



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

**MOŽNOSTI VYUŽITÍ RECYKLOVANÉHO
KAMENIVA PRO VÝROBU KONSTRUKČNÍCH
BETONŮ**

POSSIBILITIES OF USING RECYCLED AGGREGATES FOR THE PRODUCTION OF
STRUCTURAL CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ludmila Hrachovcová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Studentka: **Ludmila Hrachovcová**

Vedoucí práce: **Ing. Adam Hubáček, Ph.D.**

Akademický rok: 2022/23

Studijní program: B3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: Stavebně materiálové inženýrství

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Možnosti využití recyklovaného kameniva pro výrobu konstrukčních betonů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Základní body bakalářské práce budou následující:

- Popis a shrnutí dosavadních znalostí o recyklovaném kamenivu, zejména o cihelném a betonovém recyklátu,
- popis a shrnutí parametrů a vlastností těchto druhů recyklátů,
- možnosti využití těchto druhů recyklovaných kameniv v betonech, zejména s ohledem na parametry čerstvého a ztvrdlého betonu,
- Sestavení metodiky pro návrh a testování betonů, s úplnou náhradou hrubého kameniva recyklovaným kamenivem (betonovým a cihelným).

Část bakalářské práce bude zaměřena také na praktické aplikace týkající se návrhu a studiu vlastností betonů s využitím recyklovaného kameniva. Bude sledován vliv těchto recyklátů na parametry betonu jako jsou zpracovatelnost čerstvého betonu, obsah objemová hmotnost, pevnost betonu v tlaku, nasákavost a případně trvanlivost. Na základě dosažených výsledků zkoušek budou navrženy finální receptury betonů s využitím recyklovaných kameniv pro jejich výrobu.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

V současné době stále neexistuje žádné širší využití recyklovaného kameniva pro výrobu betonů určených pro konstrukce. Stejně tak není stále k dispozici žádná požadavková norma, která by se zabývala potřebnými parametry recyklovaného kameniva pro výrobu betonu. Hlavním nosným tématem bakalářské práce bude studium a definování parametrů kameniva z betonových a cihelných recyklátů pro jejich využití v betonech a následně ověření těchto požadavků na vybraných navržených recepturách betonů. Cílem práce je posouzení parametrů recyklovaných kameniv a možnosti jejich využití v betonech jako úplné náhrady hrubého kameniva betonovým nebo cihelným recyklátem. Předpokládaný rozsah bakalářské práce cca 40-50 stran.

Seznam doporučené literatury a podklady:

- Časopis Beton TKS
- České a zahraniční normy zabývající zkoušením vlastností přírodního kameniva a recyklovaného kameniva
- ČSN EN 206+A2 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- ČSN P 73 2404 - Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace
- Sborníky z českých a mezinárodních konferencí
- Internetové zdroje, např. databáze SCOPUS

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 21. 11. 2022

L. S.

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
vedoucí ústavu

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá studií recyklovaného kameniva a betonů z něj vyrobených. V současné době je kladen čím dál vyšší důraz na recyklaci odpadu a obzvláště stavebně demoličního odpadu. Proto se hledají možnosti, jak využít recyklované kamenivo v betonových kompozitech i přes nestejnorodé parametry betonových a cihelných recyklátů. Práce shrnuje dosavadní poznatky o recyklovaných kamenivech, zejména pak o cihelném a betonovém recyklátu, o jejich parametrech a možnostech využití. Dále se práce zabývá betony z cihelného a betonového recyklátu, jejich parametry a chování a následnému využití v praxi.

KLÍČOVÁ SLOVA

Recyklované kamenivo, betonový recyklát, cihelný recyklát, beton z recyklovaného kameniva, stavebně demoliční odpad, trvanlivost, nasákavost, mrazuvzdornost, čerstvý beton, ztvrdlý beton.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the study of recycled aggregates and concretes made from them. Nowadays, more and more emphasis is being placed on recycling waste and especially construction and demolition waste. Therefore, we are looking for ways to use recycled aggregates in concrete composites despite heterogeneous parameters of concrete and brick recyclates. The paper summarizes the existing knowledge about recycled aggregates, especially about brick and concrete recyclates, their parameters and possibilities of their use. Furthermore, the thesis deals with brick and concrete recycle concretes, their parameters and behaviour and their subsequent use in practice.

KEYWORDS

Recycled aggregate, recycled concrete aggregate, recycled brick, recycled concrete, construction and demolition waste, durability, absorption, frost resistance fresh concrete, hardened concrete.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRACHOVCOVÁ, Ludmila. *Možnosti využití recyklovaného kameniva pro výrobu konstrukčních betonů*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Možnosti využití recyklovaného kameniva pro výrobu konstrukčních betonů* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2023

Ludmila Hrachovcová
autor

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Adamu Hubáčkovi, Ph.D. za pomoc, poskytnutí cenných rad a připomínek při psaní této práce. Poděkování také patří pracovníkům ústavu THD, za jejich ochotu a pomoc při zpracování experimentální část práce.

Obsah

1. Cíl práce	11
2. Úvod	12
3. Teoretická část.....	13
3.1. Stavební a demoliční odpad.....	13
3.1.1. Církulární ekonomika	13
3.1.2. Recyklace SDO.....	14
3.2. Recyklované kamenivo.....	15
3.2.1 Požadavky na recyklované kamenivo.....	15
3.2.2. Sledované vlastnosti recyklovaného kameniva	17
3.2.3. Parametry recyklovaného kameniva.....	18
3.2.4. Zkoušky recyklovaného kameniva	21
3.3. Druhy recyklovaného kameniva	27
3.3.1. Betonový recyklát.....	27
3.3.1.1. Vlastnosti betonového recyklátu	28
3.3.1.2. Využití betonového recyklátu.....	28
3.3.2. Cihelný recyklát.....	29
3.3.2.1. Vlastnosti cihelného recyklátu.....	30
3.3.2.2. Využití cihelného recyklátu.....	30
3.4. Beton z recyklovaného kameniva.....	30
3.4.1. Beton z betonového recyklátu	30
3.4.2 Beton z cihelného recyklátu – cihlobeton.....	31
3.5. Použití recyklovaného kameniva v praxi.....	32
3.5.1. Beton s recyklovaným kamenivem.....	33
3.5.2. Betonové prefabrikáty s recyklovaným kamenivem	33
4. Experimentální část	35
4.1. Cíl experimentální části	35

4.2. Metodika zkoušení recyklovaného kameniva a betonového kompozitu z nich vyrobeného	35
4.2.1 Použité zkušební metody	37
4.2.1.1. Zkoušky na čerstvém betonu	37
4.2.1.2. Zkoušky na ztvrdlém betonu	38
4.3. Etapa 1	40
4.4. Etapa 2	42
4.4.1. Vstupní suroviny.....	43
4.5. Etapa 3	47
5. Závěr.....	55
6. Seznam použitých zdrojů	57
7. Seznam obrázků	62
8. Seznam tabulek	62
9. Seznam grafů.....	63
10. Seznam zkratk	63

1. Cíl práce

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou využití recyklovaného kameniva v betonových kompozitech. Cílem bylo shrnout veškeré dosavadní poznatky o recyklovaných kamenivech a definovat vlastnosti a parametry recyklovaného cihelného a betonového kameniva. Práce zároveň popsala geometrické, fyzikálně-mechanické a chemické zkoušky, které se na recyklovaných kamenivech mohou provádět. Následně zde byly shrnuty vlastnosti, parametry a požadavky na betony z cihelného a betonového recyklátu a možnosti jejich využití. V rámci práce byly sledovány vlivy cihelných a betonových recyklátů na vlastnosti čerstvých a ztvrdlých betonů. Na základě těchto poznatků a zjištění z teoretické části byla stanovena metodika zkoušení recyklovaného kameniva a betonů vyrobených z nich a následně byly navrženy receptury betonů z různým podílem obsahu recyklovaného a přírodního kameniva.

2. Úvod

V posledních letech se, nejen ve stavebnictví, objevil trend cirkulárního neboli oběhového hospodářství. Je zejména kladen důraz na znovu využitelné zdroje a na snížení množství vyprodukovaného odpadu. Tento trend spolu s hrozbou v podobě nedostatku zásob přírodního kameniva v ČR vede ke snahám využít stavebně demoliční odpad jako náhradu přírodního kameniva v betonových kompozitech.

Stavebně demoliční odpad (dále SDO) má u nás již dlouholeté využití. Problémem, avšak je jeho kvalita a vhodná úprava zpracování. Výrobci recyklovaného kameniva na našem území sice disponují dostatečnou technologií pro recyklaci SDO, aby byla kvalita výsledného recyklátu homogenní a jeho kvalita se dala předem zaručit (podle požadavků ČEN EN 206+A2, ČSN EN 73 2404, ČSN EN 12620+A1:2008 a ČSN EN 13242+A1), ale tyto parametry nejsou ve většině případech dodržovány [9].

Další dlouhodobý problém je, že v Česku se od roku 1991 neotevívají žádná nová ložiska nerostných surovin a ty, která již existují, se kvůli několikaleté proceduře řízení o povolení těžby, rozšiřují jen velice těžko. A přestože se k dalším rozšíření a pokračování přistupuje s dostatečnou časovou rezervou, tak tento proces může trvat v některých případech 8 až 12 let a to znamená, že některá podstatná ložiska kameniva se mohou uvést do provozu nejdříve v letech 2030 až 2040 [6].

Proto je obor stavebnictví nucen řešit otázku náhrady některých primárních surovin druhotnými surovinami. V posledních letech se pak zejména zaobírá využitím recyklovaného kameniva v betonových kompozitech. Snaha je zcela nahradit přírodní kamenivo kamenivem recyklovaným za současného zachování požadovaných vlastností čerstvého a ztvrdlého betonu. Studie ukázaly, že pokud by se nám na území ČR povedlo nahradit 10 % roční produkce betonu z přírodního kameniva betonem vyrobeným ze 100 % recyklovaného kameniva, tak snížíme spotřebu přírodního kameniva o 1,6 milionu tun ročně. Naopak stejné množství stavebního odpadu by se nám povedlo zužítkovat [11].

Momentálně má využití recyklovaného kameniva také velkou perspektivu ve výrobě prefabrikovaných výrobků jako jsou betonové bloky, protihlukové stěny, opěrné stěny, dekorativní prvky a jiné [11].

3. Teoretická část

3.1. Stavební a demoliční odpad

Stavebně demoliční odpad je odpad vzniklý při stavbě, rekonstrukci a demolici stavebních objektů. Tyto odpady tvoří až 59 % z celkového množství produkováných odpadů. Velké množství SDO je tvořeno zejména přírodní výkopovou horninou a kamenivem horší kvality, které je následně využíváno na zásypy. Zbylá část je zejména tvořena inertními minerálními odpady jako jsou betonové, cihelné a keramické odpady, směsné odpady a odpady asfaltové [1] [5] [12].

Při recyklaci odstraněných stavebních prvků máme dvě možnosti. Můžeme stavební prvky buď opětovně použít, pokud si po recyklaci zachovají své původní parametry a stále zůstávají výrobkem, na které se vztahuje výrobová norma. Nebo s nimi můžeme nakládat jako s SDO a ten buď dále recyklovat anebo uložit na skládku odpadů. Ovšem je snaha o co nejvyšší procento recyklace s minimálním množstvím SDO, které jsme nuceni skládkovat [2].

3.1.1. Cirkulární ekonomika

Cirkulární ekonomika neboli oběhové hospodářství (viz. Obrázek 1), má za cíl udržet hodnotu materiálu, zdroje či výrobku v ekonomickém cyklu co nejdéle a zároveň na co nejvyšší možné úrovni a případně jej na konci jeho životnosti vrátit do výrobního cyklu tak, abychom minimalizovali vznik odpadu a jeho vliv na životní prostředí. Jde především o systémový posun, který nejen poskytuje enviromentální a společenské výhody, buduje obchodní a ekonomické příležitosti a dlouhodobou odolnost, ale také snižuje negativní dopady lineární ekonomiky [5].



Obrázek 1: Schéma oběhového hospodářství [63]

V rámci stavebnictví a výroby stavebních materiálů z druhotných surovin hraje oběhové hospodářství významnou roli. Stavební suroviny jsou na území ČR těženy v největším objemu (64 milionů tun v roce 2019) a jelikož se neotevírají žádná nová ložiska nerostných surovin, hrozí, že výhledově bude nedostatek komodit jako je stavební kámen a šterkopísek. Proto je potřeba nahlížet na budovy jako na banky druhotných materiálů, které jsme schopni v budoucnu použít jako náhradu některých primárních surovin. Tuto skutečnost ale musíme podpořit selektivní demolicí stávajících objektů, aby nedocházelo k znehodnocení recyklátů. Dlouhodobým problémem v ČR je totiž vracet recyklované materiály zpět v takové kvalitě, aby bylo možné je opětovně využít ve stavebních konstrukcích. Momentálně totiž většina recyklovaného SDO končí jako zásypový materiál [5].

3.1.2. Recyklace SDO

Při zpracování SDO jsou původci odpadu povinni dodržet postup v souladu se zákonem č. 541/2020 Sb., o odpadech, odpad vznikající při stavebních a demoličních činnostech, tak, aby byla zajištěna nejvyšší možná míra jejich opětovného použití a recyklace. To znamená, že stavba musí být odstraňována postupně a zejména tak, aby byly od sebe odděleny materiály vhodné k recyklaci stavební suti a materiály, které by tuto recyklaci mohly komplikovat (např. kovové a dřevěné konstrukce, plastové prvky, izolační materiály, rozvody médií a vzduchotechnická zařízení) [3].

Odpady nevhodné pro použití k jejich původnímu účelu (cihly, železobetonové nosníky apod.) jsou dále zpracovány a upraveny v zařízeních k tomu určených. Mezi tyto zařízení se řadí drtiče, třídiče anebo celé recyklační linky [3].

Kvalitu materiálu získaného recyklací posuzujeme v souladu s požadavky harmonizovaných evropských norem pro primární materiály i pro recyklované materiály. Recyklované kamenivo se u nás posuzuje v souladu s normou ČSN EN 12620+A1:2008, kdy se na kameniva kladou stejné požadavky a provádí stejné zkoušky jako na kamenivu přírodním. Dále lze ještě použít normu ČSN EN 206+A2 a ČSN EN 73 2404, která popisuje požadavky na vlastnosti recyklovaného kameniva a zároveň i typy betonů při jejichž výrobě je možné recyklát použít [3] [4].

3.2. Recyklované kamenivo

Recyklované kamenivo je kamenivo vyrobené recyklací SDO. Můžeme jej rozdělit na 4 hlavní druhy podle typu převažujícího materiálu, a to na betonový, cihelný, asfaltový a směsný recyklát. Ve většině případech se vyrábí ve stejných frakcích jako kamenivo přírodní, pokud není požadováno jinak [12].

V porovnání s přírodním kamenivem má recyklát horší fyzikálně-mechanické vlastnosti než kamenivo přírodní. Zejména pak u vlastností jako je nasákavost, mrazuvzdornost, pevnost a objemová hmotnost [7].

Mezi další sledované vlastnosti recyklovaného kameniva patří granulometrie a zkoušky dalších geometrických, fyzikálně-mechanických a chemických parametrů, kdy zjišťujeme čáru zrnitosti, podíl jemných částic a modul jemnosti kameniva, tvarový index, odolnost proti otěru, obsah alkálií a celkové zastoupení různých stavebních materiálů v recyklátu [4].

3.2.1 Požadavky na recyklované kamenivo

Podle nařízení Evropského parlamentu a rady EU č. 305/2011, kterým se stanovují harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na trh, jsou momentálně legislativní požadavky na výrobce recyklovaného kameniva stejné jako požadavky na výrobce přírodního kameniva, které jsou pro oba druhy kameniva stanoveny normou ČSN EN 12620+A1:2008, kdy změna A1 specifikuje požadavky na recyklované kamenivo. Pokud ale kamenivo neodpovídá těmto požadavkům, tak pak není výrobkem odpovídajícím nařízení vlády, kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky (NV č. 163/2002 Sb.). Výrobce pak na trh uvádí výrobek, který nepodléhá technickým požadavkům a zároveň výrobek vstupuje

na trh bez povinného posouzení shody, takže i jeho výroba nepodléhá plnění technických požadavků na jeho výrobu. V dnešní době na území ČR existuje minimálně 62 firem vyrábějících recyklované kamenivo, kdy z toho pouze jediná firma nabízí recyklované kamenivo splňující požadavky podle ČSN EN 12620+A1:2008 a čtyři, které nabízí recyklované kamenivo splňující požadavky podle ČSN EN 13242+A1 [9].

Obecně požadavky na geometrické vlastnosti recyklovaného kameniva zůstávají stejné jako u kameniva přírodního. Proto i recyklované kamenivo se nejčastěji vyrábí ve frakcích 4/8, 8/22, 0/22, případně 0/4, 4/8, 4/16, 8/16, 0/8, 0/16, 0/32, 0/63, 32/63. Výhodou recyklovaného kameniva je skutečnost, že výslednou frakci můžeme libovolně měnit podle potřeb trhu či potřeb koncového zákazníka [9].

Pro výrobu betonových kompozitů z recyklovaného kameniva potřebujeme, aby byl recyklát v co nejvyšší kvalitě, které můžeme reálně dosáhnout. Obecně platí, že čím více různých druhů hmot se v recyklátu vyskytuje, tím je výsledných produkt méně kvalitní. Cílem je tedy dostat co nejčistší recyklát z jednoho druhu materiálu. Avšak ani s nejmodernějšími technologiemi nejsme schopni dosáhnout stoprocentní čistoty recyklátu, takže je povoleno, aby recyklát v omezeném množství obsahoval i ostatní materiály (sklo, kovy, dřevo, plast, papír apod.). Množství nežádoucích látek by ale nemělo u každé složky přesáhnout 1 % z hmotnosti recyklátu, v součtu pak 5 %. Čistotu kameniva nám určuje také norma ČSN EN 933-11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva, která kamenivo rozděluje do kategorií podle obsahu druhu recyklátu v recyklovaném kamenivu [4] [24].

Kromě požadavků na materiálovou čistotu recyklátu požadujeme i určitou chemickou čistotu. Tím je myšleno nejen znečištění recyklovaného kameniva při jeho zpracování, např. pohonnými hmotami a oleji z demoličních zařízení, ale také obsah chemických látek, které mohou nepříznivě ovlivňovat fyzikálně-mechanické parametry výsledného betonového kompozitu s obsahem recyklovaného kameniva [9].

Základní požadavky na vlastnosti a parametry kameniva, ať už přírodního nebo recyklovaného, stanovuje norma ČSN EN 12620+A1:2008. Aby kamenivo bylo vhodné použít pro výrobu betonu, musí alespoň některé tyto požadavky splňovat. Proto je kamenivo třeba pravidelně zkoušet tak, aby byla zaručena shoda s předpisy a tím zajištěna kontrola kvality. Recyklované kamenivo se zkouší ve stejném rozsahu, jako je tomu u kameniva přírodního. Některým vlastnostem je však nutné věnovat vyšší pozornost. V následující Tabulce 1 jsou shrnuty požadavky na vlastnosti recyklovaného kameniva a jejich minimální četnost [13].

Tabulka 1: Minimální četnost zkoušek pro vlastnosti kameniva příslušného zvláštním zdrojům (výběr pro recyklované kamenivo) podle normy ČSN EN 12620+A1:2008 [17]

Vlastnost		Článek	Poznámky/odkazy	Zkušební metoda	Minimální četnost zkoušek
2	Objemová stálost – smršťování při vysychání	5.7		ČSN EN 11367-4	Jednou za 5 let
3	Chloridy	6.2	Recyklované kamenivo	ČSN EN 1744-5	
4	Složky obsahující síru	6.3	Recyklované kamenivo	ČSN EN 1744-1 +A1	Dvakrát ročně
5	Organické složky	6.4.1			
	Obsah humusu			15.1 ČSN EN 1744-1 +A1	Jednou ročně
	Fulvo kyselina			15.2 ČSN EN 1744-1 +A1	Jednou ročně
	Srovnávací zkoušky pevnosti v průběhu tuhnutí			15.3 ČSN EN 1744-1 +A1	Jednou ročně
	Lehké organické znečišťující látky			14.2 ČSN EN 1744-1 +A1	Dvakrát ročně
8	Vliv na počáteční dobu tuhnutí cementu	6.4.1	Recyklované kamenivo	ČSN EN 1744-6	Dvakrát ročně
9	Složky hrubého recyklovaného kameniva	5.8	Hrubé recyklované kamenivo	ČSN EN 933-11	Jednou měsíčně
10	Objemová hmotnost zrn a nasákavost	5.5	Hrubé recyklované kamenivo	ČSN EN 1097-6	Jednou měsíčně
11	Vodou rozpustné sírany	6.3	Hrubé recyklované kamenivo	ČSN EN 1744-1 +A1	Jednou měsíčně
Poznámka: U recyklovaného kameniva může být jako zdroj výrobní skládka.					

3.2.2. Sledované vlastnosti recyklovaného kameniva

Zkoušky na vlastnosti recyklovaného kameniva můžeme rozdělit na tři základní skupiny, a to na zkoušky geometrických, fyzikálně-mechanických a chemických vlastností [4].

Geometrické vlastnosti u recyklovaných kameniv nejvíce ovlivňuje způsob drcení recyklátu. Drcení běžně probíhá ve dvou fázích. Při primárním drcení (většinou v čelistovém drtiči) je cílem dosáhnout co nejlepší distribuce velikosti zrn. Pomocí sekundárního drcení (na

kuželových nebo odrazových drtičích) jsme poté schopni docílit kulatějších a méně ostrých částic. Jednou z nejčastějších zkoušek geometrických vlastností je zkouška zrnitosti, kdy pomocí síťového rozboru zjišťujeme procentuální zastoupení jednotlivých frakcí ve vzorku kameniva a ze kterého následně stanovujeme křivku zrnitosti kameniva. Dále jsme ze zkoušky zrnitosti schopni stanovit i obsah jemných částic, který by neměl překročit hodnotu 15 %. Důležitou zkouškou geometrických vlastností je také tvarový index kameniva [9] [22].

Fyzikálně-mechanické vlastnosti zjišťujeme pomocí zkoušek objemové hmotnosti, nasákavosti zrn kameniva, mrazuvzdornosti (pouze při specifickém požadavku výrobce betonu na trvanlivost v prostředí XF), objemové stálosti (smršťování při vysychání) a pevnosti kameniva stlačením ve válci. Obecně platí, že recyklovaná kameniva mají vyšší hodnoty nasákavosti oproti kamenivu přírodnímu [9].

V recyklovaných kamenivech se nachází spousta kontaminačních látek, které negativně ovlivňují výsledné vlastnosti betonu z recyklovaného kameniva. Mezi tyto látky se řadí ve vodě rozpustné sírany, alkálie a reaktivní oxid křemičitý, chloridy, humusovité podíly a další látky organického původu. Ve vodě rozpustné sírany a sádra jsou potencionálně reaktivní a často jsou příčinou expanzivních reakcí, proto by obsah síranů v recyklovaných kamenivech neměl překročit 1 %. Stejný problém nastává i u recyklátů s obsahem alkálií a reaktivního oxidu křemičitého, kdy dochází k expanzivní alkalicko-křemičité reakci. Tento jev pozorujeme zejména u betonového recyklátu, kdy nejvíce alkálií může být obsaženo v cementové matici. Obsah chloridů v betonu přispívá k rychlejší degradaci betonu kvůli korozi oceli v betonu. Proto by obsah chloridů neměl překročit 1 % z hmotnosti cementu. Všechny tyto parametry se zkouší pomocí zkoušek chemických vlastností, mezi které se řadí zkouška alkalicko-křemičité reakce, zkouška obsahu chloridů, složek obsahujících síru, nebezpečných látek, stanovení potenciální přítomnosti humusu a vlivu vodou rozpustných látek na počátek tuhnutí a tvrdnutí cementu [9] [22].

3.2.3. Parametry recyklovaného kameniva

Parametry recyklovaného kameniva ovlivňuje hned několik faktorů – vlastnosti původního materiálu, způsob demolice, způsob drcení SDO a způsob skládkování recyklátu. V této kapitole jsou shrnuty obecné parametry recyklovaných kameniv z různých studií, výzkumů a závěrečných prací [4].

- Zrnitost kameniva

Zrnitost recyklovaného kameniva je podobná zrnitosti kameniva přírodního. Obecně ale platí, že v recyklovaném kamenivu najdeme vyšší obsah jemných částic než v kamenivu přírodním. V porovnání cihelného a betonového recyklátu se více jemných částic obvykle nachází v recyklátu cihelném a to zhruba 10-25 % z jeho celkového objemu. V betonovém recyklátu je podíl jemných částic v rozmezí 3-15 % z jeho celkového objemu. Obsah jemných částic je také ovlivněn způsobem drcení. Při srovnání recyklátů vyrobených na čelistových a odrazových drtičích, vycházejí hodnoty na odrazovém drtiči až o 2,4 % vyšší [42] [43].

- Objemová hmotnost

Objemové hmotnosti recyklovaného kameniva jsou obecně nižší než u kameniva přírodního, a to zhruba o 15-30 %. Objemová hmotnost betonového recyklátu se pohybuje v hodnotách od 2200 do 2400 kg/m³. U cihelného recyklátu jsou pak hodnoty objemových hmotností nižší než u recyklátu betonového a pohybují se od 1900 do 2100 kg/m³ [42] [43].

- Nasákavost

Recyklované kamenivo obecně vykazuje vyšší nasákavost než kamenivo přírodní. U betonového recyklátu nabývá nasákavost hodnot do 10 % a to zejména kvůli obsahu cementového tmelu, který je pórovitý a tím pádem i více nasákavý. U cihelného recyklátu je pak nasákavost ještě vyšší a může nabývat hodnot až do 15 %. Obecně platí, že čím vyšší podíl jemných částic v recyklátu, tím vyšší nasákavost [42] [43] [44] [45].

- Tvarový index

Tvarový index je u recyklovaného kameniva významně ovlivněn zejména způsobem drcení SDO. Při použití odrazových drtičů nabývá tvarový index hodnot do 15 % a nejčastěji se hodnoty pohybují kolem 10 %. U drtičů čelistových jsou pak hodnoty tvarového indexu vyšší a to kolem 20 % [42] [43].

- Stanovení odporu při stlačování

Tento parametr se primárně stanovuje pro pórovité lehké kamenivo, ale provádíme tuto zkoušku i na kamenivu recyklovaném, abychom zjistili jeho pevnost. Obecně je pevnost recyklovaného kameniva nižší než pevnost kameniva přírodního. Pokles pevnosti u kameniva recyklovaného se pohybuje od 15 % do 60 % procent zejména podle původu a druhu recyklovaného kameniva a hodnoty odporu při stlačování se pohybují mezi 28-40 N/mm² [43] [9].

- Sypná hmotnost a mezerovitost volně sypaného kameniva

Sypnou hmotnost stanovujeme pro volně sypané a setřesené kamenivo. Hodnoty sypné hmotnosti volně sypaného kameniva se u recyklovaného cihelného kameniva pohybují od 1,000 Mg/m³ do 1,200 Mg/m³. U recyklovaného betonového kameniva jsou hodnoty vyšší a to od 1,200 Mg/m³ do 1,500 Mg/m³. Sypná hmotnost kameniva setřeseného je pak cca o 15-20 % vyšší u obou recyklátů [42] [46].

Mezerovitost recyklovaného kameniva závisí zejména na podílu jemné frakce, která vyplňuje mezery. Obecně se ale mezerovitost recyklovaných kameniv pohybuje kolem 40 % ve volně sypaném stavu a 35 % ve stavu setřeseném [42].

- Odolnost proti zmrazování a rozmrazování

Odolnost mrazuvzdornosti stanovujeme pomocí indexu mrazuvzdornosti. Pro betonový recyklát může index mrazuvzdornosti nabývat hodnot od 8 % do 44 %. Průměrná hodnota pro betonový recyklát je pak 26 %. U cihelného recyklátu se spodní hranice pohybuje podobně jako u recyklátu betonového, ale horní hranice je nižší. Hodnoty indexu mrazuvzdornosti cihelného recyklátu jsou 5-25 % a průměr je kolem 12 % [9].

- Odolnost proti drcení – Los Angeles

Aby bylo recyklované kamenivo vhodné pro použití do betonu jako náhrada přírodního kameniva, musí recyklát vykazovat odolnost proti drcení menší nebo rovnou kategorii LA₅₀. Nižší odolnost proti drcení způsobuje vyšší obsah méně pevných kontaktních zón mezi cementovým tmelem a kamenivem (u betonového recyklátu) [47].

- Objemová stálost – odolnost proti smršťování

Hodnota smrštění u betonu s přírodním kamenivem se pohybuje okolo hodnoty 0,7 mm/m. Při použití recyklovaného kameniva se tato hodnota zvýší o 20-40 %. Obecně platí že s rostoucím obsahem recyklátu rostou i hodnoty smrštění [49] [42] [48].

- Chemické složení

Mezní hodnoty pro obsah znečišťujících látek jsou popsány v normě ČSN EN 1744-1+A1. Obecně nejde určit obsah chemicky znečišťujících látek v betonu, jelikož u každého recyklátu jsou tyto hodnoty jiné. Procento obsahu znečišťujících látek stanovují vlastnosti původního materiálu, stádium jeho degradace a způsob skládkování. Mezi zkoušky chemického

složení se řadí zkoušky alkalicko-křemičité reakce, zkoušky obsahu chloridů, složek obsahujících síru, nebezpečných látek, stanovení potenciální přítomnosti humusu a vlivu vodou rozpustných látek na počátek tuhnutí a tvrdnutí cementu. U recyklátů sledujeme zejména obsah síranů (sádrovec z omítkových malt), který by neměl překročit 1 %, a obsah chloridů, který by také neměl překročit 1 %. U betonového recyklátu pak je kladen vyšší důraz na přítomnost alkálií v cementovém tmelu, které jsou pro výrobu betonu nežádoucí [47] [43].

- Odolnost proti otěru – micro-Deval

Abychom kamenivo mohli prohlásit za odolné proti otěru, musí vyhazovat hodnoty menší nebo rovny kategorii součinitele micro-Deval M_{DE35} [17].

3.2.4. Zkoušky recyklovaného kameniva

1) Stanovení zrnitosti kameniva

Stanovení zrnitosti kameniva neboli síťový rozbor, se provádí podle normy ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor [30]. Principem zkoušky je prosévání daného množství kameniva přes sadu normových sít. Podle hmotnostního zůstatku na sítích pak určíme rozložení frakcí ve vzorku kameniva, procento jemných částic a propady jednotlivých frakcí kameniva přes síta. Tyto propady určíme jako procentuální poměr zjištěné hmotnosti na sítě ku celkové původní suché hmotnosti.

$$x_n = \frac{M_n}{M_1} \cdot 100$$

Kde:

x_n ... procentuální podíl na sítě v %

M_1 ... hmotnost vysušené zkušební navážky v g

M_n ... hmotnost suchého zbytku na sítě n v g

Pro výpočet procenta jemných částic platí vztah:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \cdot 100$$

Kde:

f ... obsah jemných částic v %

M₁ ... hmotnost vysušené zkušební navážky v kg

M₂ ... hmotnost zbytku zachyceného na síti 0,063 mm v kg

P ... hmotnost vytrízeného materiálu zbylého na dně v kg

2) Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti zrn kameniva

Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti zrn kameniva provádíme pyknometricky podle normy ČSN EN 1097-6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti [31]. Stanovíme hmotnosti prázdného pyknometru, pyknometru se suchou navážkou, pyknometru s navážkou a vodou a pyknometru naplněným pouze vodou. Po pyknometrické zkoušce nasáknuté kamenivo vyjmeme z pyknometru a zvážíme nejprve povrchově vysušené a následně vysušené v sušárně. Z těchto zaznamenaných hodnot se pomocí výpočetního vztahu vypočítá objemová hmotnost kameniva a nasákavost po 24 hodinách.

$$\rho_{rd} = \rho_w \times \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

Kde:

ρ_{rd} ... objemová hmotnost kameniva v kg/m³

ρ_w ... objemová hmotnost vody v kg/m³

M₁ ... hmotnost povrchově usušeného kameniva v kg

M₂ ... hmotnost pyknometru s nasáklým kamenivem a vodou v kg

M₃ ... hmotnost pyknometru s vodou v kg

M₄ ... hmotnost vysušeného kameniva do ustálené hmotnosti v kg

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100$$

Kde:

WA₂₄ ... nasákavost kameniva po 24 hodinách v %

M₁ ... hmotnost povrchově usušeného kameniva v kg

M₄ ... hmotnost vysušeného kameniva do ustálené hmotnosti v kg

3) Tvarový index kameniva

Zkoušku tvarového indexu kameniva provádíme podle normy ČSN EN 933-4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index [32]. Princip zkoušky spočívá v tom, že navážku dělíme na zrna kubická a zrna nekubická pomocí dvoučelistového měřidla s kolmými a šikmými čelistmi v poměru 1:3. Pokud zrno projde, dá se považovat za kubické. Pokud avšak neprojde, pak je zrno nekubické.

$$SI = \frac{M_2}{M_1} \times 100$$

Kde:

SI ... tvarový index kameniva

M1 ... hmotnost zkušební navážky v g

M2 ... hmotnost nekubických zrn v g

4) Stanovení odporu při stlačování

Stanovení odporu při stlačování provádíme dle normy ČSN EN 13055 [33]. Zkouška probíhá tak, že kamenivo umístěné v ocelovém válci zhutníme vibrací a následně zatěžujeme ve zkušebním lisu až na hodnotu předem dané deformace. Hodnotu síly potřebné ke stlačení zapíšeme. Odpor při stlačování se vypočte dle vztahu:

$$C = \frac{F + L}{A}$$

Kde:

C ... odpor při stlačování v MPa

L ... síla vyvinutá hmotností pístu v N

F ... potřebná síla ke stlačení v N

A ... plocha pístu v mm²

5) Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva

Zkouška sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva se stanoví podle ČSN EN 1097-3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva [36]. Princip zkoušky spočívá v tom, že stanovíme hmotnost kameniva volně nasypného do nádoby o známém objemu. Hodnotu sypné hmotnosti určíme jako poměr hmotnosti kameniva v nádobě ku objemu nádoby dle rovnice:

$$\rho_b = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

Kde:

ρ_b ...sypná hmotnost volně sypaného kameniva v Mg/m^3

M_2 ... hmotnost nádoby se zkušební navázkou v kg

M_1 ... hmotnost prázdné nádoby v kg

V ... objem nádoby v l

Mezerovitost kameniva se následně stanoví jako podíl objemu mezer mezi zrny a celkovému objemu zkušební navázky dle rovnice:

$$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \cdot 100$$

Kde:

v ... mezerovitost kameniva v %

ρ_b ...sypná hmotnost volně sypaného kameniva v Mg/m^3

ρ_p ... objemová hmotnost zrn kameniva Mg/m^3

6) Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování

Odolnost proti zmrazování a rozmrazování provádíme podle normy ČSN EN 1367-1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování [37]. Princip zkoušky spočívá v tom, že roztržený vzorek na frakce vysušíme, zvážíme, zaplavíme destilovanou vodou a vystavujeme 10 cyklům zmrazování a rozmrazování v intervalu teplot od – 17,5 °C do 20 °C. Následně se vzorek vloží na síto o velikosti otvorů poloviny otvorů dolního síta, které bylo použito pro přípravu navážky, a odplavíme jemné částice. Zůstatek na sítě vysušíme a zvážíme. Odolnost proti zmrazování a rozmrazování vypočteme podle vztahu:

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

Kde:

F ... procentuální úbytek hmotnosti tří dílčích navážek v %

M1 ... počáteční hmotnost tří vysušených dílčích navážek v g

M2 ... konečná hmotnost tří vysušených dílčích navážek v g

7) Stanovení odolnosti proti drcení metodou otlukového bubnu

Otlukovost kameniva stanovujeme dle normy ČSN EN 1097-2: Metody pro stanovení odolnosti proti drcení metodou otlukového bubnu – Los Angeles [38]. Podstatou zkoušky je drcení kameniva ocelovými koulemi v otáčejícím se bubnu. Součinitel Los Angeles určíme jako procentní podíl zkušební navážky propadené sítem 1,6 mm po ukončení zkoušky k původní navážce dle vzorce:

$$LA = \frac{5000 - M}{50}$$

Kde:

LA ... součinitel Los Angeles v %

M ... hmotnost zachycená na sítě 1,6 mm v g

8) Objemová stálost – smršťování při vysychání

Zkouška dle ČSN EN 1367-4: Stanovení smršťování [39] posuzuje vliv kameniva na smršťování betonu. Principem je měření změny délky cementových trámečků ve vlhkém a suchém stavu. Výsledné smrštění se vypočítá podle vztahu:

$$S = \frac{(w - d)}{l} \cdot 100$$

Kde:

S ... smrštění v %

w ... počáteční vlhké měření v mm

d ... suché měření v mm

l ... suchá délka v mm

9) Chemický rozbor

Zkouškami chemického rozboru podle normy ČSN EN 1744-1+A1 [40] stanovujeme obsah škodlivých látek v kamenivu. Mezi tyto stanovení patří například stanovení vodou rozpustných chloridů, vodou rozpustných síranů v recyklovaném kamenivu, zkouška alkalicko-křemičité reakce, obsah nebezpečných látek, stanovení potenciální přítomnosti humusu a vlivu vodou rozpustných látek na počátek tuhnutí a tvrdnutí cementu.

10) Odolnost proti otěru – EN 1097-1

Odolnost kameniva proti otěru stanovujeme podle normy ČSN EN 1097-1: Stanovení odolnosti proti otěru [41]. Principem zkoušky je stanovit součinitel mikro-Deval, kdy se v bubnu s ocelovými kuličkami a vodou točí zkušební navážka. Součinitel mikro-Deval se vypočítá z hmotnosti mokrého zůstatku na síti 1,6 mm podle vzorce:

$$M_{DE} = \frac{500 - m}{5}$$

Kde:

m ... hmotnost nadsítného podílu na síti 1,6 mm

M_{DE} ... součinitel mikro-Deval

3.3. Druhy recyklovaného kameniva

3.3.1. Betonový recyklát

Beton je kompozit složený z kameniva, vody a hydraulických pojiv. První zmínky o hydraulických pojivech můžeme najít již kolem roku 1000 př. n. l u Féniciánů. Na jejich vědomosti pak navazovali Římané, kteří pomocí betonu mohli zrealizovat mnoho dodnes dochovaných staveb jako je Pantheon, Koloseum nebo akvadukt Pont du Gard. Významný rozvoj betonu zaznamenáváme během 17. a 18. století a s ním i výstavbu slavného Eddystonského majáku. Od tohoto momentu stoupal vývoj hydraulických pojiv a betonu jako takového vzhůru až k betonům, které známe dnes [23].

Betonový recyklát vzniká drcením betonového odpadního materiálu po skončení jeho životnosti. Kvalita výsledného recyklátu se významně odvíjí od charakteru a vlastností původní konstrukce. Betonový recyklát získáváme z betonových nosných konstrukcí, podkladních betonů nebo třeba z vyřazených betonových dílců. Dle normy ČSN EN 933-11 betonový recyklát rozdělujeme do několika kategorií podle procentuálního zastoupení betonového recyklátu. Tyto kategorie jsou pro betonový recyklát popsány v Tabulce 2 [25] [24].

Tabulka 2: Označení betonu dle procentuálního zastoupení betonového recyklátu [24]

Složka	Obsah Procento hmotnosti	Kategorie
Rc	≥ 90	Rc 90
	≥ 80	Rc 80
	≥ 70	Rc 70
	≥ 50	Rc 50
	< 50	Rc deklarovaná
	Bez požadavku	Rc NR
Rc + Ru	≥ 95	Rcu 95
	≥ 90	Rcu 90
	≥ 70	Rcu 70
	≥ 50	Rcu 50
	< 50	Rcu deklarovaná
	Bez požadavku	Rc NR
Rc beton, betonové výrobky, malta, betonové zdící prvky		
Ru nestmelené kamenivo, přírodní kámen, směsi kameniva stmelené hydraulickými pojivy		

Pro výrobu recyklovaného betonu používáme betonový recyklát, který obsahuje 90 % betonu a 10 % dalších nečistot (dřevo, plast, keramické střepy, sádra, sklo). Nejlepší čistoty jsme schopni dosáhnout, pokud je recyklát z jednoho zdroje. Pokud je čerpán z více různých

zdrojů, pak odchází k vyššímu znečištění výsledného recyklátu. U stavebního odpadu z betonů, které nebyly zabudované v konstrukci, pak kontrolujeme stupeň karbonatace, obsah rozmrazovacích látek a přítomnost plísní [26].

3.3.1.1. Vlastnosti betonového recyklátu

Vlastnosti betonového recyklátu jsou dány vlastnostmi původního betonu, ze kterého bylo následně recyklované betonové kamenivo vyrobeno. Pevnostní třída betonu nám dopředu říká, jakou můžeme očekávat odolnost materiálu proti drcení. Zároveň platí, že čím vyšší pevnostní třída betonu, tím hutnější struktura recyklátu a s tou se váže i nižší nasákavost. Výsledné vlastnosti betonu z recyklátu ovlivňuje i maximální velikost zrna použitého v původním betonu. Menší zrna (kolem 8 mm) způsobují nižší pevnost a větší tendenci k nasákání. S kamenivem vyšších frakcí se pak tyto vlastnosti zlepšují. Velký vliv na výsledné vlastnosti mají i přísady, zejména pak provzdušňující přísady ovlivňující pevnost a nasákavost zrn recyklátu s obsahem cementové matrice [26].

Obecně platí, že se betonový recyklát řadí mezi kamenivo hutné s hodnotami objemové hmotnosti mezi 2300 až 2500 kg/m³. Nasákavost betonového recyklátu je vyšší než u kameniva přírodního. Zatímco nasákavost přírodních kameniv je obvykle do 1 %, tak nasákavost betonového recyklátu se pohybuje mezi 4 až 9 % [27] [28] [4].

3.3.1.2. Využití betonového recyklátu

Využití betonového recyklátu do betonu je velice podobné jako u kameniva přírodního. Jsme schopni z něj vytvořit transportbeton, prefabrikované výrobky i monolitické konstrukce. Jediným rozdílem je, že z recyklovaného kameniva nejsme schopni vyrobit betony vysokých pevností, které by současně byly i odolné proti agresivnímu prostředí [11].

V dnešní době je u nás hned několik firem, které vyrábí certifikovanými postupy betony z recyklovaného kameniva. Jako první přišla s recyklovaným betonem společnost ERC-TECH ve spolupráci se společností Skanska. Rebetong je beton vyrobený ze 100 % recyklovaného kameniva. Následovaly je firmy THERMOSERVIS-TRANSPORT a ALAS SLOVAKIA, s.r.o. Obě tyto firmy momentálně nabízí betony s obsahem 100 % recyklovaného kameniva [14] [11].

Kromě výroby betonu, můžeme betonový recyklát použít i jinak. Méně kvalitní betonový recyklát, který nelze použít do betonů, využíváme jako sypaninu pro násypy pod silniční konstrukce anebo zásypy. Drobná frakce (do 4 mm), která je pro výrobu betonu zatím

nežádoucí, se může pomocí velmi jemného vysokorychlostního mletí znovu aktivovat, a tak nahradit část pojiv a zároveň plnit funkci mikroplniv v cementových stěrkách. Další použití jemné frakce 0-4 mm je jako částečná náhrada (do 20 %) přírodního kameniva recyklátem ve výrobě malt pro nátěry stěn [28] [29].

3.3.2. Cihelný recyklát

Cihla je jeden z nejstarších a nejpobulárnějších stavebních materiálů. První pálené cihly se datují zhruba k roku 4500 př. n. l. ve starověké Mezopotámii. Největší rozvoj pro výrobu cihel nastal v 19. století. S postupem času se z cihel plných pálených přešlo na cihly s dutinami ve struktuře a díky neustálému vývoji výroby cihel dnes známe cihlové výrobky jako jsou například tvarovky Porotherm. Momentální roční celosvětová produkce cihel je asi 1400 miliard kusů a předpokládá se, že poptávka bude i nadále stoupat [19].

První využití cihelného recyklátu bylo zaznamenáno z roku 1960 v Německu, kdy po druhé světové válce byl cihelný recyklát použit v betonech při opětovné výstavbě poničených německých měst. V dnešní době má cihelný recyklát mnoho využití od výroby betonů, přes zásypový materiál pro silniční stavby až po náhradu přírodního kameniva v cementových maltách. Cihelný recyklát je v dnešní době materiál, díky jehož využití jsme schopni snížit objem skládkovaného SDO a současně zachovat rezervy přírodního kameniva [18] [11].

Cihelný recyklát pochází převážně ze zděných konstrukcí. Může ale také obsahovat zdící prvky pórobetonu, keramické obklady, maltu, omítku, sanitární keramiku apod. Dle normy ČEN EN 933-11 rozděluje cihelný recyklát do několika kategorií podle procentuálního obsahu cihelného recyklátu. Tyto hodnoty jsou popsány v Tabulce 3 [10] [24].

Tabulka 3: Označení betonu dle procentuálního zastoupení cihelného recyklátu [24]

Složka	Obsah Procento hmotnosti	Kategorie
Rb	≤ 10	Rb ₁₀₋
	≤ 30	Rb ₃₀₋
	≤ 50	Rb ₅₀₋
	> 50	Rb _{deklarovaná}
	Bez požadavku	Rb _{NR}
Rb pálené zdící prvky (např. cihly a dlaždice), vápenopískové zdící prvky, provzdušněný neplovoucí beton		

3.3.2.1. Vlastnosti cihelného recyklátu

Kvalitu cihelného recyklátu ovlivňují z největší části původní vlastnosti cihelných výrobků, ze kterých je vyroben. Na jejich vlastnosti má vliv hlavně postup sušení a výpalu a pak následně i chemické a mineralogické složení. Čím vyšší kvalita cihelného výrobku, tím vyšší pevnost a nižší nasákavost cihelného střepu. Obecně můžeme cihelný recyklát zařadit do skupiny pórovitého kameniva s objemovou hmotností do 2000 kg/m³. Jejich poréznost pak způsobuje vyšší nasákavost, která se pohybuje v rozpětí hodnot 9,8 – 18 %. Opět platí, že čím kvalitnější cihla, tím nižší pórovitost, což snižuje i hodnotu nasákavosti [22].

3.3.2.2. Využití cihelného recyklátu

Cihelný recyklát se kvůli své nízké pevnosti v tlaku používá převážně ve formě hrubé cihelné drti jako násypový materiál a ve formě jemné cihelné drti pro povrchy sportovišť (antuka). Lze jej ale použít i v betonových kompozitech, zejména u konstrukcí s nízkou stavební náročností. V posledních letech se začíná používat i jako náhrada kameniva v cementových maltách. Se zmenšující se velikostí zrn cihelného recyklátu roste jeho pucolánová aktivita. To umožňuje nahradit větší část přírodního kameniva, aniž bychom ztratili výsledné vlastnosti čerstvé ztvrdlé malty. Cihelný recyklát a jeho aplikace se začala objevovat i v silničním stavitelství pro výrobu propustného betonu v podkladní části vozovek [11] [20] [21].

3.4. Beton z recyklovaného kameniva

Základním požadavkem na recyklované kamenivo do betonu je, aby vlastnosti recyklátu nenarušovaly proces hydratace pojiva a neovlivňovaly vznik pevných vazeb, které jsou zásadní pro požadované fyzikálně-mechanické vlastnosti výsledného betonu [46].

3.4.1. Beton z betonového recyklátu

Beton z betonového recyklátu je v dnešní době už běžně využívaným materiálem. V současné době jsme schopni zpracovat SDO tak, abychom vyprodukovali dostatečně kvalitní betonový recyklát, který lze využívat v některých aplikacích stejně jako beton s přírodním kamenivem. Největší vliv na kvalitu betonu z betonového recyklátu má původní cementový tmel, který obaluje zrna kameniva původního betonu a váže se s novou cementovou maticí. Tato vazba je slabší než vazba cementový tmel-kamenivo, což způsobuje obecně horší deformační vlastnosti recyklovaného betonu. Pórovitost cementového tmele způsobuje vyšší absorpci vody a tím snižuje zpracovatelnost čerstvého betonu [11] [56].

Reologii čerstvého betonu ovlivňuje, jak nasákavost cementového tmele, tak tvar a charakter povrchu zrn betonového recyklátu. Obsah vzduchu v čerstvém betonu se pohybuje ve stejných hodnotách jako u betonu s přírodním kamenivem. Oproti betonu s přírodním kamenivem jsou objemové hmotnosti čerstvého betonu s betonovým recyklátem nižší o 13-17 %. Zejména podíl frakce 0-4 mm má zásadní vliv na konzistenci čerstvého betonu [57] [46].

Pevnost v tlaku betonu při 100 % náhradě přírodního kameniva kamenivem recyklovaným je nižší zhruba o 25 %. Pokud ale snížíme vodní součinitel, tak pokles v pevnosti oproti betonu s přírodním kamenivem není tak vysoký. U pevnosti v tahu za ohybu sledujeme obdobný průběh. Při 100 % náhradě recyklovaným kamenivem je hodnota nižší o 7-19 %. Modul pružnosti betonu s recyklátem je oproti betonu s přírodním kamenivem nižší o zhruba 15-30 %. Smrštění u betonu z betonového recyklátu pak nabývá hodnot 20-40 % [56] [57] [46].

3.4.2 Beton z cihelného recyklátu – cihlobeton

Betonu z cihelného recyklátu se říká cihlobeton. Parametry cihelného recyklátu jako je objemová hmotnost drcených cihel, podílu malty, granulometrie a původ cihelného recyklátu (asanované zdivo nebo výmět z výroby) mají zásadní vliv na vlastnosti výsledného cihlobetonu [46].

Obecně se cihlobeton řadí do lehkých betonů, zejména kvůli nízké objemové hmotnosti cihelného recyklátu. Pokud bychom chtěli cihlobeton s objemovou hmotností vyšší než 2000 kg/m³ musíme nahradit frakci 8-16 mm recyklátu kamenivem přírodním. Cihelný recyklát má vysokou nasákavost (až 25 %) a významně ovlivňuje zpracovatelnost čerstvého betonu, zejména při použití frakce 0-4 mm. Tato frakce se buď nahrazuje úplně nebo alespoň z 50-65 % přírodním kamenivem. Největší vliv na konzistenci čerstvého cihlobetonu pak má frakce 4-8 mm. Obsah vzduchu v čerstvém cihlobetonu je vyšší než v betonu s přírodním kamenivem. Při úplné náhradě recyklovaným kamenivem hodnoty obsahu vzduchu nabývají hodnot 4-7 % [46] [55].

Co se týče pevnosti v tlaku, tak pokud objem cihelného recyklátu nepřesáhne 80 % náhrady přírodního kameniva frakce 4-16 mm, tak hodnoty pevnosti obecně neklesají. Při 100 % náhradě recyklovaným kamenivem klesá hodnota pevnosti v tlaku o zhruba 40-45 % u cihelného recyklátu s nízkou pevností a o 10-25 % u recyklátu se střední pevností. Statický modul pružnosti je u cihlobetonu o 30-50 % nižší než u betonu s přírodním kamenivem. Hodnoty smrštění naopak nabývají hodnot o 10-20 % vyšších než u betonů s přírodním kamenivem.

Mrazuvzdornost u cihlobetonů je převážně závislá na druhu cihelného recyklátu a jeho vlastnostech. Dříve bylo obecným faktem, že cihlobeton při 100 % náhradě přírodního kameniva kamenivem recyklovaným není mrazuvzdorný. Cihlobetony byly mrazuvzdorné pouze v případě, že bylo použito alespoň 20 % přírodního kameniva. V dnešní době ale už vznikají studie, které říkají, že pokud se použije cihelný recyklát s vyšším podílem frakce 0-4 mm a zvýší se dávka cementu, tak vznikají mrazuvzdorné betony, které nabývají také vyšších hodnot pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu [44] [46].

Cihlobetonem se zabýval i výzkumný tým z Fakulty stavební na ČVUT, který vytvořil několik druhů cihlobetonů a na těch zkušel základní parametry. V rámci jejich výzkumu bylo vytvořeno několik receptur s různým obsahem cihelného recyklátu a cementu. Obecně je známo, že cihelný recyklát je značně nasákavý. Proto v rámci studie byly použity hodnoty jak reálných vodních součinitelů, tak hodnoty efektivních vodních součinitelů. U některých receptur se rozdíl mezi reálným a efektivním vodním součinitelem pohyboval okolo 0,52 s tím, že reálné hodnoty vodních součinitelů dosahovaly hodnot okolo 1,0. Přes takto vysoký vodní součinitel tělesa vykazovala na beton z cihelného recyklátu vysokou pevnost jak v tlaku, tak v tahu za ohybu. Pro představu se hodnoty pro pevnost v tlaku pohybovaly mezi 15-24 MPa a pro pevnost v tahu za ohybu mezi 4-6 MPa podle dávky cementu. Na mrazuvzdornost obstály jen tři receptury se 100 % náhradou přírodního kameniva cihelným recyklátem, které zároveň obsahovaly alespoň 50 % frakce 0-4 mm [44].

3.5. Použití recyklovaného kameniva v praxi

Pro veškeré betonové výrobky z recyklovaného kameniva na tuzemském trhu stanovují technickou specifikaci normy ČSN EN 206+A2 a ČSN P 73 2404, kterými se dodavatel musí řídit při výrobě betonu vyrobeného z recyklovaného kameniva. V dnešní době jsme schopni z recyklovaného kameniva vyrobit transportbeton (pro základy staveb, podkladní konstrukce, výplňové betony atd.), prefabrikované výrobky (betonové bloky, protihlukové stěny, opěrné stěny, dekorativní prvky atd.) a monolitické stavby, kde využíváme vlastností recyklovaného kameniva jako je nízká objemová hmotnost a nižší výrobní náklady (stavba rodinných domů, kanceláří nebo skladových hal). Norma ČSN EN 206+A2 udává maximální množství recyklovaného kameniva, které můžeme v betonu použít. Toto množství je stanoveno typem a čistotou použitého recyklátu, ale i stupněm vlivu prostředí, pro který je beton navržený [11] [16].

3.5.1. Beton s recyklovaným kamenivem

Složení betonu a procentuální množství recyklovaného kameniva v betonu je definováno dle ČSN EN 206+A2. Toto množství závisí na typu recyklátu, požadované pevnostní třídě a také expoziční třídě betonu [10].

Podle normy ČSN EN 206+A2 můžeme recyklované kamenivo pro použití do konstrukčního betonu rozdělit na dvě skupiny: typ A a typ B (viz Tabulka 4). Norma současně určuje kolika procenty a jakým druhem recyklátu můžeme nahradit objem přírodního kameniva pro betony v různých stupních vlivu prostředí. Tyto hodnoty už ale neodpovídají dnešní situaci. Momentálně jsme schopni vyrobit beton z recyklovaného kameniva se stejnými, nebo velmi podobnými vlastnostmi jako beton vyrobený z kameniva přírodního, a to i při 100 % náhradě přírodního kameniva kamenivem recyklovaným. Tyto postupy výroby betonu ale nesplňují normové požadavky a musí být provedena certifikace systému řízení výroby na základně kterého je pak vydáno stavebně technické osvědčení a beton může být použit v konstrukci [14].

Tabulka 4: Možnosti využití recyklátů v betonu dle stupně vlivu prostředí [16]

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₋ , FL ₂₋ , XRg ₁₋)	50 %	30 %	30 %	0 %
Typ B ^b : (Rc ₅₀ , Rcu ₇₀ , Rb ₃₀₋ , Ra ₅₋ , FL ₂₋ , XRg ₂₋)	50 %	30 %	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.				

3.5.2. Betonové prefabrikáty s recyklovaným kamenivem

Požadavky a možnosti využití recyklovaného kameniva při výrobě betonových prefabrikátů udává norma ČSN EN 13369 a ČSN EN 206+A2. Při výrobě betonových prefabrikátů lze podle předběžné české normy ČSN P 73 2404 využít pouze recyklované kamenivo typu 1 [10].

Norma ČSN EN 13396 ve své příloze N stanovuje možnosti použití recyklovaného hrubého kameniva, pocházejícího jak z prefabrikátů vyrobených ve stejné výrobě, tak z vnějších zdrojů. Obecně můžeme použít kamenivo z vnějších zdrojů, pokud známe jeho zdroj a vlastnosti rozdrčeného betonu. Pokud tyto parametry neznáme, tak můžeme použít recyklát

vyhovující třídám složek $R_{c\ 90}$ podle ČSN EN 12620+A1:2008, ale obsah betonu musí být omezen na polovinu procent povolených pro recyklované kamenivo [15].

Obecně můžeme použít 5 % recyklovaného kameniva z celkové hmotnosti obsahu kameniva a stačí nám ověřit pouze pevnost betonu. U recyklátu z výroby můžeme použít až 10 % s pouhým ověřením pevnosti. Co se týče vyššího procenta obsahu recyklovaného kameniva, tak ho můžeme zvýšit na 20 % z celkového obsahu kameniva za podmínky, že splní veškeré parametry. Norma dále stanovuje, že recyklátu můžeme použít i více než 20 %, ale opět za podmínky, že splníme všechny parametry stanovené normou (především požadavky na mechanickou pevnost) [15].

4. Experimentální část

4.1. Cíl experimentální části

Cílem experimentální části bylo posouzení parametrů recyklovaného kameniva a jeho následné využití v betonech. Celý postup byl rozčleněn do třech částí (etap). Nejdříve byly ověřeny vlastnosti recyklovaného cihelného a betonového kameniva a následně byla posouzena jejich vhodnost pro využití v betonech. Následně bylo vytvořeno pět receptur s různým obsahem recyklovaného kameniva, na nichž byly provedeny potřebné zkoušky pro ověření jejich použitelnosti v betonových konstrukcích.

4.2. Metodika zkoušení recyklovaného kameniva a betonového kompozitu z nich vyrobeného

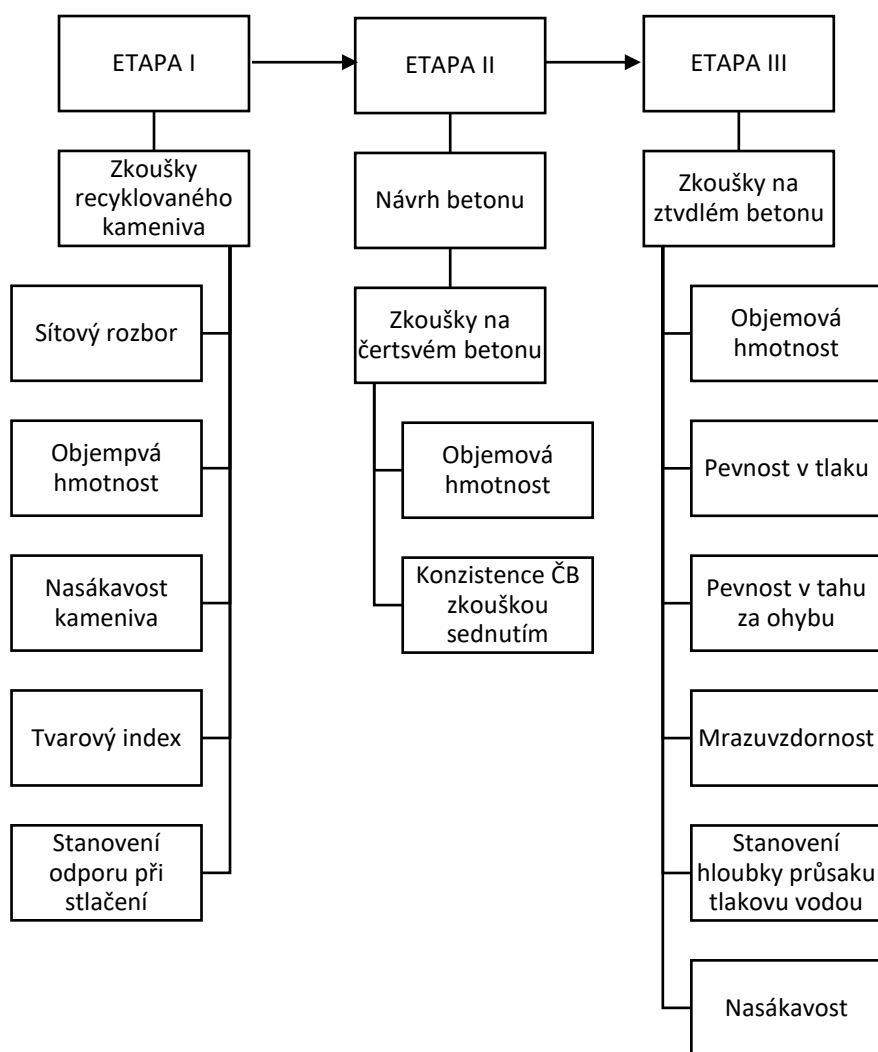
Experimentální část této bakalářské práce probíhala celkem ve třech hlavních etapách. V rámci první etapy byly provedeny zkoušky na recyklovaném kamenivu, které byly na základě výsledků vyhodnoceny a bylo stanoveno, že dané recyklované kamenivo je vhodné pro výrobu betonu. V druhé etapě byly navrženy jednotlivé receptury, provedeny zkoušky na čerstvém betonu a následně byla z těchto receptur vytvořena zkušební tělesa. V neposlední řadě, ve třetí etapě, byla betonová tělesa zkoušena na fyzikálně-mechanické vlastnosti ztvrdlého betonu.

V první etapě byla provedena zkouška zrnitost podle normy ČSN EN 933–1, kdy byla stanovena křivka zrnitosti cihelného a betonového recyklátu. V rámci této zkoušky byl stanoven i podíl jemných částic, který byl zásadní zejména pro cihelný recyklát, jelikož už z vizuálního zhodnocení bylo jasné, že podíl jemných částic bude nabývat vyšších hodnot. Dále byl na frakcích větších než 4 mm včetně stanoven tvarový index zrn kameniva podle normy ČSN EN 933-4. Na obou recyklátech byla pyknometricky stanovena objemová hmotnost podle normy ČSN EN 1097-6 a současně byla také stanovena nasákavost jednotlivých recyklátů. Nakonec byla stanovena pevnost recyklovaných kameniv pomocí zkoušky stanovení odporu proti stlačení podle normy ČSN EN 13055.

V druhé etapě byl proveden návrh referenčního betonu na pevnostní třídu C30/37 a konzistenci S3. Následně byly navrženy betony s obsahem recyklátu, tak aby každý čerstvý beton odpovídal konzistenci S3. Obsah recyklátu byl přepočítán objemově k dávce přírodního kameniva z referenčního betonu. V recepturách byl v různém poměru míchán cihelný a betonový recyklát s přírodním kamenivem tak, abychom byli schopni sledovat vliv recyklátu na výsledný beton. V rámci druhé etapy byla provedena i zkouška objemové hmotnosti

čerstvého betonu podle normy ČSN EN 12350-6 a zkouška konzistence sednutím kužele dle normy ČSN EN 12350-2.

Ve třetí etapě byly následně provedeny zkoušky fyzikálně-mechanických vlastností ztvrdlého betonu. Nejprve byla provedena zkouška objemové hmotnosti podle ČSN EN 12390-7 na zkušebních krychlích i trámčích. Následně byla stanovena pevnost v tlaku na krychlích podle normy ČSN EN 12390-3 ve stáří 7 a 28 dní. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu byla provedena na trámčích ve stáří 28 dní a pak na tělesech po zkoušce mrazuvzdornosti. Zkouška mrazuvzdornosti byla provedena dle normy ČSN 73 1322. Ve stáří 28 dní byly krychelná zkušební tělesa vystavena zkoušce stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou podle normy ČSN EN 12390-8. Nakonec byla provedena zkouška nasákavosti podle zrušené normy ČSN 73 1316.



4.2.1 Použité zkušební metody

4.2.1.1. Zkoušky na čerstvém betonu

1) Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla stanovena dle normy ČSN EN 12350-6: Objemová hmotnost [34]. Principem metody je zhutnění čerstvého betonu na vibračním stole v nádobě o známém objemu. Prázdná nádoba se zváží a umístí na vibrační stůl. Následně je nádoba plněna v několika vrstvách tak, abychom dosáhli úplného zhutnění. Po zhutnění zarovnáme povrch nádoby a nádobu zvážíme. Objemovou hmotnost pak vypočítáme pomocí vztahu:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Kde:

D ... objemová hmotnost čerstvého betonu v kg/m³

m₁ ... hmotnost prázdné nádoby v kg

m₂ ... hmotnost naplněné nádoby se zhutněným betonem v kg

V ... objem nádoby v m³

2) Konzistence čerstvého betonu zkouškou sednutím

Konzistenci čerstvého betonu zjišťujeme pomocí zkoušky sednutím podle normy ČSN EN 12350-2: Zkouška sednutím [35]. Na provedení této metody potřebujeme Abramsův kužel. Zkouška probíhá tak, že kužel plníme vždy ve třech vrstvách, a to do výšky vždy o 1/3 výšky kužele vyšší. Každou vrstvu zhutníme 25 vpichy. Po naplnění kužele odstraníme přebytečný beton. Následně se forma jedním plynulým vertikálním pohybem vzhůru zvedne a změří se sednutí kužele. Klasifikace stupňů sednutí podle hodnot sednutí kužele jsou popsány v Tabulce 5.

Tabulka 5: Klasifikace konzistence sednutí kužele dle ČSN EN 206+A2 [16]

Stupeň	Zkouška sednutím [mm]
S1	10 až 40
S2	50 až 90
S3	100 až 150
S4	160 až 210
S5	≥ 220

4.2.1.2. Zkoušky na ztvrdlém betonu

1) Objemová hmotnost

Objemovou hmotnost ztvrdlého betonu stanovujeme podle normy ČSN EN 12390-7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [50]. Principem je změřit reálné rozměry zkušebního tělesa, zvážit ho plně nasycené a pomocí výpočtového vztahu stanovit objemovou hmotnost:

$$D = \frac{m}{V}$$

Kde:

D ... objemová hmotnost v kg/m³

m ... hmotnost tělesa v kg

V ... objem tělesa v m³

2) Pevnost v tlaku

Stanovení pevnosti v tlaku probíhá podle normy ČSN EN 12390-3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [51]. Zkušební těleso (krychle nebo zlomek trámce) umístíme do zkušebního lisu a rovnoměrně zatěžujeme do porušení. Hodnota pevnosti v tlaku se vypočte dle vztahu:

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

Kde:

f_c ... pevnost v tlaku v N/mm²

F ... maximální zatížení při porušení v N

A_c ... průřez zatěžovací plochy v mm²

3) Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu stanovujeme podle normy ČSN EN 12390-5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles [52]. Zkouška probíhá dvěma způsoby: tělesa zatěžujeme buď jedním břemenem tříbodově anebo dvěma břemeny čtyřbodově. Těleso zatěžujeme do porušení. Pevnost v tahu za ohybu pro čtyřbodové zatížení vypočítáme:

$$f_{ct,fl} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

Kde:

$F_{ct, fl}$... pevnost v tahu za ohybu v N/mm^2

F ... maximální zatížení v N

l ... vzdálenost mezi podporami v mm

d_1, d_2 ... rozměry příčného řezu tělesa v mm

4) Mrazuvzdornost

Mrazuvzdornost probíhá podle normy ČSN 73 1322: Stanovení mrazuvzdornosti betonu [53]. Principem zkoušky je cyklické zmrazování a rozmrazování vodou nasycených betonových trámů. Jeden zmrazovací cyklus je složen ze 4 hodin zmrazování a 2 hodin rozmrazování. Po uplynutí požadovaných cyklů je těleso zváženo a následně nejprve ve zkušebním lise namáháno na pevnost v tahu za ohybu a následně jsou zlomky trámů namáhány na pevnost v tlaku. To stejné provedeme i na tělesech referenčních, které zrály ve vodním uložení za normálních podmínek. Mrazuvzdornost nám vyjadřuje součinitel mrazuvzdornosti, který je dán poměrem hodnoty pevnosti v tahu za ohybu u zmrazovaných těles ku těm uložených v normálních podmínkách. Aby bylo těleso prohlášeno za mrazuvzdorné, musí součinitel mrazuvzdornosti vyjít vyšší než 75 %.

5) Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou

Hloubka průsaku tlakovou vodou se stanovuje podle normy ČSN EN 12390-8: Hloubka průsaku tlakovou vodou [54]. Principem zkoušky je působení tlakové vody na povrch zkušebního tělesa. Zkušební těleso zkoušce podrobujeme ve stáří 28 dní a zkouška trvá 72 ± 2 hodiny. Po ukončení zkoušky se těleso rozlomí napůl a změří se největší hloubka průsaku v mm .

6) Nasákavost

Nasákavost betonu zkoušíme dle normy ČSN 73 1316: Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vzlínivosti betonu [62]. Vysušená tělesa se zváží a umístí do nádoby tak, aby voda dosáhla úrovně 10 mm nad výšku vzorku. Tato hladina se kontroluje, popřípadě dolévá, a tělesa se váží v intervalech 1 den, 2 dny, 3 dny do rozdílu změny hmotnosti 10 %. Pokud tohoto rozdílu není dosaženo po 3 dnech, nechá se vzorek ve vodní lázni 7 dní a déle. Nasákavost zkušebních těles stanovíme dle vztahu:

$$V = \frac{m_s - m_d}{m_d} \cdot 100$$

Kde:

V ... nasákavost v %

m_s ... hmotnost vzorku nasáklého vodou v g

m_d ... hmotnost vysušeného vzorku v g

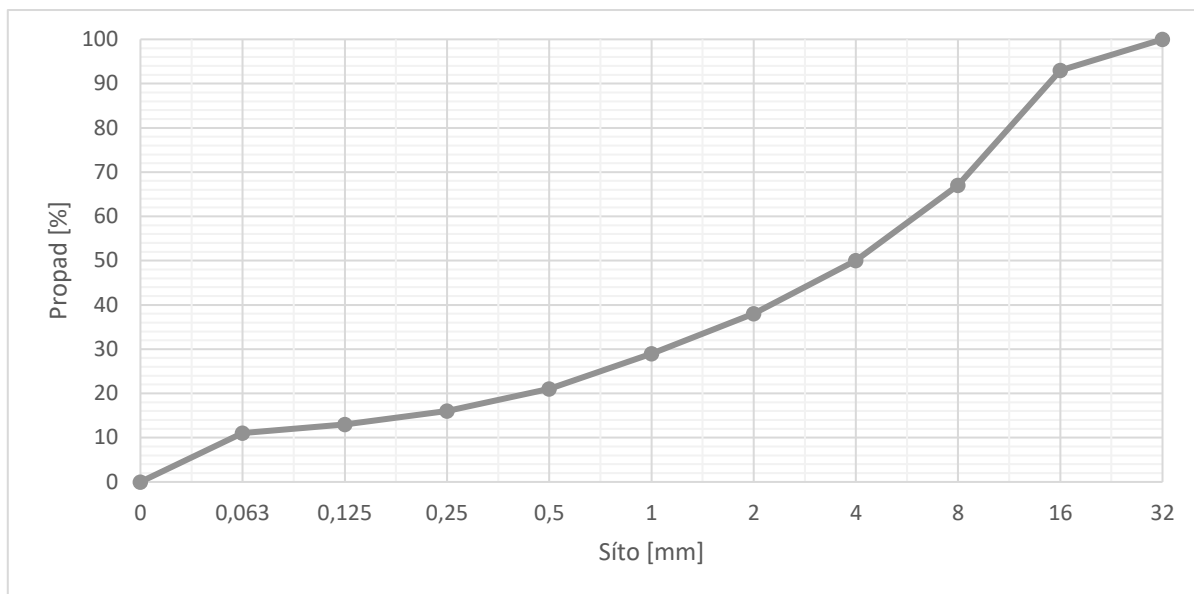
4.3. Etapa 1

V rámci první etapy byly provedeny zkoušky vlastností recyklovaného kameniva. Hlavní zaměření bylo soustředěno zejména na fyzikálně-mechanické vlastnosti samotného betonového a cihelného recyklátu. Na betonovém a cihelném recyklátu byly provedeny zkoušky granulometrie, objemové hmotnosti a nasákavosti zrn kameniva pomocí pyknometru, tvarového indexu kameniva a stanovení odporu při stlačování.

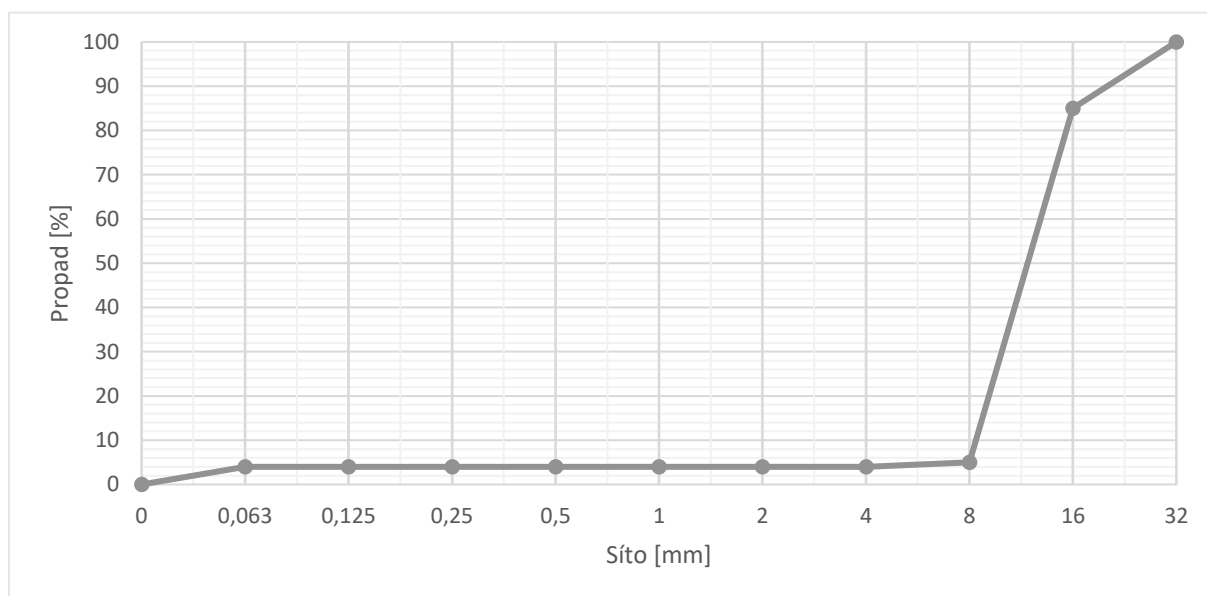
Parametry recyklovaného kameniva použitého v této bakalářské práci byly převzaty z bakalářské práce Sabiny Lípové [60] a výsledky ze zkoušek kameniva byly použity jako vstupní hodnoty pro návrh betonů z recyklovaného cihelného a betonového kameniva. Všechny naměřené hodnoty jsou shrnuty v Tabulkách 6 a 7 uvedených níže.

Tabulka 6: Vyhodnocení síťového rozboru cihelného a betonového recyklátu [60]

Síťový rozbor	Betonový recyklát			Cihelný recyklát		
	Vzorek I	Vzorek II	Průměr	Vzorek I	Vzorek II	Průměr
	Zachyceno na síť [%]		Celkový průměrný propad [%]	Zachyceno na síť [%]		Celkový průměrný propad [%]
32	0	0	100	0	0,0	100
16	21,7	15,7	85	7,4	7,1	93
8	75,4	76	5	26,1	25,3	67
4	0,3	1,7	4	15,4	19,3	50
2	0	0	4	11,4	11,4	38
1	0	0	4	10,2	9,5	29
0,5	0	0	4	7,2	7,0	21
0,25	0	0	4	5,7	5,1	16
0,125	0	0	4	3,1	2,8	13
0,063	0	0	4	2,1	1,9	11
<0,063	0	0	4	0,2	0,6	11



Graf 1: Křivka zrnitosti cihelného recyklátu [60]



Graf 2: Křivka zrnitosti betonového recyklátu [60]

Tabulka 7: Souhrn fyzikálně-mechanických vlastností recyklovaného cihelného a betonového kameniva
[60]

Parametry	Betonový recyklát		Cihelný recyklát		Průměrné hodnoty	
	Vzorek I	Vzorek II	Vzorek I	Vzorek II	Betonový	Cihelný
Objemová hmotnost ρ_a [Mg/m ³]	2,59	2,54	2,22	2,43	2,57	2,33
Nasákavost WA [%]	11	9	27	30	10	29
Sypná hmotnost ρ_b [Mg/m ³]	1,14	1,19	1,24	1,22	1,17	1,23
Setřesená hmotnost $\rho_{b'}$ [Mg/m ³]	1,37	1,37	1,39	1,42	1,37	1,41
Mezerovitost volně sypaná v [%]	-	-	-	-	54,5	47,2
Mezerovitost setřesená v [%]	-	-	-	-	46,7	39,5
Obsah jemných částic f [%]	2,6	5,3	11,5	10,7	4	11
Únosnost σ [MPa]	10,2	11,2	14,5	20	10,7	17,3
Tvarový index SI	-	-	-	-	8	22

4.4. Etapa 2

V rámci druhé etapy bylo vytvořeno pět receptur betonového kompozitu. V recepturách bylo kombinováno přírodní kamenivo s kamenivem recyklovaným a následně i rozdílné recykláty mezi sebou. Všechny receptury vycházely z referenční směsi (beton bez recyklátu) navržené na třídu betonu C 30/37 S3, a cílem u každé směsi bylo vždy docílit stejné konzistence jako u referenční záměsi. Výsledné receptury všech záměsí jsou následně shrnuty v Tabulce 8 uvedené níže. Následně byla provedena zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu (dále ČB), zkouška sednutí kužele a zhotovena zkušební tělesa.

Podle referenční receptury (dále REF) byly vytvořeny celkem čtyři další receptury s obsahem recyklovaného kameniva. Množství recyklovaného kameniva bylo přepočítáno objemově k objemu kameniva přírodního v REF. První beton byl složen pouze z cihelného recyklátu 0-16 mm a cementu. Receptura cihla + cement (dále CC) byla zvolena proto, že cihelný recyklát obsahoval zhruba 50 % částic o velikosti 0-4 mm a cílem bylo zjištění, jaký bude mít tato skutečnost vliv na výsledné vlastnosti betonu při 100 % použití tohoto cihelného

recyklátu v betonu. Další receptura obsahovala cihelný recyklát, cement a přírodní hrubé drcené kamenivo 8-16 mm. V receptuře cihla + cement + přírodní kamenivo (dále CP) byla doplněna frakce 8-16 mm, která v cihelném recyklátu byla zastoupena v menším poměru, tak, aby zrnitost odpovídala křivce zrnitosti dle Fullera. Receptura s betonovým recyklátem 8-16 mm, pískem 0-4 mm cementem (dále BPI) byla navržena jako dvoufrakční beton v objemovém poměru 50 % písku a 50 % betonového recyklátu. V poslední receptuře byl použit jak betonový, tak cihelný recyklát a cement. Hmotnosti obou recyklátů byly navrženy tak, aby zrnitost výsledného recyklovaného kameniva odpovídala křivce zrnitosti dle Fullera. Do všech receptur byla přidávána voda na konzistenci sednutí S3 a všechno kamenivo vstupovalo do procesu míchání ve vysušeném stavu.

Tabulka 8: Navržené receptury pro beton s částečnou nebo úplnou náhradou přírodního kameniva

Surovina	REF	CC	CP	BPI	BC
	[kg]				
CEM I 42,5 R	422	422	422	422	422
Přírodní DTK 0-4 mm	897	-	-	1007	-
Přírodní HDK 4-8 mm	359	-	-	-	-
Přírodní HDK 8-16 mm	538	-	595	-	-
Cihelný recyklát 0-16 mm	-	1360	911	-	952
Betonový recyklát 8-16 mm	-	-	-	855	675
Voda	186	371	285	198	323
Plastifikační přísada 0,8 %	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Vodní součinitel w	0,44	0,88	0,68	0,47	0,77
REF – referenční receptura CC – receptura cihelný recyklát + cement CP – receptura cihelný recyklát + přírodní kamenivo + cement BPI – receptura písek + betonový recyklát BC – receptura betonový recyklát + cihelný recyklát					

4.4.1. Vstupní suroviny

1) Cement

Pro výrobu betonu byl použit cement CEM I 42,5 R ze závodu Mokrý, výrobce Českomoravský cement a.s. Jedná se o portlandský cement s rychlým nárůstem počátečních pevností a rychlým vývinem hydratačního tepla. Složení portlandského cementu je 95 % portlandského slínku a 5 % doplňujících složek. Další vlastnosti jsou shrnuty v Tabulce 9.

Tabulka 10: Vlastnosti portlandského cementu CEM I 42,5 R Mokrý [8]

Pevnost v tlaku [MPa]	po 2 dnech	30,0
	po 28 dnech	59,1
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	po 2 dnech	6,2
	po 28 dnech	9,1
Normální konzistence [%]		26,9
Počátek tuhnutí [min]		194
Konec tuhnutí [min]		260
Měrný povrch [m ² /kg]		388
Měrná hmotnost [kg/m ³]		3130

2) Kamenivo

Jako drobné těžené kamenivo frakce 0-4 mm byl použit písek Žabčice, který je těžen firmou Písek Žabčice spol s.r.o. Jedná se o prané těžené kamenivo. Jako přírodní hrubé kamenivo frakcí 4-8 mm a 8-16 mm bylo zvoleno kamenivo z kamenolomu Olbramovice od výrobce Českomoravský štěrk a.s. Jedná se o drcené granodioritové kamenivo. Obě tato kameniva splňují požadavky normy ČSN EN 12620+A1: Kamenivo od betonu [58] [59].

3) Záměsová voda

Jako záměsová voda byla použita pitná voda z vodovodního řadu, která splňuje požadavky normy ČSN EN 1008: Záměsová voda do betonu.

4) Cihelný recyklát

Cihelný recyklát byl dodán výrobcem THERMOSERVIS ve frakci 0-16 mm.

5) Betonový recyklát

Betonový recyklát byl dodán výrobcem THERMOSERVIS ve frakci 8-16 mm.

6) Plastifikační přísada

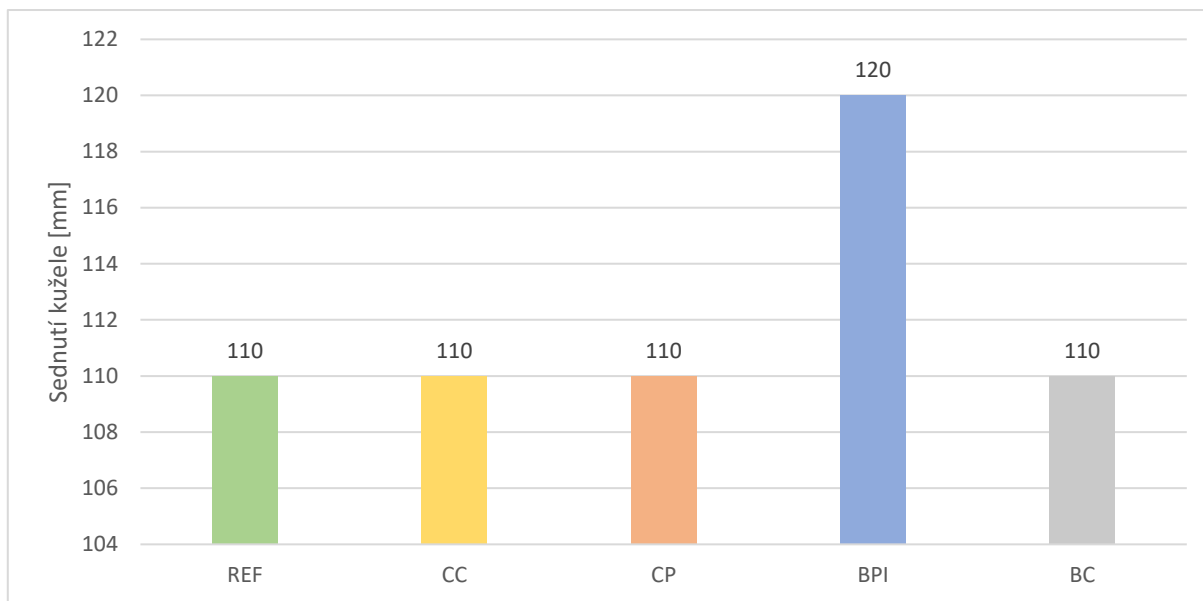
CHRYSO Optima 257 W je plastifikační přísada na bázi polykarboxylátů. Jedná se o žlutohnědou kapalinu s hustotou $1,06 \pm 0,02 \text{ kg/dm}^3$ a pH $5,8 \pm 1,0$. Je vhodná pro všechny druhy transportbetonu a lze ji používat i v zimním období. Doporučené dávkování je 0,4-2,0 kg na 100 kg cementu [61].

Tabulka 11: Výsledky zkoušek čerstvého betonu – sednutí kužele, objemová hmotnost

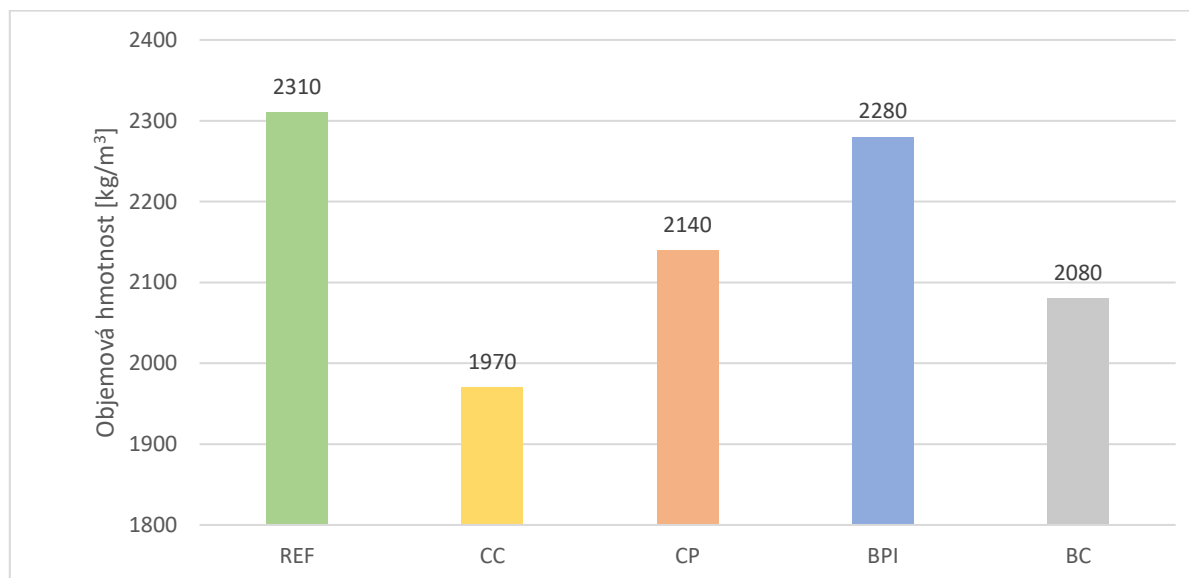
Receptura	Sednutí kužele [mm]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
REF	110	2310
CC	110	1970
CP	110	2140
BPI	120	2280
BC	110	2080



Otázek 2: Zkouška sednutí kužele u betonu CC



Graf 3: Porovnání hodnot sednutí kužele jednotlivých betonů



Graf 4: Porovnání hodnot objemové hmotnosti

Diskuse výsledků:

Podle předpokladu už z teoretického výpočtu objemových hmotností namíchaných betonů se potvrdilo, že nejmenší objemovou hmotnost měl beton CC ze 100 % cihelného recyklátu a spadal do kategorie lehkých betonů. Nejvyšší objemovou hmotnost, kromě referenčního betonu, měl beton BPI z betonového recyklátu a přírodního písku.

Co se týče konzistence, tak cílem bylo dosáhnout stupně sednutí S3 a hodnoty se pohybovaly mezi 110-120 mm. Nejvyšší vodní součinitel $w = 0,88$ vyšel u receptur s obsahem

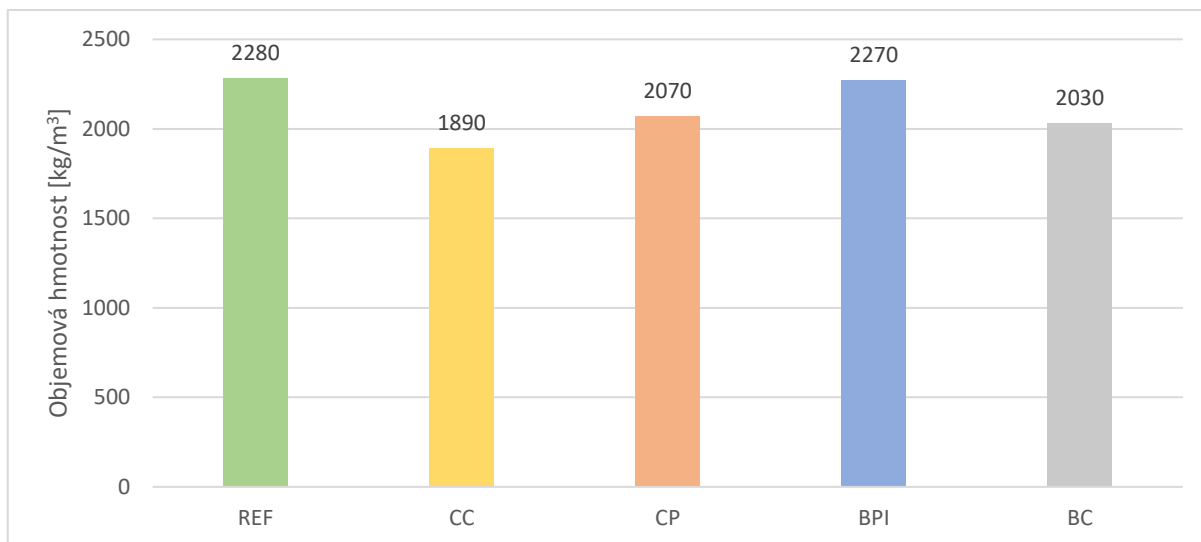
cihelného recyklátu. Tato skutečnost je dána reálným a efektivním vodním součinitelem, kdy cihelný recyklát měl nasákavost kolem 30 % a vysoký podíl jemných částic, takže pohltil značnou dávku vody a efektivní vodní součinitel byl ve výsledku mnohem nižší. Výrazné rozdíly v efektivních a reálných vodních součinitelích popisuje i studie výzkumníků z ČVUT, která se zabývala výrobou cihlobetonů. Výsledky této studie jsou popsány v teoretické části této práce v kapitole 3.4.2 Beton z cihelného recyklátu – cihlobeton.

4.5. Etapa 3

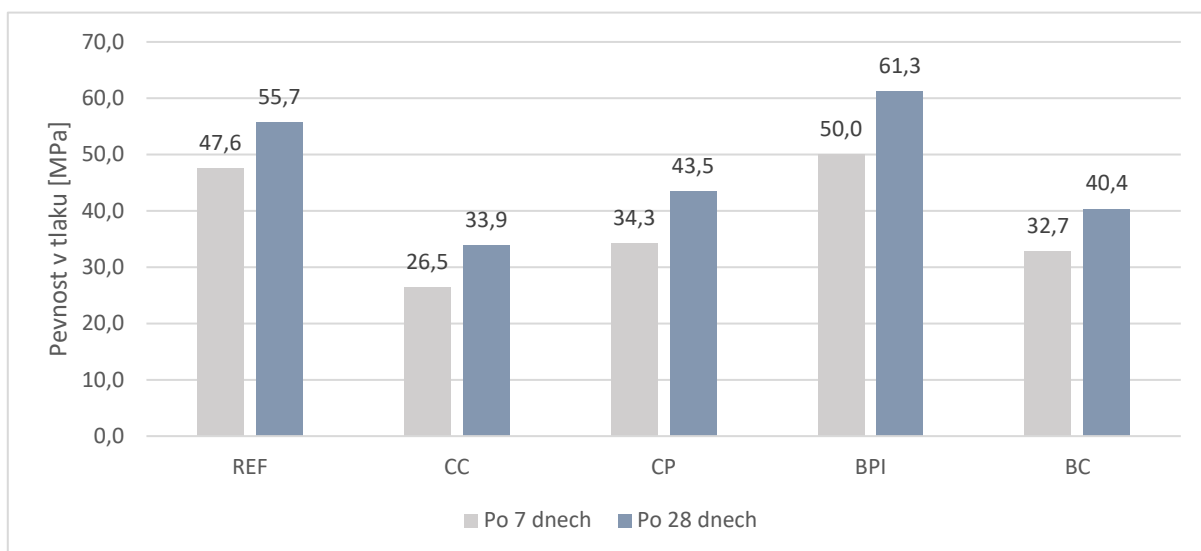
V rámci třetí etapy byly provedeny zkoušky fyzikálně-mechanických vlastností na tělesech zhotovených v etapě druhé. Byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech na krychlích 150x150x150 mm, pevnost v tlaku za ohybu na trámcích 100x100x400 mm po 28 dnech a pevnost v tlaku na jejich zlomcích, zkouška mrazuvzdornosti v počtu 75 cyklů, zkouška stanovení hloubky průsaku a v poslední řadě byla provedena i zkouška nasákavosti betonu.

Tabulka 12: Hodnoty objemové hmotnosti, pevnosti betonu v tlaku po 7 a 28 dnech zrání, pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech

Receptura	Objemová hmotnost ZB [kg/m ³]	Pevnost v tlaku po 7 dnech [kg/m ³]	Pevnost v tlaku f_c po 28 dnech [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu f_{ct} po 28 dnech [MPa]
REF	2280	47,6	55,7	7,7
CC	1890	26,5	33,9	5,3
CP	2070	34,3	43,5	5,4
BPI	2270	50,0	61,3	8,1
BC	2030	32,7	40,4	6,5



Graf 5: Porovnání objemových hmotností ZB



Graf 6: Pevnosti v tlaku ZB po 7 a 28 dnech

Diskuse výsledků:

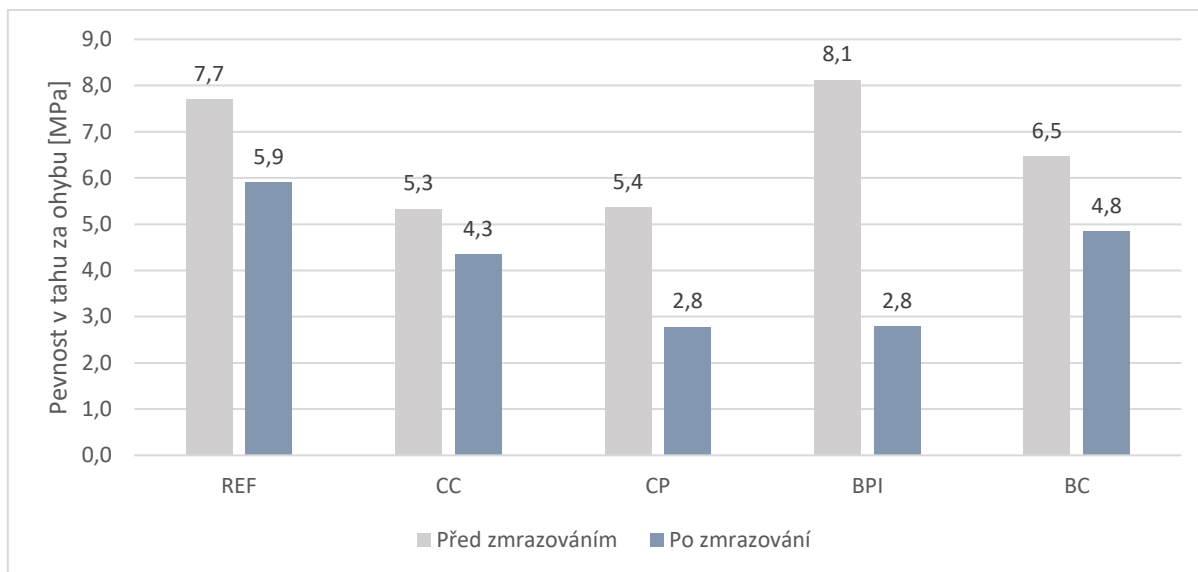
Beton s cihelným recyklátem vykazoval nejnižší pevnosti. V porovnání se pokles pevnosti v tlaku po 7 dnech od REF betonu pohyboval v hodnotách od 28 % do 45 %. U pevností po 28 dnech se tento pokles pohyboval od 22 % od 40 %. Zaznamenán byl, avšak i nárůst pevnosti v tlaku u betonu BPI. To bylo pravděpodobně způsobeno obsahem kameniva s vysokou pevností v betonovém recyklátu. Celkově ale betony s obsahem recyklovaného kameniva vykazovaly vyšší hodnoty pevnosti, než bylo předpokládáno. Tento fakt přisuzují zvýšené dávce cementu a vysoké pevnosti kameniva v betonovém recyklátu.

Tabulka 13: Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti po 75 zmrazovacích cyklech

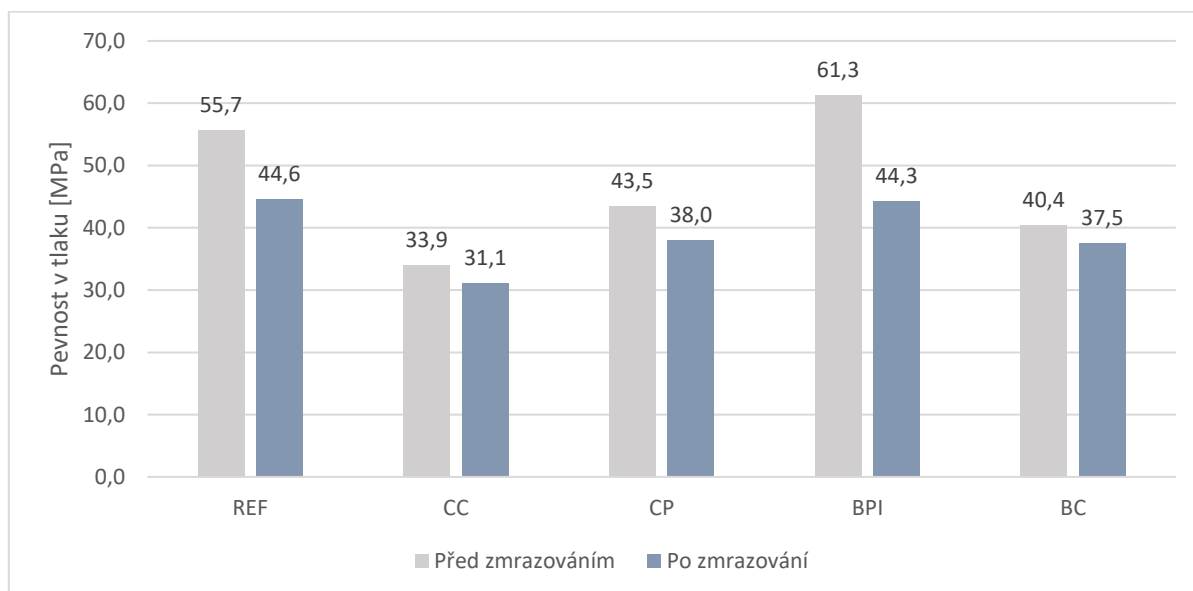
Receptura	Před zmrazování		Po zmrazování		Součinitel mrazuvzdornosti [-]	
	Pevnost v tahu za ohybu f_{cd} [MPa]	Pevnost v tlaku f_c [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu f_{cd} [MPa]	Pevnost v tlaku f_c [MPa]		
REF	7,7	56,2	5,9	44,6	0,77	VYHOVÍ
CC	5,3	33,5	4,3	31,1	0,82	VYHOVÍ
CP*	5,4	44,2	2,8	38,0	0,52	NEVYHOVÍ
BPI	8,1	60,5	2,8	44,3	0,34	NEVYHOVÍ
BC	6,5	40,6	4,8	37,5	0,75	VYHOVÍ
*provedeno pouze 50 cyklů, protože tělesa vykazovala viditelné trhliny a porušení struktury betonu.						



Obrázek 3: Porušené těleso betonu CP po 50 cyklech



Graf 7: Pevnost v tahu za ohybu před a po zmrazování



Graf 8: Pevnost v tlaku před a po zmrazování

Diskuse výsledků:

Při zkoušce mrazuvzdornosti jsme předpokládali porušení těles po 50 cyklech, a to obzvláště u těles s obsahem cihelného recyklátu. Tento jev nastal pouze u těles z betonu CP, a proto byla zkouška na těchto tělesech ukončena po 50 cyklech. Zbylá tělesa byla podrobena celkem 75 cyklům zmrazování a rozmrazování.

U těles REF betonu vyšla mrazuvzdornost těsně nad hranici indexu mrazuvzdornosti 0,75 a to 0,77. Co se týká ostatních těles, za mrazuvzdorné nemůžeme prohlásit jak již miněný beton CP s indexem mrazuvzdornosti 0,52, tak i beton BPI s indexem mrazuvzdornosti 0,34. Nízkou hodnotu mrazuvzdornosti u betonu BPI přisuzujeme faktu, že se jedná o beton

dvoufrakční složený pouze z přírodního písku frakce 0-4 mm a betonového recyklátu frakce 8-16 mm. A jelikož při odolnosti proti mrazuvzdornosti hraje největší roli charakter a parametry kameniva, tak tento výsledek není překvapivý.

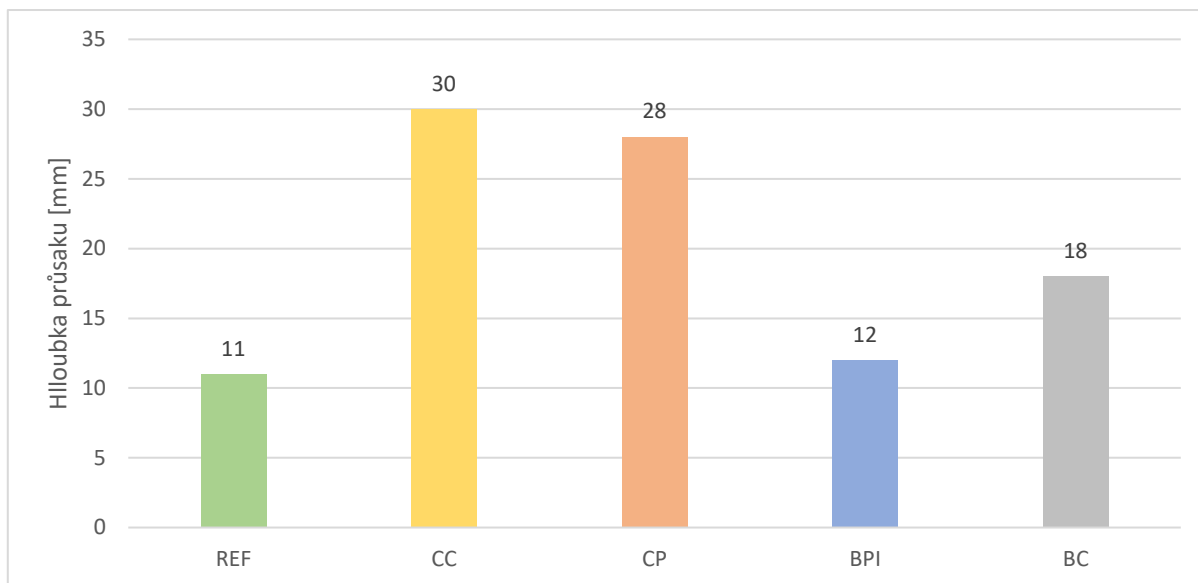
Za mrazuvzdorné byly prohlášeny betony CC a BC. U beton BC ale vyšel index mrazuvzdornosti po 75 cyklech 0,75, což je hraniční hodnota. Pokud by byla tělesa podrobena 100 cyklům, tak by ve zkoušce mrazuvzdornosti už neobstála. V teoretické části této bakalářské práce, v kapitole 3.4.2 Beton z cihelného recyklátu – cihlobeton, je uvedeno, že betony se 100 % náhradou přírodního kameniva cihelným recyklátem, kdy se jedná o recyklát s vyšším podílem frakce 0-4 mm, mohou být mrazuvzdorné za současné vyšší dávky cementu i přes vyšší vodní součinitel. Tento předpoklad byl potvrzen, když index mrazuvzdornosti u betonu CC vyšel nejvyšší a to 0,82.



Obrázek 4: Detailní struktury betonu BPI (vpravo) a CC (vlevo)

Tabulka 14: Vyhodnocení zkoušky stanovení hloubky průsaku a nasákavosti

Receptura	Hloubka průsaku [mm]	Nasákavost betonu [%]
REF	11	4,8
CC	30	17,3
CP	28	10,6
BPI	12	5,6
BC	18	11,5



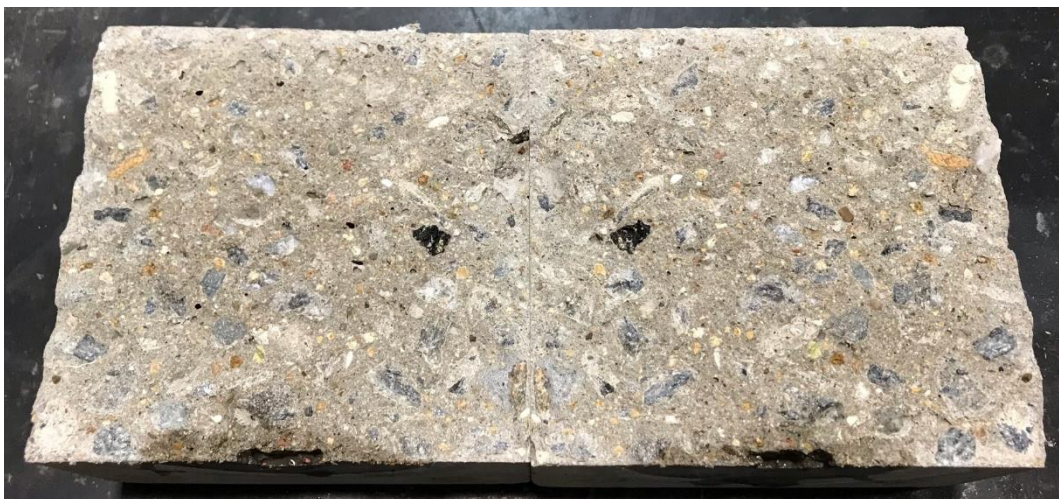
Graf 9: Hloubky průsaku



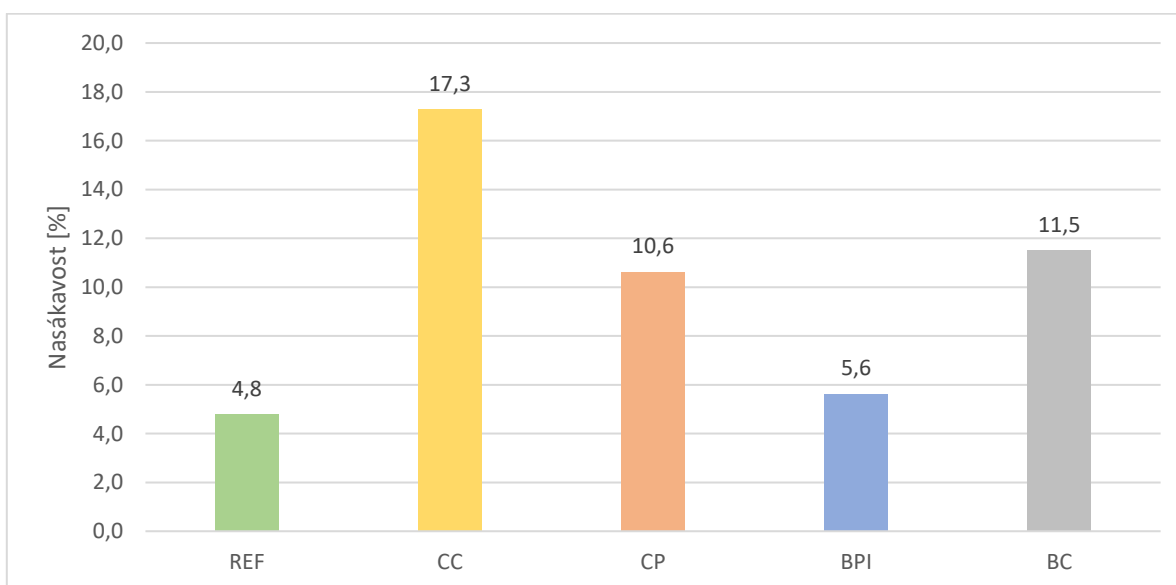
Obrázek 5: Hloubka průsaku tlakovou vodou u betonu CP



Obrázek 6: Hloubka průsaku tlakovou vodou u betonu CC



Obrázek 7: Hloubka průsaku tlakovou vodou u betonu BPI



Graf 10: Nasákavost betonu

Diskuse výsledků:

Už při návrhu betonů se předpokládalo, že beton CC bude mít nejvyšší nasákavost a nejmenší odolnost proti hloubce průsaku tlakovou vodou. Tento předpoklad byl potvrzen a obecně lze říci, že všechny betony s obsahem cihelného recyklátu mají vyšší nasákavost a menší odolnost proti hloubce průsaku tlakovou vodou než betony s obsahem recyklátu betonového.

Vyšší hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou u betonů CC, CP a BC jsou způsobeny vyšší pórovitostí cihelného kameniva a zároveň vyšším vodním součinitelem. Nejvyšší hodnota průsaku byla zaznamenána u betonu CC a to 30 mm. U betonu CP pak 28 mm a betonu BC 18 mm. Nejmenší hodnota průsaku pak vyšla u REF betonu a to 11 mm a byla velice podobná

hodnotě průsaku betonu BPI s betonovým recyklátem 12 mm. Tato podobnost hodnot je pravděpodobně způsobena lepší homogenitou struktury oproti ostatním vzorkům.

Při zkoušce nasákavosti vyšla nejvyšší nasákavost u betonu CC a to 17,3 %. Následně nasákavost u betonů s cihelným recyklátem byla obecně vyšší a to 11,5 % u betonu BC a 10,6 % u betonu CP. Usuzujeme, že hodnota u betonu CP byla oproti betonu BC nižší z toho důvodu, že beton BC obsahoval betonový recyklát, který má vyšší nasákavost než kamenivo přírodní, které bylo použito v betonu CP. Beton BPI s obsahem betonové recyklátu pak vyšel 5,6 % a hodnota nasákavosti REF betonu byla 4,8 %.

5. Závěr

Tato bakalářská práce se věnovala možnostem využití recyklovaného betonového a cihelného kameniva v konstrukčních betonech. V teoretické části byl nejprve popsán koncept cirkulární ekonomiky a jakým způsobem se tento koncept promítá do zpracovávání SDO. Následně byla rozebrána problematika recyklace SDO a vliv na kvalitu a čistotu recyklovaného kameniva. Kvalita recyklovaného kameniva je totiž dlouhodobým problémem, který, pokud by se podařilo vyřešit, by měl zásadní vliv na využití recyklovaného kameniva v betonech. Pokud bychom byli schopni dlouhodobě dodávat recyklát ve stejné nebo alespoň podobné kvalitě, znamenalo by to značné zjednodušení v procesu jeho použití v betonových kompozitech.

Požadavky na recyklované kamenivo jsou stanoveny normami ČSN EN 12620+A1:2008, ČSN EN 13 055 a ČSN EN 13242+A1. Tyto požadavky ale není momentálně většina výrobců recyklovaného kameniva schopna dodržet. Zásadní proto je, abychom definovali parametry recyklovaných kameniv jinak. Jako řešení se nabízí nově připravovaná norma EN 17 555, případně revize normy ČSN P 72 2404, kdy by byly požadavky na recyklované kamenivo rozšířeny o více typů betonových recyklátů a byly doplněny požadavky na cihelné recykláty tak, aby splňovaly požadavky a poptávku praxe. Požadavky na parametry recyklovaného kameniva také nejsou sjednoceny. Obě výše zmíněné normy sice definují požadavky na recyklované kamenivo, ale neshodují se v nich. Zatímco v normě ČSN EN 12620+A1:2008 je stanoveno méně všeobecných vlastností než v normě ČSN EN 13242+A1, je v ní navíc řešena alkalicko-křemičitá reakce, která je zásadní pro zejména betonové recykláty. Naopak norma ČSN EN 13242+A1 řeší odolnost proti drcení, odolnost proti otěru, složky, které ovlivňují průběh tuhnutí a tvrdnutí směsi stmelených hydraulickými pojivy, odolnost proti zmrazování a rozmrazování. Tyto požadavky bylo dobré v budoucnu sjednotit ať už v nově připravované normě EN 17555 anebo revizi normy ČSN P 72 2404.

Oproti přírodnímu kamenivu má recyklované kamenivo obecně horší vlastnosti, a to zejména co se týče pevnosti, nasákavosti, objemové hmotnosti, mrazuvzdornosti a odolnosti proti otěru a drcení. Tyto parametry ovlivňují vlastnosti výsledného betonu z recyklovaného kameniva. Současně má na výsledný beton vliv i materiálová a následně i chemická čistota recyklátu. Obecně platí, že čím čistší recyklát, tím lepší výsledné vlastnosti betonu.

V experimentální části této práce byly ověřeny poznatky, které byly shrnuty v části teoretické. Byly navrženy 5 receptur betonu s různým poměrem recyklovaného a přírodního kameniva. Na betonech byly provedeny zkoušky na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu

a byly potvrzeny předpoklady z teoretické části. Betony s recyklovaným kamenivem měly nižší objemovou hmotnost jak čerstvého, tak ztuhlého betonu. To stejné platilo pro pevnost v tlaku a v tahu za ohybu, kdy hodnoty byly také nižší oproti referenčním. Co se týče mrazuvzdornosti, tak receptury s betonovým recyklátem a pískem a s cihelným recyklátem a přírodním kamenivem nesplnily požadavky zkoušky mrazuvzdornosti. Ostatní receptury jako mrazuvzdorné vyšly a tím potvrdily předpoklad z úvodní úvahy, kdy se předpokládalo, že právě tyto dvě receptury zkoušce mrazuvzdornosti neobstojí. Při zkouškách nasákavosti a hloubky průsaku vyšly hodnoty vyšší u cihlobetonů než u betonů z betonového recyklátu, což se také dalo předpokládat.

Na základě všech zjištěných výsledků lze konstatovat, že se podařilo vytvořit betony splňující jak pevnostní, tak trvanlivostní požadavky pro použití jako konstrukční betony, které bude možné použít v reálných konstrukcích. Zejména pak pro konstrukce v prostředí X0 a XC.

Beton z recyklovaného kameniva je u nás stále materiálem, ve který je vkládána určitá nedůvěra. Ovšem v současnosti jsme schopni recyklované betony využít i v konstrukcích, kde bychom normálně použili beton z přírodního kameniva. Neustále dochází k vývoji betonů z recyklovaného kameniva, a i dnes dochází k objevení nových poznatků. Se současným nátlakem na co největší využití SDO je betonové a cihelné recyklované kamenivo prosperujícím materiálem s bohatým využitím v budoucnosti, pokud to legislativní požadavky umožní.

6. Seznam použitých zdrojů

- [1] ŠKOPÁN, Miroslav. RECYCLING 2016 - Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin: RECYKLACE STAVEBNÍCH A DEMOLIČNÍCH ODPADŮ V PROSTŘEDÍ OBĚHOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ. Brno. ISBN 978-80-214-5331-9.
- [2] Nová zelená úsporám: Nakládání se stavebním a demoličním odpadem [online]. 1.3.2022 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: www.novazelenausporam.cz
- [3] Metodický návod pro řízení vzniku stavebních a demoličních odpadů a pro nakládání s nimi. Ministerstvo životního prostředí: Stavební a demoliční odpady [online]. [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/stavebni_demolicni_odpady
- [4] PAVLŮ, Tereza. Zkoušení a vlastnosti recyklovaného kameniva pro použití do betonu [online]. 26.8.2013 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10265-zkouseni-a-vlastnosti-recyklovaneho-kameniva-pro-pouziti-do-betonu>
- [5] STRATEGICKÝ RÁMEC CIRKULÁRNÍ EKONOMIKY ČESKÉ REPUBLIKY 2040: MAXIMÁLNĚ CIRKULÁRNÍ ČESKO V ROCE 2040 [online]. Listopad 2021, 160 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/cirkularni_cesko
- [6] GODÁNY, Josef. Současný stav disponibilních zásob u využívaných ložisek stavebního kamene a šterkopísku v ČR [online]. 17.3.2021 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2021_1_15_soucasny-stav-disponibilnich-zasob-u-vyuzivanych-lozisek-stavebniho-kamene-a-sterkopisku-v-cr/
- [7] TRTÍK, TOMÁŠ, KAREL ŠEPS, ROMAN CHYLÍK a JOSEF FLÁDR. Porovnání mrazuvzdornosti kameniva získaného recyklací betonu s přírodním kamenivem [online]. 24.1.2019 [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/porovnani-mrazuvzdornosti-kameniva-ziskaneho-recyklaci-betonu-s-prirodnim-kamenivem_46524.html
- [8] CEM I 42,5 R. HeidelbergCement [online]. Českomoravský cement [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi425r>
- [9] ROZBOROVÝ ÚKOL RU-0001/22/Z1: Analýza zdrojů recyklovaného kameniva – Harmonogram zkoušek, stanovení požadavků na řízení výroby. 28.12.2022. Praha.
- [10] PAVLŮ, Tereza, Jan PEŠTA, Martin VOLF a Antonín LUPÍŠEK, 2018. Katalog výrobků a materiálů s obsahem druhotných surovin pro použití ve stavebnictví. Praha.
- [11] HELA, Rudolf, Klára KŘÍŽOVÁ a Miroslav KÝVALA. Výroba betonu z recyklovaného kameniva v ČR v roce 2022 [online]. In: . 2.1.2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z:

<https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/24793-vyroba-betonu-z-recyklovaneho-kameniva-v-cr-v-roce-2022>

[12] ŠKOPÁN, Miroslav. Recyklace stavebních a demoličních odpadů ve světle nových právních předpisů [online]. 18.2.2022 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://zpravy.ckait.cz/vydani/2022-01/recyklace-stavebnich-a-demolicnich-odpadu-ve-svetle-nove-legislativy/>

[13] SAZIMOVÁ, Zuzana. Co jsou to normy a proč je potřebujeme? [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <http://www.euroviakamenolomy.cz/Dokument/1030>

[14] SLÁNSKÝ, Bohuslav, Pavel ZELINKA a Jan ČERMÁK. Beton z recyklovaného kameniva [online]. 17.3.2021 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/beton-z-recyklovaneho-kameniva/>

[15] ČSN EN 13396. Výrobky a systémy pro ochranu a úpravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Měření průniku chloridových iontů. 2005. Praha: Česká technická norma.

[16] ČSN EN 206+A2. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. 2021. Praha: Česká agentura pro standardizaci.

[17] ČSN EN 12620+A1. Kamenivo do betonu. 2008. Praha: Česká agentura pro standardizaci.

[18] DEBIEB, Farid a Said KENAI, 2008. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*. 22(5), 886-893. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013>

[19] Cihla - od historie po dnešek [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/cihla-od-historie-po-dnesek>

[20] DEBIEB, Farid a Said KENAI, 2008. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*. 22(5), 886-893. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013>

[21] CAI, Xu, Kuanghuai WU, Wenke HUANG, Jiangmiao YU a Huayang YU. Application of recycled concrete aggregates and crushed bricks on permeable concrete road base. *Road Materials and Pavement Design* [online]. 2021, 22(10), 2181-2196 [cit. 2023-05-16]. ISSN 1468-0629. Dostupné z: doi:[10.1080/14680629.2020.1742193](https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1742193)

[22] SILVA, R.V., J. DE BRITO a R.K. DHIR. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, 65, 201-217 [cit. 2023-05-16]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:[10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117)

- [23] DOHNÁLEK, Jiří. Beton a betonové stavby v průběhu století (1. část) [online]. 27.8.2017 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/historicke-stavby/16171-beton-a-betonove-stavby-v-prubehu-stoleti>
- [24] ČSN EN 933-11. Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [25] Lidmila, Martin. Possibilities for the usage of recycled materials in railway trackbed. Praha : České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06434-4.
- [26] NOVÁKOVÁ, Iveta a Karel MIKULICA. Faktory ovlivňující kvalitu recyklovaného betonového kameniva. tzbinfo [online]. 16.10.2018 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://m.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18061-faktory-ovlivnujici-kvalitu-recyklovaneho-betonoveho-kameniva?fbclid=IwAR3FaVNgc3nliJM7GWAGRJJPXKE5X8sKCMYyYhUnvddGvu1-N-WAe1FAeGIA>
- [27] Moderní beton. Collepari, Mario. Praha : Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
28. RECYCLING 2014. Doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc. Brno : VUT, 2014 . ISBN 978-80-214-4866-7.
- [28] PROŠEK, Zdeněk, Jan TREJBAL, Vladimír HRBEK a Pavel TESÁREK. Mechanická aktivace odpadního betonu: stanovení efektivity pro různé druhy odpadních betonů. Tzbinfo [online]. 25.3.2019 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18808-mechanicka-aktivace-odpadniho-betonu-stanoveni-efektivita-pro-ruzne-druhy-odpadnich-betonu>
- [29] NENO Catarina, DE BRITO Jorge, VEIGA Rosário. ACADEMIA. Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. [online] 4.9.2016. [cit. 16-05-2023]. Dostupné z: https://www.academia.edu/30668740/Using_fine_recycled_concrete_aggregate_for_mortar_production?fbclid=IwAR2Laf9z0WkDD75WYWQZXiqUfsSfCNcdLAqdz0JX5lQTWR2za7Z3qiaZ58
- [30] ČSN EN 933-1. Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [31] ČSN EN 1097-6. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. Praha: Česká agentura pro standardizaci.

- [32] ČSN EN 933-4. Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index. Praha: Český normalizační institut.
- [33] ČSN EN 13055. Pórovité kamenivo. 2016. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [34] ČSN EN 12350-6. Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [35] ČSN EN 12350-2. Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [36] ČSN EN 1097-3. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. Praha: Český normalizační institut.
- [37] ČSN EN 1367-1. Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání – Část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování. Praha: Český normalizační institut.
- [38] ČSN EN 1097-2. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 2: Metody pro stanovení odolnosti proti drcení. 2021. Praha: Česká agentura pro normalizaci.
- [39] ČSN EN 1097-4. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 4: Stanovení smršťování. 1999. Praha: Český normalizační institut.
- [40] ČSN EN 1744-1+A1. Zkoušení chemických vlastností kameniva – Část 1: Chemický rozbor. 2010. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [41] ČSN EN 1097-1. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 1: Stanovení odolnosti proti otěru (micro-Deval). 1997. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [42] PIJÁČKOVÁ, Erika. Vývoj receptur betonů s recyklovaným cihelným kamenivem jako částečné či úplné náhrady přírodních kameniv. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [43] VORÁČ, Jiří. Studium možností využití hrubých kameniv z betonových recyklátů pro výrobu konstrukčních betonů. Brno, 2023. 96 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [44] FOŘTOVÁ, Kristina, Diana MARIÁKOVÁ, Jakub ŘEPKA a Tereza PAVLŮ. Experimentální ověření betonů s recyklovaným cihelným kamenivem [online]. 19.4.2021 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/22139-experimentalni-overeni-betonu-s-recyklovanym-cihelnym-kamenivem>

- [45] MARIÁKOVÁ, Diana, Tereza PAVLŮ, Kristina FOŘTOVÁ a Jakub ŘEPKA. Experimentální ověření vlastností recyklovaného cihelného kameniva [online]. 28.12.2020 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/21659-experimentalni-overeni-vlastnosti-recyklovaneho-cihelneho-kameniva>
- [46] NOVOTNÝ, Bohumil, 2001. Hodnocení kvality a možnosti využití stavebních recyklátů: Teze habilitační práce. Brno: VUTIUM.
- [47] NOVÁKOVÁ, Iveta a Karel MIKULICA. Faktory ovlivňující kvalitu recyklovaného betonového kameniva [online]. 16.10.2018 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18061-faktory-ovlivnujici-kvalitu-recyklovaneho-betonoveho-kameniva>
- [48] TŮMA, Petr a Jiří DOHNÁNEK. Smršťování betonu, platné normy a betonové podlahy [online]. 13.5.2010 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/podlahy-pricky-povrchy/6479-smrstovani-betonu-platne-normy-a-betonove-podlahy>
- [49] Bc. Klára Antošová Recyklované kamenivo do pozemních komunikací. Brno, 2015. 93 s., 128 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
- [50] ČSN EN 12390-7. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [51] ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [52] ČSN EN 12390-5. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [53] ČSN 73 1322. Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Praha: Úřad pro normalizaci a měření.
- [54] ČSN EN 12390-8. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Praha: Česká agentura pro standardizaci.
- [55] PAUL, Suvash, Adewumi BABAFEMI, Vivi ANGGRAINI a Md. RAHMAN. Properties of Normal and Recycled Brick Aggregates for Production of Medium Range (25–30 MPa) Structural Strength Concrete. Buildings [online]. 2018, 8(5) [cit. 2023-05-23]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: [doi:10.3390/buildings8050072](https://doi.org/10.3390/buildings8050072)
- [56] González-Taboada, I., González-Fontboa, B., Martínez-Abella, F., & Carro-López, D. (2016). Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. *Materiales De Construcción*, 66(323), e089. <https://doi.org/10.3989/mc.2016.06415>

- [57] THOMAS, Job, Nassif Nazeer THAICKAVIL a P.M. WILSON, 2018. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*. 19, 349-365. ISSN 2352-7102. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.05.007)
- [58] ZEPIKO. ZEPIKO [online]. ZEPIKO spol. s.r.o. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.zepiko.cz>
- [59] Drcené kamenivo. HeidelbergCement [online]. Českomoravský cement [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/kamenivo/drcene-kamenivo>
- [60] LÍPOVÁ, Sabina. *Studium vlastností kameniva z betonového a cihelného recyklátu a jeho využití pro konstrukce*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
- [61] CHRYSO®Optima 257W: Speciální superplastifikační přísada pro transportní beton. 2020.
- [62] ČSN 73 1311. Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vztlakovosti betonu. 1989 Praha: Vydavatelství norem.
- [63] Schéma oběhového hospodářství. In: Ministerstvo životního prostředí: Cirkulární Česko [online]. Listopad 2021 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/cirkularni_cesko

7. Seznam obrázků

- Obrázek 1: Schéma oběhového hospodářství [63]
- Obrázek 2: Zkouška sednutí kužele u betonu CC
- Obrázek 3: Porušené těleso betonu CP po 50 cyklech
- Obrázek 4: Detail struktury betonu BPI (vlevo) a CC (vpravo)
- Obrázek 5: Hloubka průsaku vodou u betonu CP
- Obrázek 6: Hloubka průsaku vodou u betonu CC
- Obrázek 7: Hloubka průsaku vodou u betonu BPI

8. Seznam tabulek

- Tabulka 1: Minimální četnost zkoušek pro vlastnosti kameniva příslušného zvláštním zdrojům (výběr pro recyklované kamenivo) podle normy ČSN EN 12620+A1:2008
- Tabulka 2: Označení betonu dle procentuálního zastoupení betonového recyklátu [24]
- Tabulka 3: Označení betonu dle procentuálního zastoupení cihelného recyklátu [24]
- Tabulka 4: Možnosti využití recyklátů v betonu dle stupně vlivu prostředí [16]

Tabulka 5: Klasifikace konzistence sednutí kužele dle ČSN EN 206+A2 [16]

Tabulka 6: Vyhodnocení síťového rozboru cihelného a betonového recyklátu [60]

Tabulka 7: Souhrn fyzikálně-mechanických vlastností recyklovaného cihelného a betonového kameniva [60]

Tabulka 8: Navržené receptury pro beton s částečnou nebo úplnou náhradou přírodního kameniva

Tabulka 10: Vlastnosti portlandského cementu CEM I 42,5 R Mokrá [8]

Tabulka 11: Výsledky zkoušek čerstvého betonu – sednutí kužele, objemová hmotnost

Tabulka 12: Hodnoty objemové hmotnosti, pevnosti betonu v tlaku po 7 a 28 dnech zrání, pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech

Tabulka 13: Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti po 75 zmrazovacích cyklech

Tabulka 14: Vyhodnocení zkoušky stanovení hloubky průsaku a nasákavosti

9. Seznam grafů

Graf 1: Křivka zrnitosti cihelného recyklátu [60]

Graf 2: Křivka zrnitosti betonového recyklátu [60]

Graf 3: Porovnání hodnot sednutí kužele jednotlivých betonů

Graf 4: Porovnání hodnot objemové hmotnosti

Graf 5: Porovnání objemových hmotností ZB

Graf 6: Pevnosti v tlaku ZB po 7 a 28 dnech

Graf 7: Pevnost v tahu za ohybu před a po zmrazování

Graf 8: Pevnost v tlaku před a po zmrazováním

Graf 9: Hloubky průsaku

Graf 10: Nasákavost betonu

10. Seznam zkratek

SDO – stavebně demoliční odpad

REF – referenční beton

CC – beton cihelný recyklát + cement

CP – beton cihelný recyklát + přírodní kamenivo + cement

BPI – beton písek + betonový recyklát + cement

BC – beton cihelný recyklát + betonový recyklát

ZB – ztvrdlý beton

ČB – čerstvý beton

ČVUT – České vysoké učení technické

ČSN – česká technická norma

EN – evropská norma

ČSN EN – česká technická harmonizovaná norma

ČR – Česká republika