třídič, který má za důsledek separaci hlíny od zbytku recyklátu. Ten pak putuje do sekundárního drtiče buď jako celek nebo jen část frakce, která má vyšší zrnitost, než je po recyklátu požadována. K tomu se používá odrazový drtič, díky kterému získáme granulát s vysokou ostrohranností, tvarovým indexem blížícím se k 1. Následuje další magnetický separátor pro odloučení železa a poté vodní separátor, který slouží pro odloučení jemných prachových částic a nežádoucích příměsí jako je např. dřevo, plasty. Díky této separaci z vodního separátoru vychází:

- Vysoce kvalitní praný granulát,
- cizorodé materiály a příměsi s nízkou specifickou hmotností (dřevo, plasty, ...),
- voda obsahující vysoký podíl drobných a prachových částic.

I když se jeví vodní separátor jako velmi přínosné zařízení, je třeba dbát na skutečnost, že při teplotách pod bodem mrazu je využití omezené. Je třeba také doplňovat vodu i přesto, že se jedná o uzavřený okruh kvůli nasákavosti materiálu.

Následují vibrační tříděče, které třídí vypraný granulát do požadovaných frakcí. Do místa skladování je recyklát dopravován dlouhými pásovými dopravníky. Takto vyrobený recyklát je velmi nákladný a používá se jako plnivo do betonů a obalovaných směsí při stavbě komunikací nebo jako podkladový materiál při stavbě komunikací či základů. [14] [15]



Obrázek č. 4: Příklad schématu dvoustupňové stacionární recyklační linky [14]

5.4.2. Mobilní recyklační linky

Oproti stacionárním recyklačním linkám jsou z ekonomického hlediska pro provozovatele podstatně výhodnější. Jsou vhodné pro recyklování na místě demoličních prací. Dosahují výkonu od 30 do 150 t/hod. Nevýhodou je však nižší kvalita recyklátu, která je způsobena omezenými rozměry třídícího zařízení. Mezi základní výhody patří:

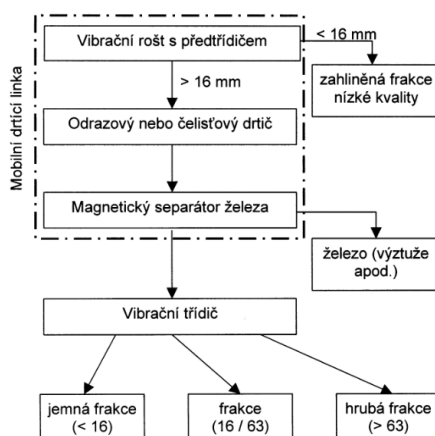
- Vysoká mobilita a malá zastavovací plocha,
- nižší pořizovací náklady, jednoduchost a nenáročnost obsluhy
- dobrá variabilita výstupních parametrů.

Mobilitou rozumíme zejména typ podvozku recyklační linky. Zde řadíme pásový podvozek, kolový návěs, který lze kombinovat s pásovým podvozkem, přívěs nebo pevný kontejnerový rám na lyžinách, který je vhodný pouze pro menší typy strojů. Kolový návěs nebo přívěs je vhodnější při přepravě, jelikož opadá potřeba speciálního vozidla nebo podvalníku. Naopak pásový podvozek je z hlediska mobility na pracovišti jasným vítězem. Umožňuje totiž snížit náklady na provoz nakladačů, lze jej také plnit běžným rypadlem.

Z hlediska vstupního materiálu je třeba uvažovat i s rozdílným uspořádáním recyklační linky. Odlišnosti se projeví zejména v počtu předtřídičů nebo v třídění výstupního recyklátu, kdy je třeba roztrždit recyklát na více než jednu frakci. Převážné uspořádání mobilní recyklační linky je následovné:

- Mobilní drtič s předtřídičem a separátorem železa,
- mobilní vibrační třídič – převážně dvousítný.

Je však nutno podotknout, že vysoká pořizovací cena stroje a mnohdy nízká návratnost investice vede firmy k pořizování co nejlevnější technologie, což vede k výrobě recyklátu diskutabilní kvality. [14]



Obrázek č. 5: Příklad schématu mobilní recyklační linky [14]

5.5. Třídiče SDO

Zde se využívají síta a rošty s různou velikostí otvorů a mezer. Materiál je rozdělen na nadsítnou a podsítnou frakci. Při recyklaci SDO se využívají zejména:

- Roštové třídiče,
- vibrační třídiče.

5.5.1. Roštové třídiče

Z konstrukčního hlediska lze roštové třídiče rozdělit na:

- Třídič s pevným roštem,
- třídič s pohyblivým roštem,
- třídič s pásovým roštem.

U třídičů s pevným roštem se materiál pohybuje samospádem díky sklonu až 45°. Jsou konstruovány z profilovaných ocelových tyčí, které jsou připevněné na příčné ocelové tyči s obdélníkovými mezerami.

Mezi třídiče s pohyblivým roštem řadíme dle typu konstrukce kotoučový třídič a válcový třídič. Kotoučový třídič je složen z rovnoběžných kotoučů, které jsou umístěny na společné hřídeli, která vykonává rotační pohyb. Tím dojde k posunu materiálu. Částice, které jsou menší než mezera mezi kotouči, propadnou.

Válcový třídič pracuje obdobně s rozdílem, že rošty jsou tvořeny válci s definovanou mezerou mezi sebou.

Třídič s pásovým roštem je tvořen nekonečným pásem, který je složený z ocelových tyčí s různými mezerami. [4] [9]

5.5.2. Vibrační třídiče

Tento typ třídičů se zpravidla používá pro třídění zrnitých nelepivých materiálů na 2 a více frakcí. Skládá se ze skříní třídiče, které jsou mezi sebou propojeny pomocí pryžových pružin a kyvných ramen. Ramena jsou otočně uložena na podpěrách. Skříně třídiče kmitají samostatně a vzájemně proti sobě. Tímto je dosaženo přerušovaného pohybu materiálu ve směru šikmo uložené třídící plochy. [4]

5.5.3. Magnetické třídění

Hlavním cílem magnetického třídění je separace magnetických kovů, které u SDO tvoří zejména výztuž betonu. Z hlediska konstrukce je lze rozdělit:

- Magnetické desky nad pásový dopravník,
- magnetický separátor nad pásový dopravník,
- magnetické válce.

V případě magnetické desky nad pásovým dopravníkem je třeba v pravidelných intervalech odstraňovat zachycený kovový materiál. Jinak je tomu u magnetického separátoru nad pásovým dopravníkem, kde jsou kovy vynášeny mimo odpad pomocí pásu, který je součástí magnetického separátoru. Magnetické válce jsou vhodné zejména pro

separaci kovových částí ze sypkých směsí odpadů, kde tvoří tzv. vynášecí válec. Kovové částice jsou odseparovány a unášeny na spodní stranu pásu za osu válce, kde dojde k uvolnění kovových částic vlivem přerušení magnetického pole. [4]

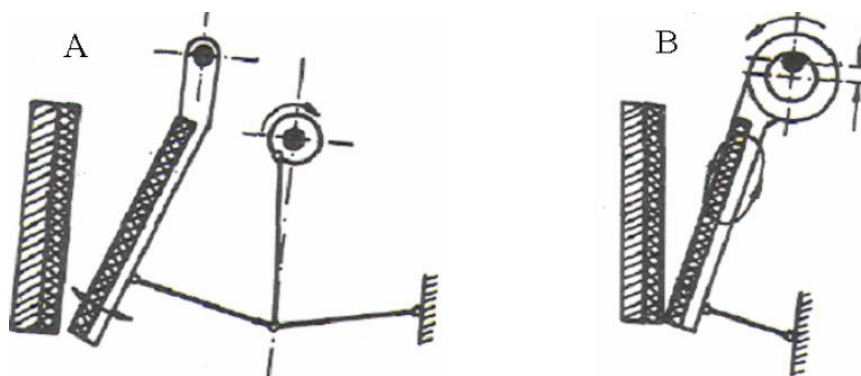
5.6. Úprava velikosti částic

Tento proces řadíme mezi základní technologie, které se používají pro změnu velikosti částic odpadů. Zvyšuje se tak měrný povrch částic odpadu. Podle toho, jak bude dále odpad zpracován, volíme vhodnou technologii pro zmenšování velikosti částic odpadů. Mezi rozhodující vlastnosti odpadů řadíme:

- Fyzikální vlastnosti (tvrdost, křehkost),
- budoucí využití odpadu,
- požadované vlastnosti upraveného odpadu. [4]

5.6.1. Čelistový drtič

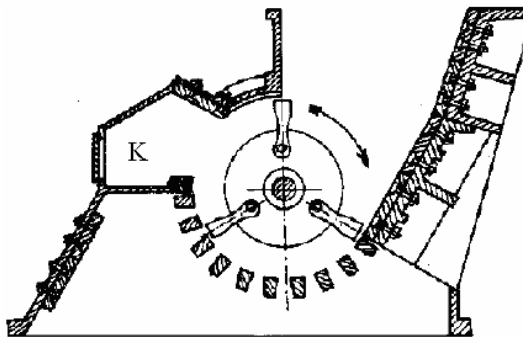
Tento typ drtiče se používá pro tvrdé a křehké materiály. Řadí se mezi primární drtiče. Materiál vstupuje přes ústí drtiče, které má obvykle obdélníkový tvar, mezi čelisti. Drcení probíhá střídavým přibližováním jedné čelisti k druhé. Výsledný produkt poté propadá výstupní štěrbinou, pomocí které lze ovlivnit velikost částic. Hrubé drtiče se používají pro částice o velikosti 200 až 400 mm, jemné drtiče pro částice o velikosti 10 až 30 mm. Křivka zrnitosti produktu je závislá na mnoha faktorech, mezi které patří zmíněná šířka výstupní štěrby, tvar čelistí, úhel čelistí, rychlost kývání čelistí a fyzikálních vlastnostech vstupního materiálu. [4][16]



Obrázek č. 6: Princip čelistového drtiče: A – dvojpěrný, B – jednopěrný [16]

5.6.2. Kladivové drtiče

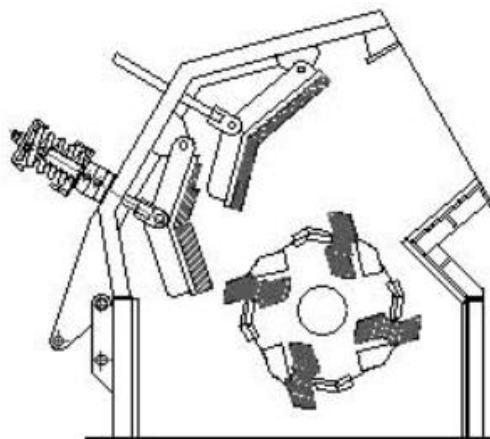
Používají se převážně pro jemné drcení měkkých a středně tvrdých nelepivých materiálů do tvrdosti 4. stupně Mohsovy stupnice. Využívá se jak pro primární, tak i pro sekundární drcení. Kladivové drtiče využívají při drcení kinetické energie pohybujícího se zrna materiálu. Skládají se zejména z ocelové komory, kde je umístěn rotor, na kterém je umístěno několik pevně nebo otočně uchycených ramen (kladiv), které se otáčejí a svými údery porušují dávkovaný materiál. Ve spodní části komory je umístěno síto, kterým lze regulovat velikost výstupní frakce drceného materiálu. [4][16]



Obrázek č. 7: Kladivový drtič [16]

5.6.3. Odrazové drtiče

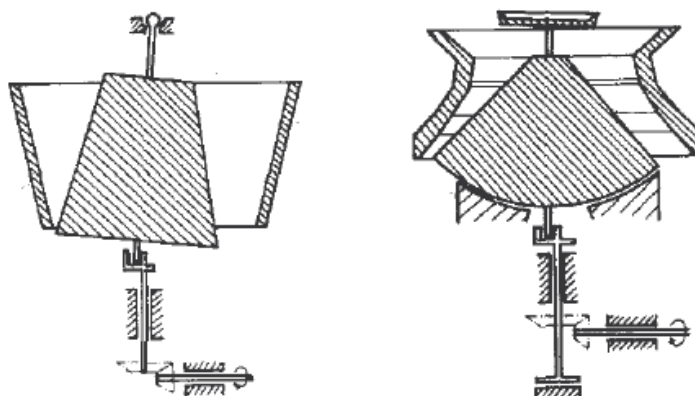
Obvykle se používají pro drcení tvrdých materiálů a materiálů s obsahem lepivých částic, jako jsou například hlíny nebo jíly. Skládá se z ocelové komory, ve které jsou osazeny pancéřované, otěruvzdorné odrazové desky. Na rotoru jsou pevně umístěna ramena (kladiva). Vstupní materiál je nárazem ramen odražen na odrazové desky a tím dojde ke změně jeho velikosti. [4]



Obrázek č. 8: Odrazový drtič [4]

5.6.4. Kuželové drtiče

Tento druh drtičů se je využíván pro drcení tvrdých, abrazivních, nelepivých materiálů. Zdrobňují materiál mezi nepohyblivým kuželovitým drticím prstencem a drticím kuželem, který provádí jak krouživý, tak kývavý pohyb. Kužel má buďto hladký nebo rýhovaný povrch. Drcení probíhá po celém obvodu kužele, nejúčinnější je však v místě s nejmenší štěrbinou. Stupeň drcení lze měnit polohou drticího kužele ve svislé ose. [4][16]



Obrázek č. 9: Kuželový drtič ostroúhlý a tupouhlý [16]

5.6.5. Srovnání čelistových a odrazových drtičů

Čelistový drtič je méně vhodný k recyklaci železobetonu. Při nedostatečném odstranění betonu z výztuže dochází k ucpání drtiče výztuží. Dále zde radíme nižší poměr zdrobnění, méně jemných částí a horší tvarové součinitele materiálu než u odrazových drtičů. Na druhou stranu má čelistový drtič menší prašnost a zatížení hlukem. [9]

5.6.6. Srovnání čelistových a kuželových drtičů

Kuželový drtič má dvakrát až třikrát vyšší výkon při stejné šíři tlamy a vstupní štěrbině. Díky svému krouživému pohybu nevykonává žádný pohyb naprázdno a drtí nepřetržitě. Spotřebovávají přibližně 30 % energie plného zatížení při běhu na prázdno. U drtičů čelistových se pohybujeme okolo 40 až 50 %. [16]

6. RECYKLOVANÉ KAMENIVO

V dnešní době se používají recykláty převážně jako zásypový materiál, materiál pro stabilizaci podkladů a nestmelených vrstev vozovek. K tomu se používá většinou recyklát směsný nebo cihelný. Pokud ale recyklát kvalitně protřídíme, lze jej použít i jako náhrada přírodního kameniva do betonu. [17]

6.1. Požadavky na recyklované kamenivo

Jak na kamenivo přírodní, tak na kamenivo recyklované, se vztahují harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na evropský trh dle Nařízení (EU) č. 305/2011 a také technické požadavky, které jsou stanoveny harmonizovanou evropskou normou k uvedenému Nařízení. Z toho vyplývá, že na trh mohou být dodávány pouze takové výrobky, u kterých bylo provedeno povinné posouzení shody či ověření stálosti vlastností, což platí jak pro kamenivo, tak pro beton, cement i přísady do betonu.

Technické požadavky na přírodní recyklované kamenivo stanovuje harmonizovaná evropská norma EN 12620:2002+A1:2008 (dále ČSN EN 12620+A1), ve které jsou požadavky vyjádřené pomocí tříd a úrovní, případně mezní hodnotou. Jelikož se jedná o stavební výrobek, výrobce je povinen vydat prohlášení o vlastnostech spolu s označením CE, což pak následně umožňuje tento výrobek použít pro výrobu jakéhokoliv betonu s výjimkou kameniv, na které se tato norma nevztahuje v rozsahu jejího předmětu. Třídy a úrovně vlastností vymezují interval, ve kterých se tyto vlastnosti mohou pohybovat. Poté záleží na členských státech, aby stanovily konkrétní požadavky pro jednotlivá použití výrobku na stavbě, např. v národní normě, která by však neměla zavádět další požadavky nad rámec vlastností uvedených v evropské normě. [18]

6.1.1. Německo

Německé normy popisují požadavky na kamenivo a také omezení na kvalitu betonu. Pro různé typy betonů jsou uvedeny definice míry nahrazení kameniva za recyklované kamenivo. Stanoveny jsou také požadavky poskytující informace o procesu demolice.

V normách DIN 4226-100:2002 a DIN 4226-101:2017-08 jsou definovány 4 typy recyklovaného kameniva, které odvíjí od množství jednotlivých složek betonu:

- Typ 1: Drcený beton a písek,
- Typ 2: Drcená suť a písek,
- Typ 3: Cihelné kamenivo a pásek,
- Typ 4: Směsné recyklované kamenivo a písek.

V níže uvedených tabulkách jsou uvedeny požadavky na složení a vlastnosti jednotlivých typů kameniv.

Tabulka č. 4: Složení recyklovaného kameniva dle DIN 4226-100: 2002, DIN 4226-101:2017 [18]

Složení [% hmotnostní]	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
	Pro beton dle DIN 1045-2:2008-08		Pro beton mimo DIN 1045-2:2008-08	
Beton a přírodní kamenivo podle DIN 4226-100	≥ 90	≥ 70	≤ 20	≥ 80
Cihly, ne keramika	≤ 10	≤ 30	≥ 80	
Vápenopískové cihly			≤ 5	
Ostatní materiály (porézní zdící prvky, lehký beton, sádra, malta, ...)	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Asfalt	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
Nežádoucí materiály (sklo, plasty, kovy, dřevo, papír, ...)	≤ 0.2	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 1

Tabulka č. 5: Požadavky na recyklované kamenivo dle DIN 4226-100: 2002 [18]

Vlastnosti	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Objemová hmotnost ve vysušeném stavu [kg/m ³]	≥ 2000	≥ 2000	≥ 1800	≥ 1500
Maximální nasákavost po 10 min. [%]	10	15	20	bez limitu

Možnosti použití recyklovaného kameniva dále uvádí směrnice „DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, ze které plyne, že recyklované kamenivo typu 1 a 2 lze použít pro betony do pevnostní třídy C 30/37. Nelze jej však použít pro předpjatý a lehký beton.

Z hlediska expozičních tříd lze recyklované kamenivo použít jako náhrada přírodního kameniva za suchých okolních podmínek (např. XC1) v souladu s třídou WO směrnice o alkáliích bez dalších podmínek.

Pokud se jedná o použití recyklovaného kameniva ve vlhkém prostředí v souladu s třídou WF směrnice o alkáliích, tj. expoziční třídy X0, XC1, XC4, XF1, XF3, XA1, lze jej použít při dodržení stanovených podmínek:

- 1) Původ recyklovaného kameniva je známý, díky čemuž se dá přiřadit neškodná třída citlivosti na alkalické látky. Zároveň je výrobce povinen prokázat a písemně doložit neškodný původ kameniva s ohledem na třídu citlivosti na alkalické látky. Dále musí být přijata opatření proti vzniku alkalicko-křemičité reakce.

- 2) Pokud původ recyklovaného kameniva není znám, je třeba jej používat v souladu s pokyny tříd alkalických látek E III-S. Dále je třeba přijmout opatření, která mají zabránit vzniku alkalicko-křemičité reakce v souladu se Směrnicí o alkáliích, část 3.

Jestliže je dle příslušných postupů posouzeno, že původní beton je odolný vůči alkalickým látkám, lze z něj vyrobené recyklované kamenivo dle WA směrnice o alkáliích použít ve vlhkém prostředí s externím působením alkálií.

V případě že pochází recyklované kamenivo z betonu z produkce výrobců betonu, kde byl beton zpracován bez předchozího použití, lze jej použít bez omezení až do 5 % hmotnosti celkového množství kameniva. Zároveň odpadá povinnost zkoušet kamenivo dle příslušných norem. [18]

6.1.2. Rakousko

Norma věnující se využití recyklovaného kameniva ve stavebnictví se nazývá ÖNORM B 3140: 2015 03 01 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für das Bauwesen“. Tato norma dále v důsledku speciálních klimatických, geografických a topografických podmínek v Rakousku upřesňuje požadavky na recyklované kamenivo pro asfaltové a povrchové úpravy silnic, letišť a ostatních dopravních ploch dle kategorií ÖNORM EN 13043. [18]

6.1.3. Belgie

Norma – technický předpis, upravující složení recyklovaného kameniva v Belgii, se nazývá PTV 406 “Recycled aggregate from construction and demolition waste”. Dle složení rozlišuje dva druhy recyklovaného kameniva:

- Recyklované kamenivo vysoké kvality,
- recyklované kamenivo.

Vlastnosti odpovídají vlastnostem uvedeným v EN 12620. Podrobné vlastnosti a rozdělení jsou uvedeny v tabulce č. 6 níže. [18]

Tabulka č. 6: Požadavky na recyklované kamenivo dle PVT 406 [18]

Složení [% hmotnosti]	Recyklované kamenivo vysoké kvality	Recyklované kamenivo
Betony a přírodní kamenivo (Rc)	≥ 90 (Rc90)	≥ 70 (Rc70)
Nestmelené kamenivo (Ru) + Beton (Rc) + Sklo (Rg)	≥ 95 (Rcu95)	≥ 90 (Rcug90)
Pálené zdící prvky (Rb)	Nerozhodující	≤ 10 (Rb10)
Asfaltové materiály (Ra)	≤ 1 (Ra1-)	≤ 5 (Ra5-)
Sklo (Rg)	≤ 0.5 (XRg0.5-)	≤ 2 (Rg2-)
Ostatní materiály (X)		≤ 1 (X1-)
Plovoucí materiály [cm ³ /kg] (FL)	≤ 2 (FL2-)	≤ 5 (FL5-)

Další požadavky jsou kladeny na recyklované kamenivo z hlediska silničních konstrukcí, které jsou uvedeny v SB250 a přednormě NBN B15-001, která odpovídá normě EN 206. Tyto požadavky na vlastnosti jsou uvedeny v tabulce č. 7. [18]

Tabulka č. 7: Požadavky na vlastnosti recyklovaného kameniva dle SB250 a BNB B15-001B [18]

Vlastnost	Požadavek
Velikost částic [mm]	$d \geq 4$ and $D \geq 10$
Obsah jemných částic	f1.5
Odolnost proti drcení	LA40
Index plochosti	F120
Složení	RC90/Rcu95/Ra1- /XRg0.5-/F12-
Objemová hmotnost v suchém stavu [kg/m^3]	≥ 2200
Nasákavost ve 24 hodinách [%]	$\leq 10 \pm 2$
Sírany rozpustné ve vodě	SS0.2
Obsah humusovitých složek	OSPASS
Vliv na počátek tuhnutí	A40

6.1.4. Nizozemsko

Holandské centrum CUR (Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving) stanovilo dvě třídy recyklovatelného kameniva a specifikace pro jejich použití. Minimální objemová hmotnost stanovena normou je $2100 \text{ kg}/\text{m}^3$, zatímco maximální hodnota nasákavosti není stanovena. Norma také nestanovuje omezení pro použití hrubého recyklovaného kameniva do betonu, za podmínky, že není použito v agresivním prostředí. [18]

Tabulka č. 8: Požadavky na recyklované kamenivo [18]

Složení (% hmotnosti)	Betonové kamenivo [%]	Cihelné kamenivo [%]
Beton	≥ 95	Nedefinováno
Zdívko	≤ 5	≥ 65
Lehký beton, přírodní kamenivo, keramické produkty	-	≤ 20
Pórobeton	-	≤ 10
Malta	-	≤ 25
Maximální pevnostní třída betonu	C 40/50	C 20/25

6.1.5. Dánsko

Dánská betonářská asociace „The Danish Concrete Association“ vydala normu pro použití recyklovaného kameniva již v roce 1990. Následně byl přidán dodatek č.34 pro použití recyklovaného kameniva do betonu pro pasivní třídy prostředí. Doporučení této normy se vztahují na částice $> 4 \text{ mm}$ a dle vlastností dělí recyklované kamenivo do 3 skupin:

- Typ GP 1: Objemová hmotnost v suchém stavu $> 2200 \text{ kg/m}^3$ s obsahem betonového recyklovaného kameniva z recyklačního střediska frakce 0-32 mm a betonové recyklované kamenivo z jiných zdrojů frakce 4-32 mm,
- Typ GP 1: betonové recyklované kamenivo neověřeného původu se stejnými požadavky frakce 0-32 mm,
- Typ GP 2: objemová hmotnost $> 1800 \text{ kg/m}^3$. [18]

Tabulka č. 9: Rozdělení recyklovaného kameniva [18]

Vlastnosti	GP 1- RCA ověřené	GP 1- RCA neověřené	GP 2
Minimální objemová hmotnost [kg/m^3]	2200	2200	1800

6.1.6. Portugalsko

V roce 2006 vydala Národní laboratoř pro stavební inženýrství (LNEC) normu E 471, která stanovuje požadavky na hrubé recyklované kamenivo určené pro použití do betonu. Norma předepisuje tři třídy hrubého kameniva (RCA) z SDO. Z důvodu vysoké nasákavosti jemného kameniva a vysokého podílu jemných částic nejsou požadavky na jemné recyklované kamenivo stanoveny. Kamenivo se dělí do tříd následovně: [18]

- ARB1 a ARB2: s obsahem převážně betonu a přírodního kameniva,
- ABC: s obsahem betonu, přírodního kameniva a zdiva.

Požadavky na vlastnosti a složení recyklovaného kameniva jsou uvedeny v tabulkách č.10 a 11. Dále jsou také uvedeny požadavky na použití recyklovaného kameniva do betonových konstrukcí, které jsou nastíněny v tabulce č.12.

Tabulka č. 10: Složení recyklovaného kameniva dle LNEC E 471 [18]

Složení [% hmotnosti]	ARB1	ARB2	ARC
Beton a přírodní kamenivo	≥ 90	≥ 70	≥ 90
Zdivo	≤ 10	≤ 30	-
Asfalt	≤ 5	≤ 5	≤ 10
Lehké materiály [objemová hmotnost $< 1000 \text{ kg/m}^3$]	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Ostatní materiály [sklo, plasty, suť, jíl, kovy a další]	≤ 0.2	≤ 0.5	≤ 1

Tabulka č. 11: Vlastnosti recyklovaného kameniva dle LNEC E 471 [26]

Vlastnosti	ARB1	ARB2	ARC
Objemová hmotnost [kg/m^3]	≥ 2200		≥ 2000
Nasákavost [%]	≤ 7		≤ 7
Obsah jemných částic [%]	≤ 4		≤ 3
Sířany rozpustné v kyselinách [%]	≤ 0.8		≤ 0.8

Tabulka č. 12: Použití recyklovaného kameniva do betonových konstrukcí [18]

Třídy recyklovaného kameniva	Maximální možná náhrada [%]		Použití podle expozičních tříd	Maximální pevnostní třída betonu
	Hrubé	Jemné		
ARB1	25	0	X0, XC1-XC4, XS1, XA1	C40/50
ARB2	20	0		C35/45
ARC	nedefinováno	0	nekonstrukční betony	nedefinováno

6.1.7. Česká republika

V České republice stanovuje doporučení pro recyklované kamenivo norma ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, kde je uvedena maximální náhrada hrubého kameniva dle druhu recyklátu a stupně vlivu prostředí.

Tabulka č. 13: Maximální náhrada hrubého kameniva dle ČSN EN 206+A1 [19]

Druh recyklovaného kameniva	Stupně vlivu prostředí			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Všechny ostatní stupně ^a
Typ A: (Rc ₉₀ , Rcu ₉₅ , Rb ₁₀₋ , Rd ₁₋ , FL ₂₋ , XRg ₁₋)	50 %	30 %	30 %	0 %
Typ B ^b : (Rc ₅₀ , Rcu ₇₀ , Rb ₃₀₋ , Rd ₅₋ , FL ₂₋ , XRg ₂₋)	50 %	20 %	0 %	0 %

^a Recyklované kamenivo druhu A ze známého zdroje se může použít pro stupně prostředí, pro které byl navržen původní beton, s maximálně 30%-ním nahrazením.
^b Recyklované kamenivo druhu B se nepoužívá do betonu třídy pevnosti v tlaku > C30/37

Z hlediska vlastností kameniva jsou dále v normě ČSN EN 206+A1 uvedena doporučení týkající se hrubého recyklovaného kameniva, které jsou nastíněna v tabulce níže. [19]

Tabulka č. 14: Doporučené vlastnosti hrubého recyklovaného kameniva [19]

Vlastnost ^a	Druh	Kategorie podle EN 12620
Obsah jemných částic	A+B	Kategorie nebo deklarovaná hodnota
Index plochosti	A+B	$\leq Fl_{50}$ nebo $\leq SI_{55}$
Odolnost proti drcení	A+B	$\leq LA_{50}$ nebo $\leq SZ_{32}$
Objemová hmotnost vysušených zrn	A	$\geq 2100 \text{ kg/m}^3$
	B	$\geq 1700 \text{ kg/m}^3$
Nasákavost zrn	A+B	Hodnota musí být určena
Složky ^b	A	Rc ₉₀ , Rcu ₉₅ , Rb ₁₀₋ , Rd ₁₋ , FL ₂₋ , XRg ₁₋
	B	Rc ₅₀ , Rcu ₇₀ , Rb ₃₀₋ , Rd ₅₋ , FL ₂₋ , XRg ₂₋
Sířany rozpustné ve vodě	A+B	$\leq SS_{0,2}$
Obsah ve vodě rozpustných chloridových iontů	A+B	Hodnota musí být určena
Vliv na začátek tuhnutí	A+B	$\leq A_{40}$
^a Kategorie NR (bez požadavků) se může použít pro jiné vlastnosti, neuvedené v této tabulce. Pro ně může být kategorie NR deklarována podle EN 12620 ^b Pro speciální aplikace vyžadující vysokou kvalitu povrchů, by měla být složka FL omezena na FL _{0,2-}		

6.2. Zkoušky recyklovaného kameniva

Recyklované kamenivo se zkouší stejně jako kamenivo přírodní. Tyto zkoušky jsou zaměřeny na vlastnosti:

- Geometrické,
- fyzikální,
- chemické.

Mezi zkoušky, které spadají pod zkoušení geometrických vlastností, řadíme tvarový index, který ovlivňuje návrh receptury betonu. Dále je to prosévací zkouška, díky které lze zjistit čáru zrnitosti, podíl jemných částic a modul jemnosti.

Mezi fyzikální vlastnosti pak řadíme objemovou hmotnost, sypnou hmotnost, mezerovitost, nasákavost, vlhkost, odolnost proti drcení a otěru a další.

Do zkoušení chemických vlastností kameniva se řadí chemický rozbor, zkouška vyluhování vodou a stanovení reaktivnosti kameniva s alkáliemi. [20]

6.3. Vlastnosti recyklovaného kameniva

Klíčové vlastnosti recyklovaného kameniva jsou:

- Objemová hmotnost,
- nasákavost,
- přítomnost znečišťujících látek.

6.3.1. Objemová hmotnost recyklovaného kameniva

Oproti přírodnímu kamenivu bývá objemová hmotnost recyklovaného kameniva nižší. Objemová hmotnost přírodního kameniva se pohybuje v rozmezí 2600-2700 kg/m³, u hrubého recyklovaného kameniva tato hodnota činí 2300 – 2500 kg/m³ a u drobného recyklovaného kameniva se dostáváme ještě na nižší hodnoty 2150 – 2350 kg/m³. Takto nízká objemová hmotnost u drobného recyklovaného kameniva je důsledkem většího obsahu ztvrdlé cementové pasty, která má nižší objemovou hmotnost než kamenivo přírodní a také ji více setrvává na povrchu drobného recyklovaného kameniva, než je tomu u hrubého recyklovaného kameniva. [21]

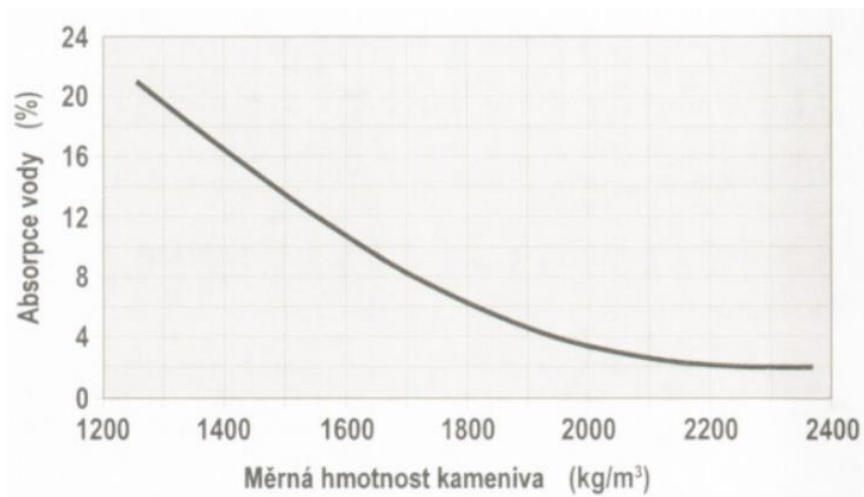
Tabulka č. 15: Porovnání objemových hmotností recyklovaného a přírodního kameniva [21]

Typ kameniva	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Recyklované hrubé	2300 – 2500
Recyklované jemné	2150 – 2350
Přírodní	2600 – 2700

6.3.2. Nasákavost recyklovaného kameniva

Pro maximální zrno recyklovaného kameniva 4-32 mm se nasákavost obecně pohybuje v rozmezí 4-9 %, což je mnohem vyšší než nasákavost přírodního kameniva, která se pohybuje okolo 0,5-2,5 %. U drobného recyklovaného kameniva se nasákavost pohybuje kolem 12 %.

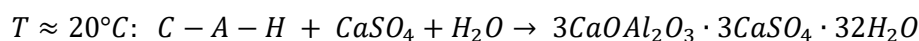
Z níže uvedeného grafu je patrné, že mezi objemovou hmotností a nasákavostí existuje závislost. Se snižující objemovou hmotností se zvyšuje nasákavost, což je způsobeno pórovitostí cementové pasty. Zvyšuje se tak potřebná doba k nasáknutí recyklovaného kameniva oproti kamenivu přírodnímu, což může činit poníže při dodržení vodního součinitele, pokud recyklované kamenivo není zcela nasáklé. Pro dosažení stavu nasáklého povrchově suchého recyklovaného kameniva je třeba, aby bylo kamenivo dokonale nasáklé a následně ponechané 2 až 3 hodiny na suchu. [21]



Obrázek č. 10: Závislost nasákavosti na měrné hmotnosti recyklovaného kameniva [21]

6.3.3. Látky znečišťující recyklované kamenivo

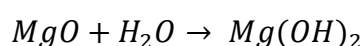
Odstranění látek, které znečišťují recyklované kamenivo, je pravděpodobně nejvýznamnější problém, který je potřeba vyřešit. Mezi takové látky řadíme sádrovec (síran vápenatý), který se může nacházet v omítkových maltách při demolici starých budov. Maximální obsah síranů (SO_3) je pro přírodní kamenivo 0,2 %. Může totiž docházet k reakci síranů s C-A-H nebo C-S-H ze ztvrdlé cementové pasty za vzniku ettringitu nebo thaumasitu, což má za důsledek porušení betonu vlivem zvětšování objemu.



Dalšími znečišťujícími látkami jsou chloridy, které se v recyklovaném kamenivu mohou nacházet v případě, že byla demolovaná konstrukce vystavena rozmrazovacími solemi nebo mořské vodě. K odstranění chloridů z recyklovaného kameniva se využívá fakt, že jsou dobře rozpustné ve vodě. Kamenivo lze tedy vyprat v horké vodě.

Látky jako papír, dřevo, sklo, hliník snižují pevnosti nového betonu. Z tohoto důvodu může být takto znečištěný recyklát použit pouze pro betony nízké pevnosti $f_{\text{cu/ck}} < 15$ MPa nebo do podkladů.

Na pozoru bychom také měli být při použití recyklovaného kameniva pocházejícího z demolic konstrukcí, které obsahují žáruvzdorné cihly obsahující MgO. Po smíchání recyklátu s vodou může docházet k expanzi za vzniku $\text{Mg}(\text{OH})_2$, který porušuje beton svými rozpínávacími účinky.



Následující tabulka představuje doporučení RILEM pro použití recyklovaného kameniva na základě jeho vlastností, jako je objemová hmotnost, nasákavost a kontaminace. S ohledem na tyto vlastnosti je doporučeno použití recyklovaného kameniva rozděleno na úrovně kvality konstrukcí: Typ I, Typ II a Typ III, který představuje nejlepší beton. [21]

Tabulka č. 16: Doporučení na recyklované kamenivo z hlediska vlastností (RILEM) [21]

Požadované vlastnosti	Hrubé kamenivo		
	Typ I	Typ II	Typ III
Objemová hmotnost vysušeného materiálu [kg/m^3]	> 1500	> 2000	> 2400
Nasákavost [%]	< 20	< 10	< 3
Materiál s objemovou hmotností ve stavu NPSK* < 2200 kg/m^3 [%]	-	< 10	< 10
Materiál s objemovou hmotností ve stavu NPSK* < 1800 kg/m^3 [%]	< 10	< 1	< 1
Materiál s objemovou hmotností ve stavu NPSK* < 1000 kg/m^3 [%]	< 1	< 0,5	< 0,5
Obsah skla, bitumenu atd. [%]	< 5	< 1	< 1
Obsah kovových částic [%]	< 1	< 1	< 1
Obsah organických látek [%]	< 1	< 1,5	< 0,5
Jemné podíly < 0,063 mm [%] písek < 4 mm [%]	< 3 < 5	< 2 < 5	< 2 < 5
Obsah síranů vyjádřený jako SO_3 [%]	< 1	< 1	< 1

*NPSK – nasáklé povrchově suché kamenivo

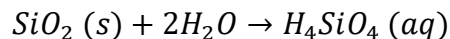
Následná tabulka ukazuje, do jaké míry lze využít recyklované kamenivo v závislosti na jeho původu a na charakteristické pevnosti $f_{\text{cu/ck}}$. [21]

Tabulka č. 17: Doporučené použití recyklovaného kameniva v závislosti na charakt. pevnosti [21]

Původ recyklátu	$f_{\text{cu/ck}}$	Procento recyklovaného kameniva
Stavební demolice	< 15 MPa	až do 100 %
Demolice betonu	≤ 25 MPa	až do 60 %
	≤ 35 MPa	až do 30 %
Drcené prefabrikáty	≤ 55 MPa	až do 5 %

6.3.4. Alkalicko-křemičitá reakce s recyklovaným kamenivem

Alkalicko-křemičitou reakci (ASR – alkali-silica reaction) lze popsat jako soubor reakcí mezi reaktivním kamenivem, alkáliemi a vlhkostí za přítomnosti vápenatých iontů, které doprovází rozpínání, což může vést ke vzniku trhlin jak v kamenivu, tak v cementové pastě. Tato reakce je způsobena rozpustností a mobilitou SiO_2 , který reaguje s ionty K^+ , Ca^{2+} a Na^+ za vzniku alkalicko-silikátových gelů, které při své hydrataci zvyšují svůj objem. Rozpustnost SiO_2 ve vodě lze popsat jako:



Vliv na rozpustnost má řada faktorů, mezi které patří modifikace SiO_2 (zde rozpustnost vzrůstá v řadě: křemen – α -cristobalit – β -cristobalit – tridimit – amorfní SiO_2), pH prostředí (maximum rozpustnosti je dosaženo při pH 11-13), teplota a specifický povrch zrn.

Z hlediska recyklovaného kameniva při použití do betonu je třeba přihlídnout k několika skutečnostem, a to, zdali původní beton neobsahoval reaktivní kamenivo, a také jestli je omezen obsah alkálií v novém betonu nebo v použitém cementu. Obecně se však doporučuje, aby se recyklované kamenivo bralo jako možné reaktivní kamenivo, díky možné variabilitě skladby kameniva. Případnou nereaktivnost je tedy vhodné prokázat. [22][23]

6.4. Druhy recyklovaných kameniv

Mezi hlavní druhy recyklátu patří:

- Betonový recyklát,
- cihelný recyklát,
- směsný recyklát,
- asfaltový recyklát.

6.4.1. Cihelný recyklát

Cihelný recyklát je obvykle produkován ve třech zrnitostních frakcích, mezi které patří frakce 0/16 mm, 16/32 mm a 32/80 mm. Pro svou nízkou pevnost v tlaku a vysokou nasákavost je používán zejména jako materiál pro násypy a zásypy. Pokud je však recyklát kvalitní, lze jej použít jako lehké plnivo pro výrobu monolitického cihlobetonu, který může být využit pro lehčené, výplňové, nenosné části konstrukcí stěn nebo stropů.

Své využití má i při výrobě maltovin, kde se jako pojivo používá vzdušné nebo hydraulické vápno a cement. Používá se drobná frakce ≤ 4 mm, která zlepšuje tepelně izolační vlastnosti materiálu. Pevnosti takových maltovin se pohybují od 1 až 10 MPa.

V neposlední řadě se tento typ recyklátu používá také při výrobě prefabrikovaných výrobků, mezi které řadíme například vibrolisované tvárnice, stěnové dílce nebo lisované cihly plné nepálené. Pro tyto cihly se využívá recyklát frakce 0 až 16 mm spolu s cihlářskými hlínami a případně také s 10% příměsí portlandského cementu. Výsledná pevnost takto vyrobených cihel dosahuje pevnosti v tlaku až 8 MPa. [4] [11]

6.4.2. Betonový recyklát

Oproti cihelnému recyklátu má tento typ recyklátu podstatně lepší fyzikální vlastnosti a díky tomu také širší využití, a to i v rámci materiálů pro nosné konstrukce. Zrna betonového recyklátu mají vhodný tvarový index, oproti přírodnímu kamenivu však vykazují nižší objemovou hmotnost a vyšší nasákavost. Používá se zejména jako součást plniva do betonů a svými fyzikálními vlastnosti je plnohodnotnou náhradou přírodního kameniva. Své využití nalezne také jako podkladový materiál při stavbě komunikací nebo jako plnivo do živičných směsí či zásypů. [4] [17] [21]

6.4.3. Směsný recyklát

Směsný recyklát se nepovažuje za kamenivo dle ČSN EN 12620+1. Je směsí betonového a cihelného recyklátu a případně dalších příměsí jako keramika, omítky, malta, vlákna. Své využití nalezne zejména jako náhrada zemin pro stavbu násypů, zásypů nebo pro terénní úpravy. [25] [26]

6.4.4. Asfaltový recyklát

Tento typ recyklátu je vhodný pro opravy, ale i pro nové vrstvy silničních komunikací. V případě málo zatížených vozovek, pro spodní podkladní vrstvy nebo pro zpevnění štěrkopískových podsypných vrstev se aplikují bez přidání nového pojiva. Další využití je v rámci technologie výroby za studena s použitím vhodných emulzí nebo s přidáním hydraulického pojiva, kde se využívá silniční cement nebo hydraulické vápno. Lze také kombinovat emulze a hydraulické pojivo pro provádění nových stmelovaných podkladních vrstev. [4]

7. BETON Z RECYKLOVANÉHO KAMENIVA

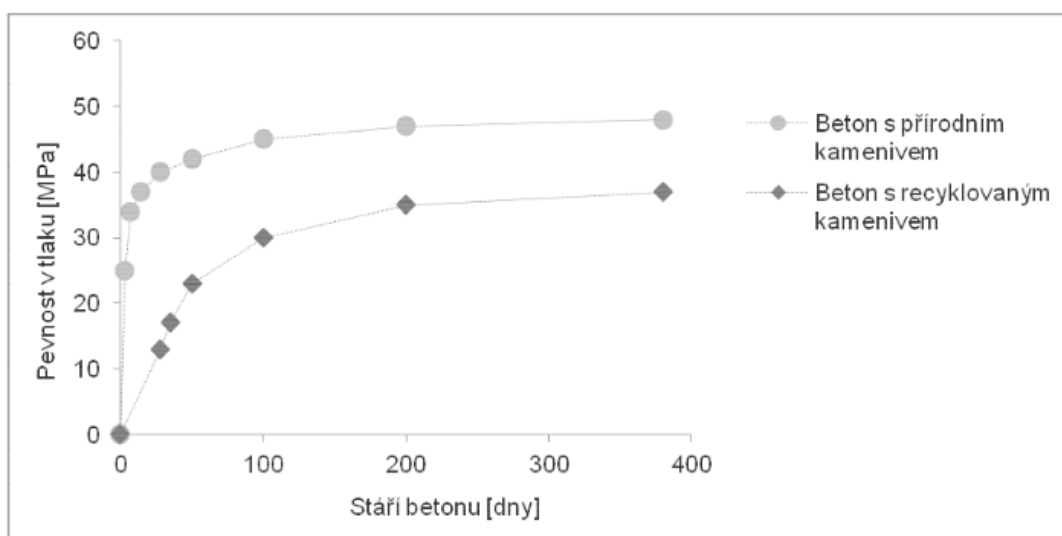
7.1. Beton z recyklovaného betonu

Ze zahraničních a tuzemských výzkumů vyplývá řada poznatků, se kterými je třeba počítat při návrhu betonové směsi.

Z hlediska čerstvého betonu je známo, že využitím recyklovaného kameniva se nepříznivě ovlivní konzistence. Vliv na konzistenci má zejména drobná a jemná frakce, zatímco hrubá frakce konzistenci ovlivní jen minimálně. Množství záměsové vody je nutno zvýšit o cca 5 %. Pokud je použito drobné drcené recyklované kamenivo, tak se tato hodnota zvýší až na 15 %. Zvýšení je způsobeno drsnou texturou recyklovaného kameniva v důsledku lpící cementové pasty na povrchu zrn. Tento problém lze překonat použitím plastifikátorů.

Frakce 0-4 mm je omezena na 20 až 40 % podílu drobné frakce kameniva, protože obsahují velký podíl cementového kamene, který bývá z části korodován vlivem karbonatace za vzniku CaCO_3 . Pro zabránění vzniku trhlin se doporučuje používat maximální velikost zrna betonového recyklátu 16 až 22 mm. Naopak není vhodné využívat recyklát s obsahem SO_3 vyšší než 1 %.

V porovnání s betonem z přírodního kameniva dochází k poklesu pevnosti v tlaku o cca 4-20 %, což je způsobeno díky vyšší pórovitosti a nižší objemové hmotnosti recyklátu. Velikost tohoto poklesu závisí na dávce, frakci a kvalitě betonového recyklátu. Na obrázku níže je možno sledovat nárůst pevnosti v tlaku v porovnání s betonem s přírodním kamenivem.



Obrázek č. 11: Vývoj pevností v tlaku betonu s přírodním a recyklovaným kamenivem [28]

Dále dochází ke snížení statického modulu pružnosti o 10 až 30 %, zvýšení součinitele dotvarování až od 50 % a také zvýšení smrštění betonu o 20 až 40 %. Dochází také ke snížení mrazuvzdornosti betonu, což je způsobeno zejména množstvím drobné frakce. Použití této frakce není možné pro mrazuvzdorné betony. Zhoršení nastává také u odolnosti betonu vůči pronikání chloridů. Bylo však zjištěno, že přidáním popílku do betonu s recyklovaným kamenivem lze tuto odolnost zvýšit. Naopak chování betonu z recyklovaného kameniva při změnách teploty a vlhkosti je stejné, jako u betonu s přírodním kamenivem. Ve srovnání s běžným betonem je také třeba brát v potaz také vyšší nasákavost v rozmezí 20 až 100 %.

Ze zahraničních výzkumů vyplývá, že optimální náhrada jemného betonového recyklátu je vhodná do 30 % množství jemného kameniva, kdy ještě nedochází k výraznému ovlivnění mechanických vlastností. Pevnost v tlaku se snížila o 3,7 %, pevnost v tahu o 5,2 % a modul pružnosti o 3,7 %. [35] Maximální náhrada hrubého kameniva betonovým recyklátem je pro konstrukční betony 50 %. [36]

Dle normy ČSN EN 206 lze v závislosti na typu recyklovaného kameniva (A, B) a jeho množství použít beton do expozičních tříd XC1-XC4, XF1, XA1 a XD1 (viz Tabulka č. 13: Maximální náhrada hrubého kameniva dle ČSN EN 206+A1). Beton s recyklovaným kamenivem lze tedy využít u základových konstrukcí nebo u konstrukcí v interiéru. [21][27][28][29][30][33]

7.2. Cihlobeton

Pro výrobu cihlobetonů je třeba volit takový cihelný recyklát, který nemá negativní dopady na hydratační procesy cementu a na zdraví člověka. Mezi potencionálně nebezpečné materiály lze řadit například části zdiva z komínových těles, které jsou za dobu svého provozu prosyceny kondenzáty spalin. Dále se jedná o pálené střešní krytiny, které jsou znečištěny kouřovými zplodinami nebo napadeny mechy, plísněmi či houbami. Nevhodná je také stavební suť obsahující jedovaté látky, které by se po použití do betonu mohly stát zdrojem zdravotních problémů. V neposlední řadě jsou to také zplodiny z různých technologických procesů, které se mohou následně vypařovat nebo po kontaktu s vodou vyluhovat.

Cihlobeton je možné běžně vyrábět z cihelného recyklátu frakce 0/16 mm, cementu a vody. Konzistenci cihlobetonu negativně ovlivňuje dávka frakce 4/8 mm. Z důvodu vysoké nasákavosti (až 25 %) je třeba kamenivo předem namáčet. Pokud nahradíme frakci 8/16 mm přírodním kamenivem, dosáhneme objemových hmotností nad 2000 kg/m³. Stejně jako u

betonového recyklátu i zde je problematická frakce 0/4 mm, kterou je vhodné nahradit alespoň z 50 až 65 % přírodním kamenivem. Optimální podíl drtě 4/8 mm je 50 % a zbývajících 50 % se doplní přírodním kamenivem stejné frakce, při dávce cementu 350 kg/m³.

Konečné pevnosti v tlaku takto vyrobených betonů dosahují 13 až 17 MPa. Z hlediska pevnosti v příčném tahu a pevnosti v tlaku je poměr stejný, jako u obyčejného betonu, tedy přibližně 1:10. Statický modul pružnosti cihlobetonu je o 30-50% nižší než obyčejného betonu se srovnatelnou pevností v tlaku. Porovnáme-li smrštění na vzduchu nebo nabývání objemu pod vodou, vede si cihlobeton oproti obyčejnému betonu hůře. Hodnoty jsou větší o cca 10-20 %. Zkoušky vzlínivosti a nasákavosti ukázaly, že cihlobetony nejsou dostatečně mrazuvzdorné, aby byly ve stavu nasycení vodou vystaveny vlivu záporných teplot bez toho, aby se poškodily. Pokud je však frakce 0/4 mm úplně nahrazena přírodním pískem a frakce 4/8 mm a 8/16 mm odděleně dávkována, lze dosáhnout takových výsledků, že cihlobetony odolají 150 zmrazovacím cyklům. [24][27][33]

8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části je návrh složení betonů třídy C 25/30 a C 30/37 s náhradou přírodního hrubého kameniva recyklovaným kamenivem betonovým a cihelným. Dále bude provedeno porovnání těchto betonů oproti betonům s přírodním hrubým kamenivem a jejich ekonomický dopad na 1 m³ betonu.

8.1. Beton s cihelným recyklovaným kamenivem

Pro návrh cihlobetonů byl použit cement CEM I 42,5 R Mokrý. Dále bylo uvažováno s elektrárenským popílkem z elektrárny Opatovice a plastifikační přísadou na bázi polykarboxylátů Mapei DYNAMON SX 14 v dávce přibližně 1 % z množství cementu.

Jako kamenivo byl použit cihelný recyklát frakce 0/8 mm a 8/16 mm. Křivka zrnitosti byla navržena dle Fullera. Jelikož byl návrh proveden na kamenivo v suchém stavu, bylo potřeba upravit množství záměsové vody kvůli nasákavosti cihel cca 15 % hmotnosti.

Návrhy složení cihlobetonů C20/25 a C 30/37 jsou uvedeny v tabulkách č. 18 a 19.

Tabulka č. 18: Návrh složení cihlobetonu C 20/25

Složky	1 m ³
Cement CEM I 42,5 R Mokrý [kg]	305
Elektrárenský popílek Opatovice [kg]	60
Mapei Dynamom SX14 [kg]	3,1
Voda [kg]	180
Voda pro navlhčení kameniva na 15 % [kg]	170
Voda záměsová [kg]	290
Rb 0/8 mm vysušené [kg]	833
Rb 8/16 mm vysušené [kg]	360
Kamenivo Rb celkem [kg]	1193
Vodní součinitel [-]	0,88

Tabulka č. 19: Návrh složení cihlobetonu C 30/37

Složky	1 m ³
Cement CEM I 42,5 R Mokrý [kg]	365
Elektrárenský popílek Opatovice [kg]	80
Mapei Dynamom SX14 [kg]	3,6
Voda [kg]	187
Voda pro navlhčení kameniva na 15 % [kg]	165
Voda záměsová [kg]	298
Rb 0/8 mm vysušené [kg]	745
Rb 8/16 mm vysušené [kg]	367
Kamenivo Rb celkem [kg]	1112
Vodní součinitel [-]	0,75

8.2. Beton s betonovým recyklovaným kamenivem

Stejně jako pro cihlobeton, tak i pro beton s betonovým recyklovaným kamenivem byl použit cement CEM I 42,5 R Mokrý a plastifikační přísada na bázi polykarboxylátů Mapei DYNAMON SX 14 opět v dávce přibližně 1 % z množství cementu.

Pro frakci 0/4 mm byl zvolen písek Žabčice. Jako náhrada hrubého kameniva byl použit betonový recyklát frakce 4/8 a 8/16 mm. Křivka zrnitosti byla opět navržena dle Fullera.

V tabulkách č. 20 a 21 jsou uvedeny návrhy složení betonu s betonovým recyklovaným kamenivem jakožto náhrada přírodního hrubého kameniva.

Tabulka č. 20: Návrh složení betonu s betonovým recyklátem C 20/25

Složky	1 m ³
Cement CEM I 42,5 R Mokrý [kg]	335
Mapei Dynamom SX14 [kg]	3,3
Písek 0/4 Žabčice [kg]	875
Rc 4/8 mm [kg]	241
Rc 8/16 mm [kg]	565
Voda záměsová [kg]	188
Vodní součinitel [-]	0,56

Tabulka č. 21: Návrh složení betonu s betonovým recyklátem C30/37

Složky	1 m ³
Cement CEM I 42,5 R Mokrý [kg]	380
Mapei Dynamom SX14 [kg]	3,8
Písek 0/4 Žabčice [kg]	852
Rc 4/8 mm [kg]	235
Rc 8/16 mm [kg]	550
Voda záměsová [kg]	192
Vodní součinitel [-]	0,51

8.3. Ekonomický dopad na 1 m³ betonu

Tato část experimentální práce je věnována ekonomickému dopadu náhrady hrubého přírodního kameniva betonovým a cihelným recyklátem.

Pro oba typy recyklátu byly zjištěny ceny v okolí Brna do 65 km. Pro vyhledání cen recyklátu byl použit portál BetonServer. [37] Zpravidla jsou dostupné tzv. široké frakce kameniva. Dále byly zjištěny ceny přírodních těžených a drcených kameniv frakce 4/8 a 8/16 zejména od společnosti Českomoravský šterk a.s. [38] a dále České šterkopísky spol s.r.o. [39]

V tabulkách níže jsou uvedeny ceny a frakce recyklovaných a přírodních kameniv. Samozřejmě je třeba brát v potaz, že průměrné ceny jsou ovlivněny množstvím společností, které jsou zde uvedeny.

Tabulka č. 22: Ceny betonového recyklátu v okolí Brna

Název společnosti	Frakce [mm]	Cena (bez DPH) [Kč/t]
MORAVOSTAV Brno, a.s. stavební společnost recyklační středisko Modřice	0/8	50
	8/32	150
DUFONEV R.C., a.s. - deponie	0/16	150
POKROS, spol. s r.o. - Čebín	4/32	190
HUTIRA - OMICE, s.r.o.- Kamenolom Omice	0/32	45
PEDOP s.r.o. - recyklační středisko Lipovec	0/32	100
TLAK SMOLÍK s.r.o.	0/10	200
	4/10	400
	10/32	250
Očenášek - recyklační centrum Prostějov	8/32	150
Průměrná cena	Různá	168,5

Tabulka č. 23: Ceny cihelného recyklátu v okolí Brna

Název společnosti	Frakce [mm]	Cena (bez DPH) [Kč/t]
MORAVOSTAV Brno, a.s. stavební společnost recyklační středisko Modřice	0/8	Zdarma
	8/32	30
POKROS, spol. s r.o. - Čebín	4/32	Zdarma
Očenášek - recyklační centrum Prostějov	8/32	30
Průměrná cena	Různá	15

Tabulka č. 24: Ceny těženého a drceného kameniva v ČR

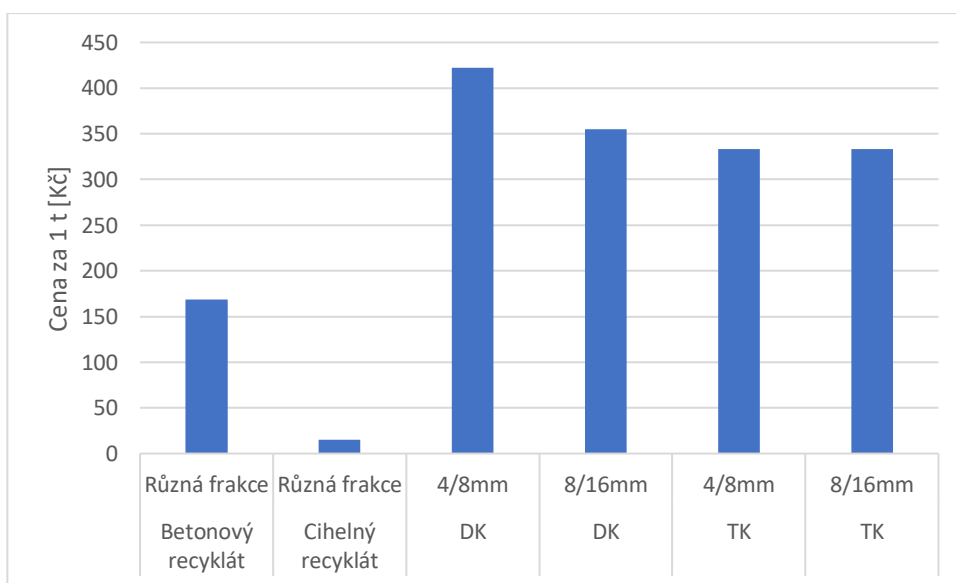
Název společnosti	Lokalita	Frakce [mm]	Cena (bez DPH) [Kč/t]
Českomoravský štěr, a.s.	Opatovice	DK 4/8	420
	Opatovice	DK 8/16	350
	Olbramovice	DK 4/8	420
	Olbramovice	DK 8/16	350
	Luleč	DK 4/8	420
	Luleč	DK 8/16	350
	Hrabůvka	DK 4/8	430
	Hrabůvka	DK 8/16	370
	Mankovice	TK 4/8	410
	Mankovice	TK 8/16	410
	Řípec	TK 4/8	350
	Řípec	TK 8/16	350
České štěrkopísky spol. s r.o. Pískovna Straškov	Straškov	TK 4/8	240
	Straškov	TK 8/16	240
Průměrná cena DK	4/8	422,5	
	8/16	355	
Průměrná cena TK	4/8	333	
	8/16	333	

TK = těžené kamenivo, DK = drcené kamenivo

Z uvedených dat je zřejmé, že nejlevnější kamenivo je cihelný recyklát, který lze dokonce v některých případech pořídit zdarma. Otázkou je, jaké je kamenivo kvality s ohledem na jeho původ a také případný obsah znečišťujících látek.

Betonový recyklát je oproti cihelnému již citelně dražší. Průměrná cena tohoto recyklátu je u vybraných společností 168,5 Kč/t. Ceny se pohybují od 50 do 400 Kč/t v závislosti na frakci recyklátu.

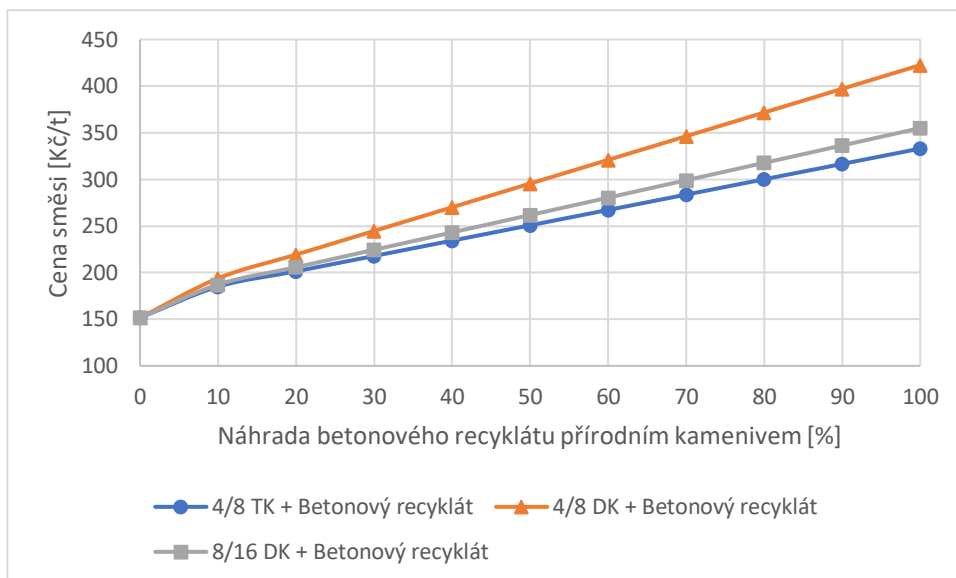
Nejdražší jsou kameniva přírodní, u kterých se ceny mění v závislosti na tom, zda se jedná o kamenivo těžené či drcené. Další významnou roli hraje lokalita a frakce. Z výše uvedených dat vyplývá, že nejdražší je kamenivo drcené o frakci 4/8 mm s průměrnou cenou 422,5 Kč/t. Drcená frakce 8/16 mm je cenově skoro srovnatelná s těžnými kamenivy, kde průměrná cena u obou frakcí činí 333 Kč/t. Průměrné ceny recyklátů a přírodních kameniv jsou graficky znázorněny v grafu č. 2.



Graf č. 2: Porovnání průměrných cen recyklátů a přírodních kameniv

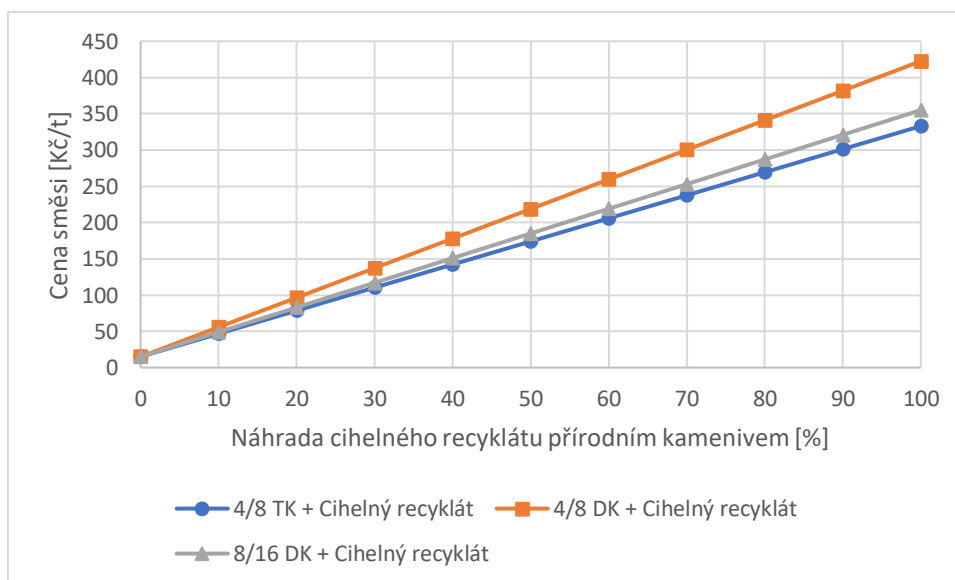
Pokud se podíváme na beton z hlediska objemových zastoupení jednotlivých složek, zaujímá kamenivo 75 až 80 % celkového objemu. [34] Je proto patrné, že pokud nahradíme hrubé kamenivo recyklátem, pozitivně se to promítne na ceně za 1 m³ betonu.

V grafech č. 3 a 4 byly přírodní kameniva po 10 % hmotnosti nahrazována cihelným a betonovým recyklátem. Přírodní kamenivo 8/16 TK je z grafu záměrně vyřazeno kvůli shodné průměrné ceně s 4/8 TK.



Graf č. 3: Cenový dopad na procentuální náhradu přírodních kameniv cihelným recyklátem

Z grafu č. 4 vyplývá, že pokud nahradíme 50 % přírodního kameniva 4/8 TK a 8/16 TK betonovým recyklátem, sníží se náklady na tunu směsi na přibližně 250 Kč. Cenový rozdíl na tunu je přibližně 25 %. Při stejném procentuálním nahrazení kameniva 4/8 DK se náklady sníží na přibližně 300 Kč/t, což je rozdíl přibližně 29 %. Pro kamenivo 8/16 DK se při 50 % náhradě sníží náklady na přibližně 260 Kč/t. Snížení nákladů činí přibližně 26,5 %.



Graf č. 4: Cenový dopad na procentuální náhradu přírodních kameniv cihelným recyklátem

Díky velmi nízké ceně cihelného recyklátu lze oproti betonovému recyklátu snížit náklady výrazněji. Pro porovnání uvažujme opět 50% náhradu přírodního kameniva. Výsledné ceny takto nahrazených kameniv se ve všech případech sníží přibližně o 48 %.

9. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se věnovala problematice trvanlivosti betonů s recyklovaným kamenivem. Cílem této práce bylo vymezit požadavky na recyklované kamenivo společně s jeho dopady na vlastnosti čerstvých a zatvrdlých betonů. V experimentální části pak navrhnout složení betonu třídy C 20/25 a C 30/37 s náhradou přírodního hrubého kameniva cihelným a betonovým recyklátem.

Základem pro získání kvalitního recyklovaného kameniva je třídění stavebně demoličního odpadu v místě vzniku. Zde se řadí zejména oddělení kontaminovaných materiálů a cizorodých částic od stavební sutě. Suť je dále třeba roztrždit na základní druhy, která bude následně zpracována v recyklačních linkách.

Při využití recyklovaného kameniva jako plniva do betonu je třeba uvažovat s rozdílnými vlastnostmi oproti přírodnímu kamenivu. Na základě zjištěných poznatků lze konstatovat, že recyklované kamenivo vykazuje přibližně o 15 % nižší objemovou hmotnost, což se projeví na objemové hmotnosti betonu. Mezi další nedostatky patří vyšší nasákavost, která se pohybuje okolo 4-9 % a také potencionální výskyt znečišťujících látek jako je např. sádrovec, chloridy nebo oxid hořečnatý.

Požadavky na recyklované kamenivo se napříč členskými státy EU různí. Obecně lze však konstatovat, že tyto státy dělí recyklované kamenivo do skupin dle jeho vlastností. Z hlediska složení se jeví jako nejvhodnější volit betonový recyklát s minimálním 90% obsahem betonové složky. Minimální objemová hmotnost recyklátů se pohybuje v rozmezí 1700 až 2200 kg/m³ s ohledem na typ kameniva. Maximální nasákavost se v členských státech EU liší. Například pro Nizozemsko tato hodnota není stanovena, zatímco Portugalsko tuto hodnotu pro všechny typy recyklovaných kameniv požaduje ≤ 7 %. V České republice stanovuje norma ČSN EN 206+A1 maximální náhradu hrubého kameniva dle stupně vlivu prostředí a typu kameniva. Typ A lze využít v expozičních třídách X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XA1 a XD1, zatímco Typ B pouze pro třídy X0, XC1 a XC2.

Negativní dopady má recyklované kamenivo také na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Pro betony s náhradou přírodního kameniva betonovým recyklátem je třeba počítat se zhoršením konzistence, která je závislá především na dávce drobné a jemné frakce a může zvýšit množství záměsové vody až o 15 %. Oproti betonům s přírodním kamenivem klesá pevnost v tlaku o 4-20 %. Vývoje pevnosti v tlaku jsou také zpomaleny, největší nárůst pevností lze pozorovat v prvních 100 dnech. Snižuje se také modul pružnosti o 10-30 %, zvyšuje se součinitel dotvarování až o 50 %. Zvyšuje se také nasákavost betonu o 20-100 %

a o 20-40 % se zvýší smrštění betonu. Zahraniční však studie prokázaly, že do 30% náhrady jemných podílu kameniva betonovým recyklátem nedochází k výraznému ovlivnění mechanických vlastností betonu. Maximální náhrada přírodního hrubého kameniva betonovým recyklátem se pro konstrukční betony jeví 50 %. Betony s recyklovaným betonovým kamenivem je možné použít pro konstrukce v interiéru nebo do základových konstrukcí.

Cihlobetony se nejčastěji používají pro lehčené, výplňové, nenosné části konstrukcí, ať se jedná o stěny nebo stropy. Z důvodu vysoké nasákavosti cihelného recyklátu je vhodné kamenivo předem namáčet nebo upravit množství záměsové vody. Konzistenci cihlobetonu negativně ovlivňuje dávka frakce 4/8 mm. Frakci 0/4 mm je vhodné nahradit z 50 až 65 % přírodním kamenivem. Jako optimální podíl cihelného recyklátu frakce 4/8 se jeví 50 % a zbytek této frakce doplnit přírodním kamenivem. Takto vyrobené cihlobetony dosahují průměrné pevnosti v tlaku 13 až 17 MPa. Pevnost v tahu je jako u tradičních betonů přibližně 1/10 pevnosti v tlaku. Pro dosažení objemové hmotnosti nad 2000 kg/m^3 je třeba nahradit frakci 8/16 přírodním kamenivem. Modul pružnosti klesá oproti tradičnímu betonu o 30-50 %, smrštění betonu je větší o 10-20 %. Pro mrazuvzdornost cihlobetonu na 150 zmrazovacích cyklů je potřeba frakci 0/4 mm zcela nahradit přírodním kamenivem.

Experimentální část této práce se zabývala návrhem betonových směsí s náhradou hrubého přírodního kameniva cihelným a betonovým recyklátem. Byly navrženy čtyři receptury pro cihlobeton C 20/25 a C 30/37 a obdobně pro beton s betonovým recyklátem C20/25 a C 30/37. Pro návrh cihlobetonů byl použit cement CEM I 42,5 R Mokrý, cihelný recyklát frakce 0/8 a 8/16 mm, jako příměs byl použit elektrárenský popílek Opatovice a superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátů Mapei Dynamom SX14. Tato přísada byla použita také pro beton s betonovým recyklátem spolu s cementem CEM I 42,5 R Mokrý. Pro frakci 0/4 mm použit písek Žabčice a frakce 4/8 a 8/16 mm betonový recyklát.

Dále byl posouzen ekonomický dopad recyklovaného kameniva na 1 m^3 betonu. Byly zjištěny ceny cihelných a betonových recyklátů v okolí Brna a ceny přírodních kameniv v ČR. Výsledky ukázaly, že při náhradě přírodního hrubého kameniva betonovým recyklátem v poměru 50 % lze na tuně kameniva snížit náklady přibližně o 25 až 29 %. V případě stejné náhrady cihelným recyklátem je rozdíl markantnější a dosahuje téměř 50 %.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] 541/2020 Sb. Zákon o odpadech. *Zákony pro lidi - Sbírka zákonů ČR v aktuálním konsolidovaném znění* [online]. Copyright © AION CS, s.r.o. 2010 [cit. 22.05.2021].

Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541?text=odpad>

[2] *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Copyright © [cit. 19.04.2021].

Dostupné z:

[https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodika_stavebni_odpady/\\$FILE/OODP-metodicky_navod_SDO-20180904.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodika_stavebni_odpady/$FILE/OODP-metodicky_navod_SDO-20180904.pdf)

[3] ŠKOPÁN, M. Analýza stavu recyklace stavebních a demoličních odpadů a strategie dalšího rozvoje. *RECYCLING 2006* [online]. 2006 [cit. 19.02.2021], s. 88–95.

Dostupné z: http://arism.cz/dok/Sbornik_2006.pdf

[4] JUNGA, Petr, Tomáš VÍTEŽ a Petr TRÁVNÍČEK. *Technika pro zpracování odpadů*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-209-0.

[5] Celková produkce odpadů – ISSaR. *ISSaR – Informační systém statistiky a reportingu* [online]. Copyright © 2021 CENIA, česká informační agentura životního prostředí [cit. 18.02.2021]. Dostupné z:

<https://issar.cenia.cz/cr/odpady-a-materialove-toky/celkova-produkce-odpadu/>

[6] 8/2021 Sb. Katalog odpadů. *Zákony pro lidi - Sbírka zákonů ČR v aktuálním konsolidovaném znění* [online]. Copyright © AION CS, s.r.o. 2010 [cit. 11.04.2021].

Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-8?text=katalog+odpad%C5%AF>

[7] Produkce, využití a odstranění odpadů, 2018. Český statistický úřad.

<https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2018> (zprístupněno May 22 2021).

[8] FOŘTOVÁ, K., OTÝS, J., PAVLŮ, T. Možnosti využití recyklovaných materiálů z demolic a budov. *RECYCLING 2018* [online]. 2018 [cit. 14.03.2021], s. 33–40.

Dostupné z: http://www.arism.cz/dok/Sbornik_RECYCLING_2018.pdf

[9] KOHOUTKOVÁ, A.; PROCHÁZKA, J. Recyklace betonu. Katedra betonových konstrukcí a mostů.

http://people.fsv.cvut.cz/www/prochja2/YTBK/Prednaska_10_2015.pdf (accessed May 22, 2021).

[10] Nakládání se stavebními a demoličními odpady – Recykláty | INISOFT s.r.o.. *INISOFT.CZ (SEPNO, OLPNO, ROČNÍ HLÁŠENÍ O ODPADECH, PORADENSTVÍ, ŠKOLENÍ, ISPOP)* | INISOFT s.r.o. [online]. Dostupné z:

<https://www.inisoft.cz/poradenstvi-a-skoleni/odborne-clanky/zpravodaj/nakladani-se-stavebnimi-a-demolicnimi-odpady-recyklaty>

[11] NOVÁKOVÁ, I.; MIKULICA, K. Faktory ovlivňující kvalitu recyklovaného betonového kameniva, 2018. TZB-info. <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18061-factory-ovlivnujici-kvalitu-recyklovaneho-betonoveho-kameniva> (accessed May 20, 21).

[12] MLČOCHOVÁ, V. Nové poznatky v oblasti recyklovaných betonů. *RECYCLING 2006* [online]. 2006 [[cit. 12.02.2021], s. 60–66. Dostupné z: http://arism.cz/dok/Sbornik_2006.pdf

[13] *Svaz průmyslu a dopravy České Republiky* [online]. Copyright © [cit. 22.05.2021]. Dostupné z: https://www.spcr.cz/images/EU/Doporučení_obežné_hospodárství.pdf

[14] SVOBODA, K. Technologie recyklace stavebních a demoličních odpadů. *Odpadové fórum 2005*, 5, 13–16. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/5-2005-pdf.pdf>

[15] *Softwarové nástroje TST FAST VUT v Brně* [online]. Copyright © [cit. 22.05.2021]. Dostupné z: http://tstsw.cz/stavebni_stroj/predmet-bw03/prednaska-11

[16] ŠŤASTNÍK, S. *Těžba, lomárství a úpravnictví - Modul M2*; VUT FAST: Brno, 2005.

[17] ARSM. *ARSM* [online]. Copyright ©2002 [cit. 27.01.2021]. Dostupné z: <http://www.arism.cz/recyklaty.php>

[18] Analýza problematiky výroby betonu s recyklovaným kamenivem

[19] ČSN EN 206+A1 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

[20] PAVLŮ, T. Zkoušení a vlastnosti recyklovaného kameniva pro použití do betonu. *TZB-info* [online]. [[cit. 12.02.2021]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10265-zkouseni-a-vlastnosti-recyklovaneho-kameniva-pro-pouziti-do-betonu>

[21] COLLEPARDI, Mario a Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, s. 323-330. ISBN 978-80-87093-75-7.

[22] PERTOLD, Z., ŠACHLOVÁ, Š., ŠŤASTNÁ, A., et al. Alkalicko-křemičitá reakce v České republice a možnosti její eliminace. *BETON TKS* [online]. 2014 [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: https://www.betontks.cz/sites/default/files/2014-2-34_0.pdf

[23] ČSN EN 12 620 – Kamenivo do betonu

[24] VÝBORNÝ, J., VODIČKA, J., HANZLOVÁ, H. Využití cihelného recyklátu k výrobě vláknobetonu. *Workshop 2005 – VZ „Udržitelná výstavba“* [online]. 2005 [[cit. 13.02.2021]. Dostupné z: http://www.udrzitelnavystavba.cz/workshop2005/06-Vyborny_Vodicka_Hanzlova.pdf

[25] STEHLÍK, D.; HÝZL, P.; VARAUS, M.; MONDSCHHEIN, P. *Užití recyklovaných stavebně demoličních materiálů do pozemních komunikací*; Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací: Veveří 331/95, 602 00 Brno, 2011. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_210.pdf

[26] ČERMÁK, J., POLÁK, F., FIALA, J. Porovnání užitných vlastností betonu při použití různých typů recyklovaného kameniva. *RECYCLING 2020* [online]. 2020 [cit. 18.05.2021], s. 4–8. Dostupné z: http://www.arasm.cz/dok/RECYCLING_2020_Sbornik.pdf

[27] Novotný, B. Hodnocení kvality a možnosti využití stavebních recyklátů. Teze Habilitační práce, Vysoké učení technické v Brně, 2001. ISBN 80-214-1137-6.

Dostupné z: https://www.vutbr.cz/vutium/spisy?action=ukazka&id=762&publikace_id=118

[28] PAVLŮ, T., ŠEFFLOVÁ, M. Trvanlivost betonu s recyklovaným kamenivem. *RECYCLING 2016* [online]. 2016 [cit. 16.03.2021], s. 60–65. Dostupné z: http://www.arasm.cz/dok/Sbornik_RECYCLING_2016.pdf

[29] STIBŮREK, M. Možnosti využití stavebních odpadů. *BETON TKS*, 2008, vol. 2, s. 45–47. Dostupné z: <https://www.betontks.cz/sites/default/files/2008-2-45.pdf>

[30] PAVLŮ, T., ŠEFFLOVÁ, M., OTÝS, J. Porovnání enviromentálních dopadů betonů z přírodního a recyklovaného kameniva. *RECYCLING 2016* [online]. 2016 [cit. 10.02.2021], s. 97–104. Dostupné z: http://www.arasm.cz/dok/Sbornik_RECYCLING_2016.pdf

[31] Cirkulární ekonomika – Institut cirkulární ekonomiky. *Institut cirkulární ekonomiky – We close the loop* [online]. Dostupné z: <https://incien.org/cirkularni-ekonomika/>

[32] SVOBODA, K. Technologie recyklace stavebních a demoličních odpadů. *Odpadové fórum* **2005**, 5, 13–16. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/5-2005-pdf.pdf>

[33] SVOBODA, K. Možnosti využití SDO. *Odpadové fórum* **2005**, 5, 16–18. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/5-2005-pdf.pdf>

[34] HELA, R. *Technologie betonu I*. Brno, 2005.

[35] EVANGELISTA, L.; de BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, 2007. Sciencedirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946507000030> (accessed May 27, 2021).

[36] HARISH, B.; VENKATA RAMANA, N.; GNANESWAR, K. Experimental and analytical studies on recycled coarse aggregate concrete, 2020. Sciencedirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320359034> (accessed May 27, 2021).

[37] Recyklované kamenivo - BETON SERVER - BETON, VŠE Z BETONU A VŠE PRO BETON V ČR. *BetonServer - BETON SERVER - BETON, VŠE Z BETONU A VŠE PRO BETON V ČR* [online]. Copyright © 2018 betonsserver.cz, Všechna práva vyhrazena [cit. 26.05.2021]. Dostupné z: <https://www.betonsserver.cz/kamenivo/recyklovane-kamenivo>

[38] Štěrk, kamenivo, písek | HeidelbergCement Česká republika. [online]. Copyright © 2021 [cit. 26.05.2021] Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/kamenivo>

[39] České štěrkopísky spol. s r.o. . *České štěrkopísky spol. s r.o.* [online]. Copyright © 2021 [cit. 26.05.2021]. Dostupné z: <http://www.ceske-sterkopisky.cz/cenikStraskov.aspx>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1: Schéma recyklace sestupného typu	21
Obrázek č. 2: Schéma recyklace vzestupného typu	22
Obrázek č. 3: Cirkulární a lineární ekonomika.....	22
Obrázek č. 4: Příklad schématu dvoustupňové stacionární recyklační linky	24
Obrázek č. 5: Příklad schématu mobilní recyklační linky	25
Obrázek č. 6: Princip čelistového drtiče: A – dvojvzpěrný, B – jednovzpěrný.....	27
Obrázek č. 7: Kladivový drtič	28
Obrázek č. 8: Odrazový drtič.....	28
Obrázek č. 9: Kuželový drtič ostroúhlý a tupoúhlý []	29
Obrázek č. 10: Závislost nasákavosti na měrné hmotnosti recyklovaného kameniva	38
Obrázek č. 11: Vývoj pevností v tlaku betonu s přírodním a recyklovaným kamenivem ..	42

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1: Rozdělení SDO dle vyhlášky č. 8/2021 Sb.	15
Tabulka č. 2: Produkce vybraných skupin SDO v letech 2014-2018	17
Tabulka č. 3: Rizika recyklace a možné způsoby využití recyklovaných surovin z SDO...20	
Tabulka č. 4: Složení recyklovaného kameniva dle DIN 4226-100: 2002, DIN 4226-101:2017.....	31
Tabulka č. 5: Požadavky na recyklované kamenivo dle DIN 4226-100: 2002	31
Tabulka č. 6: Požadavky na recyklované kamenivo dle PVT 406	32
Tabulka č. 7: Požadavky na vlastnosti recyklovaného kameniva dle SB250 a BNB B15-001B	33
Tabulka č. 8: Požadavky na recyklované kamenivo.....	33
Tabulka č. 9: Rozdělení recyklovaného kameniva	34
Tabulka č. 10: Složení recyklovaného kameniva dle LNEC E 471	34
Tabulka č. 11: Vlastnosti recyklovaného kameniva dle LNEC E 471	34
Tabulka č. 12: Použití recyklovaného kameniva do betonových konstrukcí	35
Tabulka č. 13: Maximální náhrada hrubého kameniva dle ČSN EN 206+A1	35
Tabulka č. 14: Doporučené vlastnosti hrubého recyklovaného kameniva	36
Tabulka č. 15: Porovnání objemových hmotností recyklovaného a přírodního kameniva ..37	
Tabulka č. 16: Doporučení na recyklované kamenivo z hlediska vlastností (RILEM)	39
Tabulka č. 17: Doporučené použití recyklovaného kameniva v závislosti na charakt. pevnosti	39
Tabulka č. 18: Návrh složení cihlobetonu C 20/25	45
Tabulka č. 19: Návrh složení cihlobetonu C 30/37	45
Tabulka č. 20: Návrh složení betonu s betonovým recyklátem C 20/25	46
Tabulka č. 21: Návrh složení betonu s betonovým recyklátem C30/37	46
Tabulka č. 22: Ceny betonového recyklátu v okolí Brna.....	47
Tabulka č. 23: Ceny cihelného recyklátu v okolí Brna.....	47
Tabulka č. 24: Ceny těžného a drceného kameniva v ČR.....	47

SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1: Celková produkce odpadů v roce 2019 (CENIA)	12
Graf č. 2: Porovnání průměrných cen recyklátů a přírodních kameniv	48
Graf č. 3: Cenový dopad na procentuální náhradu přírodních kameniv cihelným recyklátem	49
Graf č. 4: Cenový dopad na procentuální náhradu přírodních kameniv cihelným recyklátem	49