

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA TECHNOLOGIE STAVEB



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**PROBLEMATIKA BETONŮ
S RECYKLOVANÝM PLNIVEM**

2024

BC. ALENA KRÁLOVÁ

VEDOUcí DIPLOMOVÉ PRÁCE:
ING. KAREL POLÁK, PH.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Problematika betonů s recyklovaným plnivem vypracovala samostatně a uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc a NM studiu.

V Praze dne

.....

Bc. Alena Králová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Karlu Polákovi, PhD. za rady a věcné připomínky k vypracování této práce.

Rovněž děkuji Ing. Zdeňku Hlavsovi za odborné rady k technologii betonů s recyklovaným kamenivem a za poskytnutí recyklovaného kameniva pro experimentální část práce. Dále bych chtěla poděkovat doc. Ing. Tereze Pavlů, PhD. a Ing. Janu Peštovi za konzultace a poskytnutí dat k vypracování LCA analýzy.

Poděkování za pomoc s experimentální částí patří Ing. Romanu Chylíkovi, Ing. Tomášovi Trtíkovi a Ing. Janu Veseckému z Katedry betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT a Lukáši Joglovi z Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT.

Děkuji též respondentům, kteří se zúčastnili dotazníkového šetření za účelem získání dat k analýze využívání betonu s recyklovaným kamenivem v České republice.


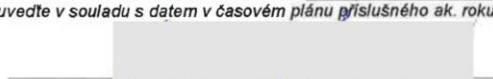
V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu během celého studia a mému příteli za odborné rady k experimentální části, trpělivost a podporu.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

| | | |
|--|---------------------|-----------------------------|
| Příjmení: <u>Králová</u> | Jméno: <u>Alena</u> | Osobní číslo: <u>477089</u> |
| Zadávající katedra: <u>Katedra technologie staveb K122</u> | | |
| Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u> | | |
| Studijní obor: <u>Příprava, realizace a provoz staveb</u> | | |

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

| | |
|---|--|
| Název diplomové práce: <u>Problematika betonů s recyklovaným plnivem</u> | |
| Název diplomové práce anglicky: <u>The issue of concrete with recycled filler</u> | |
| Pokyny pro vypracování: 1) definice základních pojmů a analýza legislativy 2) současný stav problematiky v ČR a zahraničí 3) analýza stavu výzkumu a vývoje související s danou problematikou 4) popis vlivů studované problematiky na jednotlivé fáze výstavbového procesu - popis příležitosti 5) vícekritériální porovnání použití běžných betonů s použitím dotčené technologie na konkrétním případě 6) dotazníkové šetření k dotčené problematice | |
| Seznam doporučené literatury: [1] Jarský Č.: Automatizovaná příprava a řízení realizace staveb, CONTEC Kralupy n. Vlt. 2000, ISBN 80-238-5384-8 [2] Jarský Č., Musil F. a kol.: Příprava a realizace staveb, Akademické nakladatelství CERM s. r. o. Brno 2003, ISBN 80-7204-282-3 | |
| Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Karel Polák, Ph.D.</u> | |
| Datum zadání diplomové práce: <u>26.09.2023</u> | Termín odevzdání diplomové práce: <u>8.1.2024</u> <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small> |
|  Podpis vedoucího práce |  Podpis vedoucího katedry |

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použitých literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

| | |
|---|---|
| <u>26.9.2023</u> Datum převzetí zadání |  Podpis studenta(ky) |
|---|---|

Abstrakt

Zásoby přírodního kameniva se v České republice nevyhnutelně snižují z důvodu postupného uzavírání stávajících lomů a dlouhodobého odmítavého postoje k otevírání nových lomů ze strany veřejnosti i státních orgánů. Proto se tato diplomová práce zabývá možnostmi využití recyklovaného kameniva do betonu jako částečné náhrady kameniva přírodního.

V teoretické části jsou uvedeny současné legislativní i technologické požadavky na použití tohoto materiálu a popsány jeho mechanické a fyzikální vlastnosti. Zároveň je analyzován současný stav výzkumu a vývoje v oblasti recyklátů do betonu v České republice a jsou prezentovány aplikace tohoto materiálu na konkrétních tuzemských i zahraničních stavbách. Rovněž je představeno rozsáhlé dotazníkové šetření mezi odbornou veřejností, jehož cílem bylo analyzovat současné povědomí stavebních odborníků o možnostech využívání betonu s recyklovaným kamenivem v České republice.

V praktické části je provedena LCA analýza pro vybrané betonové konstrukce konkrétního projektu a finanční porovnání použitých betonů. Pro hodnocení životního cyklu betonu s recyklovaným a přírodním kamenivem na tomto projektu byly navrženy tři receptury pro tři typy betonů (C25/30 XC1, C16/20 X0, C16/20 XC1) – s přírodním kamenivem, s částečnou náhradou hrubého kameniva za betonový recyklát a s částečnou náhradou za směsný recyklát (tj. celkem devět receptur). Všechny tři receptury pro beton C25/30 XC1 byly vyrobeny v laboratoři a následně byly provedeny zkoušky ztvrdlého betonu pro porovnání mechanických vlastností betonových směsí s recyklovaným a přírodním kamenivem.

Práce popisuje rozsáhlou problematiku využívání betonu s recyklovaným kamenivem a na konkrétních praktických příkladech ověřuje jeho konstrukční, environmentální a finanční dopady při přípravě a realizaci staveb.

Klíčová slova

stavební a demoliční odpad, nakládání s odpady, druhotné suroviny, beton s recyklovaným kamenivem, udržitelný rozvoj, hodnocení životního cyklu

Abstract

Natural aggregate reserves in the Czech Republic are inevitably shrinking due to the gradual closure of existing quarries and the long-term refusal of the public and state authorities to open new quarries. Therefore, this thesis examines the possibilities of using recycled aggregate as a partial substitute for natural aggregate in concrete.

In the theoretical part, current legislative and technological requirements for the use of this material are presented and its mechanical and physical properties are described. At the same time, the current state of research and development in the field of recycled aggregates for concrete in the Czech Republic is analysed and the applications of this material are presented in specific domestic and foreign buildings. An extensive questionnaire survey among the professional public is also introduced, whose objective was to analyse the current awareness of civil engineering professionals about the possibilities of using recycled aggregate concrete in the Czech Republic.

In the practical part, an LCA analysis is performed for selected concrete structures of a specific project and a financial comparison of the concretes used. For the life cycle assessment of concrete with recycled and natural aggregates in this project, three mixtures were designed for three types of concrete (C25/30 XC1, C16/20 X0, C16/20 XC1) – with natural aggregate, with partial substitution of coarse aggregate for recycled concrete aggregate and with partial substitution for mixed recycled aggregate (that is, nine mixtures in total).

The three mixtures for C25/30 XC1 concrete were produced in the laboratory, and then hardened concrete tests were carried out to compare the mechanical properties of the concrete mixtures with recycled and natural aggregates.

The thesis describes an extensive issue regarding the use of recycled aggregate concrete and verifies its structural, environmental, and financial impacts on the preparation and construction of buildings, using practical examples.

Keywords

construction and demolition waste, waste management, secondary raw materials, recycled aggregate concrete (RAC), sustainable development, life cycle assessment (LCA)

Obsah

| | |
|--|----|
| Pojmy | 9 |
| Zkratky..... | 11 |
| Úvod | 12 |
| Cíle diplomové práce | 12 |
| Struktura diplomové práce | 13 |
| 1. Teoretická část | 14 |
| 1.1. Odpad ve stavebnictví..... | 14 |
| 1.1.1. Situace ve světě | 14 |
| 1.1.2. Možnosti nakládání se stavebním a demoličním odpadem..... | 16 |
| 1.1.3. Vývoj v zemích Evropské unie | 17 |
| 1.1.4. Situace v České republice | 19 |
| 1.2. Recyklace stavebního odpadu | 22 |
| 1.2.1. Produkce recyklovaného kameniva z SDO | 23 |
| 1.2.2. Problémy a rizika při recyklaci stavebního a demoličního odpadu..... | 25 |
| 1.2.3. Recyklační stroje | 26 |
| 1.2.4. Ukázky materiálů z recyklačního procesu | 29 |
| 1.3. Beton s recyklovaným kamenivem..... | 31 |
| 1.3.1. Historie betonu s recyklovaným kamenivem | 31 |
| 1.3.2. Motivace pro používání betonu s recyklovaným kamenivem v České republice.. | 31 |
| 1.4. Porovnání možností využívání recyklovaného kameniva do betonu v České republice a ostatních zemích z hlediska legislativy | 34 |
| 1.4.1. Legislativa v České republice..... | 34 |
| 1.4.2. Situace ve světě | 38 |
| 1.5. Vlastnosti recyklovaného kameniva a RAC..... | 40 |
| 1.5.1. Fyzikální a mechanické vlastnosti RA a RAC | 41 |
| 1.5.2. Trvanlivost betonu s recyklovaným kamenivem | 43 |
| 1.5.3. Environmentální vyhodnocení betonu s recyklovaným kamenivem | 45 |
| 1.6. Výzkum a vývoj RAC v České republice..... | 46 |
| 1.6.1. Granty na vysokých školách a výzkumných ústavech | 46 |
| 1.6.2. Soukromý sektor | 48 |
| 1.7. Inženýrské aplikace RAC ve světě..... | 53 |
| 1.7.1. Waldspirale | 54 |
| 1.7.2. Hong Kong Wetland Park..... | 54 |
| 1.7.3. Samwoh Eco-Green Building..... | 55 |
| 1.7.4. Výzkumná a laboratorní budova pro přírodní vědy na Humboldtově univerzitě v Berlíně..... | 56 |

| | |
|--|----|
| 1.7.5. Projekt Twin-tower v Šanghaji..... | 56 |
| 1.7.6. Recykénie..... | 57 |
| 1.7.7. Talpa House | 58 |
| 2. Dotazníkové šetření..... | 59 |
| 2.1. Výsledky průzkumu | 59 |
| 2.2. Vyhodnocení průzkumu | 66 |
| 3. Překážky a výzvy na stavebním trhu pro beton s recyklovaným kamenivem | 68 |
| 3.1. Popis příležitosti | 68 |
| 3.1.1. Stát/mocenské organizace | 68 |
| 3.1.2. Akademická sféra a vzdělávání..... | 69 |
| 3.1.3. Investoři a developeři | 70 |
| 3.1.4. Architekti, projektanti, statici | 70 |
| 3.1.5. Stavební firmy..... | 70 |
| 3.1.6. Recyklační střediska..... | 70 |
| 3.1.7. Dodavatelé betonu..... | 71 |
| 3.1.8. Technologové..... | 71 |
| 3.2. Fáze výstavbového projektu a popis příležitosti..... | 71 |
| 3.2.1. Předinvestiční fáze | 71 |
| 3.2.2. Investiční fáze – investiční a realizační příprava..... | 72 |
| 3.2.3. Investiční fáze – realizace projektu | 73 |
| 3.2.4. Fáze užívání projektu – provozní fáze | 73 |
| 3.2.5. Ukončení provozu a likvidace stavby | 74 |
| 4. Experimentální část..... | 75 |
| 4.1. Cíle experimentální části..... | 75 |
| 4.2. Návrh receptur betonu | 75 |
| 4.2.1. Postup návrhu | 75 |
| 4.2.2. Úpravy receptur při betonáži..... | 79 |
| 4.2.3. Výsledné receptury na 1 m ³ betonové směsi | 79 |
| 4.3. Výroba směsi C25/30 XC1 | 81 |
| 4.3.1. Použité materiály | 81 |
| 4.3.2. Rozpis výroby vzorků | 83 |
| 4.3.3. Zpracovatelnost čerstvé betonové směsi..... | 84 |
| 4.3.4. Ukládání betonových směsí do forem | 85 |
| 4.3.5. Odbednění..... | 86 |
| 4.4. Zkoušení vlastností ztvrdlého betonu | 86 |
| 4.4.1. Objemová hmotnost..... | 87 |
| 4.4.2. Válcová pevnost betonu v tlaku | 89 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.3. Pevnost betonu v tahu za ohybu..... | 91 |
| 4.4.4. Modul pružnosti..... | 95 |
| 4.4.5. Zatřídění vyrobeného betonu..... | 97 |
| 5. Vícekriteriální porovnání použití betonů s přírodním a recyklovaným kamenivem a LCA analýza pro konkrétní projekt | 98 |
| 5.1. Cíle kapitoly | 98 |
| 5.2. Představení objektu základní a mateřské školy v Praze 9 | 98 |
| 5.2.1. Možnost využití betonu s recyklovaným kamenivem | 98 |
| 5.3. LCA analýza – teoretická část | 101 |
| 5.3.1. Úvod | 101 |
| 5.3.2. Normy | 102 |
| 5.3.3. Historický přehled vzniku metodiky LCA | 103 |
| 5.3.4. Princip metodiky LCA | 103 |
| 5.4. LCA analýza – praktická část..... | 108 |
| 5.4.1. Definice cíle a rozsahu | 108 |
| 5.4.2. Inventarizace životního cyklu (LCI) tvorba a analýza | 108 |
| 5.4.3. Hodnocení dopadů životního cyklu (LCIA)..... | 109 |
| 5.4.4. Interpretace výsledků | 111 |
| 5.4.5. Vyhodnocení pro konkrétní projekt | 117 |
| 5.5. Finanční porovnání | 121 |
| 5.5.1. Posouzení cen betonových směsí dle cenové soustavy ÚRS | 121 |
| 5.5.2. Posouzení cen betonových směsí dle nabídky výrobců betonu | 122 |
| Závěr..... | 125 |
| Dosažené výsledky a poznatky..... | 125 |
| Použité zdroje..... | 127 |
| Seznam obrázků | 136 |
| Seznam tabulek | 139 |

Pojmy

| Pojem | Vysvětlení |
|----------------------------|--|
| BREEAM | Certifikát BREEAM® (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) je standard nejlepších postupů v oblasti navrhování budov s důrazem na trvalou udržitelnost výstavby. |
| CZ-NACE | Klasifikace ekonomických činností vydávaná Evropskou komisí od roku 1970. |
| Demolice | Bourání/odstraňování stavby. |
| Druhotná surovina | Materie (látka), která vzniká jakožto vedlejší důsledek hospodářské činnosti, tedy druhotný produkt při výrobě v průmyslu, stavebnictví, zemědělství a potravinářství a podobně. |
| Ekotoxicita | Toxické působení na životní prostředí nebo také toxické působení na živé organismy. |
| Energetické využití odpadů | Energetické využití odpadů znamená využití tepelné energie uvolněné při spalování odpadů k výrobě elektřiny a tepla. |
| European green deal | Zelená dohoda pro Evropu je oficiální název pro soubor politických iniciativ Evropské komise, jejichž hlavním cílem je dosáhnout toho, aby Evropa byla v roce 2050 klimaticky neutrální. |
| Hrubé kamenivo | Kamenivo s velikostí zrna 4 až 125 mm. |
| Inertní materiál | Jedná se o materiál nejedovatý, netečný (nepodléhající chemickým reakcím), neškodný k okolnímu životnímu prostředí. |
| Jemné kamenivo | Jemné kamenivo se zpravidla skládá z přírodního písku nebo štěrku a z částíček, které propadnou sítím s otvory do 4 mm. |
| Katalog odpadů | Každý jeden druh odpadu má dle zákona o odpadech přiřazen vlastní unikátní kód, který je uveden v Katalogu odpadů. Tento kód slouží pro přesnou identifikaci opadu, určuje další nakládání s odpadem a slouží také k vedení evidence produkce odpadů. |
| LEED | Certifikát LEED® (Leadership in Energy and Environmental Design) je mezinárodně uznávaný standard v oblasti navrhování a výstavby environmentálně šetrných a udržitelných budov. |
| Materiálové využití odpadů | Náhrada prvotních surovin látkami získanými z odpadů, které lze považovat za druhotné suroviny, nebo využití látkových vlastností odpadů k původnímu účelu nebo k jiným účelům, s výjimkou bezprostředního získání energie. |
| Nakládání s odpady | Jejich shromažďování, soustředování, sběr, výkup, třídění, přeprava a doprava, skladování, úprava, využívání a odstraňování. |
| Neobnovitelné zdroje | Neobnovitelný zdroj energie je nerostná surovina využitelná pro výrobu energie, která se přirozeně neobnovuje, případně se obnovuje rychlostí, která je zanedbatelná v porovnání s rychlostí její spotřeby. |
| Nevyhrazené nerosty | Nevyhrazené nerosty jsou ty, které ve výčtu v § 3 zákona č. 44/1988 nejsou uvedeny. Nejběžnější z nich jsou stavební kámen, štěrkopíský a cihlářské hlíny. |
| Odpad | Odpad je každá movitá věc, které se osoba zbavuje, má úmysl nebo povinnost se jí zbavit. Má se za to, že osoba má úmysl zbavit se movité věci, pokud tuto věc není možné používat k původnímu účelu. |
| Primární zdroje energie | Mezi primární zdroje energie se řadí neobnovitelné i obnovitelné zdroje energie, neprošly žádnou lidmi provedenou přeměnou nebo transformačním procesem. Primární zdroje energie jsou volně dostupné v přírodě. |
| Předdemoliční audit | Před započítím procesu demolice stávajících budov, které již nelze dále využít, by měl na stavbě probíhat předdemoliční audit. V rámci něj je zjištěn stav, množství a typ všech materiálů nacházejících se ve stávající budově či její části a je zhodnocen potenciál jejich opětovného využití v další výstavbě. |

| | |
|----------------------------|--|
| Recyklace odpadů | Recyklace je jakýkoli způsob využití odpadů, kterým je odpad znovu zpracován na výrobky, materiály nebo látky, ať pro původní, nebo jiné účely jejich použití, včetně přepracování organických materiálů. |
| Recyklát | Recyklátem je v této práci myšleno recyklované kamenivo |
| Recyklované kamenivo | Recyklované kamenivo vzniká rozdrčením a roztříděním stávající konstrukce nebo její části. |
| SBTool CZ | SBToolCZ je národní český certifikační nástroj pro vyjádření úrovně kvality budov, a to v souladu s principy udržitelné výstavby. |
| Skládka | Skládka je zařízení zřízené za účelem skladování a odstraňování odpadů. |
| Stavební a demoliční odpad | Stavební a demoliční odpady (SDO) jsou materiály vznikající při stavebních činnostech, při výstavbě a úpravě objektů, při jejich demolici a odstraňování. V Katalogu odpadů jsou vedeny pod číslem 17. Tato komodita obsahuje zdivo, keramické obklady, beton, střešní tašky, dřevo, sklo, plasty, asphaltové směsi, výrobky z dehtu, kovy, vytěženou zeminu a další. |
| Stavební výrobek | Stavební výrobek je každý výrobek určený výrobcem pro trvalé zabudování do staveb, pokud jeho vlastnosti mohou ovlivnit alespoň jeden ze základních požadavků na stavby, kdy trvalým zabudováním výrobku do stavby je takové zabudování, při kterém se vyjmutím nebo výměnou výrobku trvale mění vlastnosti stavby, přičemž vyjmutí nebo výměna výrobku je stavební prací. |
| Úprava odpadů | Každá činnost, která vede ke změně chemických, biologických nebo fyzikálních vlastností odpadů (včetně jejich třídění) za účelem umožnění nebo usnadnění jejich dopravy, využití, odstraňování nebo za účelem snížení jejich objemu, případně snížení jejich nebezpečných vlastností. |
| Vyhrazené nerosty | Vyhrazené nerosty jsou vyjmenovány v § 3 zákona č. 44/1988 a jejich ložiska jsou ve vlastnictví státu bez ohledu na to, kdo je vlastníkem pozemku, pod nímž se nacházejí. |
| Výkup odpadů | Sběr odpadů v případě, kdy odpady jsou právníčkou osobou nebo fyzickou osobou oprávněnou k podnikání kupovány za sjednanou cenu. |
| Zpracování odpadů | Znovuvyužití, recyklace či odstranění odpadu. |

Zkratky

| Zkratka | Definice v původním jazyce | Definice v českém jazyce |
|------------|---|---|
| ČR | – | Česká republika |
| ČSN | – | Česká soustava norem (české technické normy) |
| ČSN EN | – | Česká verze evropské normy |
| ČSN EN ISO | – | Česká verze mezinárodní normy (převzaté evropskou komisí pro normalizaci) |
| ČVUT | – | České vysoké učení technické |
| DGNB | Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen | Německá rada pro trvale udržitelné budovy |
| EIA | Environmental impact assessment | Posuzování vlivů na životní prostředí |
| EPD | Environmental product declaration | Environmentálních prohlášení o produktu |
| EU | – | Evropská unie |
| FAST | – | Fakulta stavební Technické univerzity Ostrava |
| GAČR | – | Grantová agentura České republiky |
| HDP | – | Hrubý domácí produkt |
| CHRL | – | Chemické rozmrazovací látky |
| ISO | International Standards Organization | Mezinárodní organizace pro standardizaci |
| ISO | International Standards Organization | Mezinárodní organizace pro standardizaci |
| LCA | Life-Cycle Assessment | Hodnocení životního cyklu |
| LCI | Life cycle inventory | Inventarizační analýza životního cyklu |
| LCIA | Life cycle impact assessment | Hodnocení životního cyklu |
| MJ | – | Měrná jednotka |
| NAC | Natural aggregate concrete | Beton z přírodního kameniva |
| PČ | – | Pořadové číslo |
| POH | – | Plán odpadového hospodářství |
| RA | Recycled aggregate | Recyklované kamenivo |
| RAC | Recycled aggregate concrete | Beton z recyklovaného kameniva |
| RR | Recovery rate | Míra využití (recyklace) |
| SDO | – | Stavební a demoliční odpad |
| SGS | – | Studentská grantová soutěž |
| STO | – | Stavební technické osvědčení |
| TA ČR | – | Technologická agentura České republiky |
| UCEEB | – | Univerzitní centrum energeticky efektivních budov |
| VUT | – | Vysoké učení technické v Brně |
| ŽB | – | Železobeton |

Úvod

Jedním z nejzávažnějších problémů 21. století je dopad lidské činnosti na životní prostředí a s tím související změny klimatu a environmentální krize. V posledních letech tak vznikají závazky ze stran států, světových lídrů a globálních uskupení s cílem regulovat negativní vliv člověka na životní prostředí a předejít tím nepříznivým podmínkám pro život na naší planetě.

V roce 2015 podepsalo 193 států spolu s Evropskou unií Pařížskou dohodu, která má za cíl omezit nárůst globální teploty maximálně o 2 °C (nebo lépe pouze o 1,5 °C) do roku 2100 vzhledem k předindustriálnímu období (tj. polovina 19. století). [1]

V prosinci 2019 se Evropská unie zavázala k iniciativě European Green Deal, jejímž cílem je zajistit uhlíkovou neutralitu (nulovou bilanci emisí uhlíku) do roku 2050, zároveň by měl být hospodářský růst oddělen od využívání zdrojů. Členské státy též schválily plán snížit čisté emise skleníkových plynů v Evropské unii do roku 2030 nejméně o 55 % ve srovnání s rokem 1990. [2], [3]

Největší světový producent emisí oxidu uhličitého je Čína, prezident Si Ťin-pching oznámil v září roku 2020, že Čínská lidová republika bude usilovat o dosažení uhlíkové neutrality do roku 2060 a do roku 2030 o snížení produkce skleníkových plynů o 65 % oproti roku 2005. [3], [4] Spojené státy americké se zavázaly do roku 2030 snížit své emise skleníkových plynů o 50 až 52 % oproti úrovni z roku 2005. Uhlíková neutralita země by měla být dosažena v roce 2050. [3], [5]

Opatření plynoucí z těchto iniciativ se dotýkají mnoha hospodářských sektorů, včetně stavebnictví. Je třeba zmínit, že stavební průmysl na celém světě je zodpovědný za produkci až 50 % skleníkových plynů, spotřebu 50 % přírodních zdrojů a vytváření 35 % všech odpadů. [6], [7] Nejen z toho důvodu jsou kladeny požadavky na udržitelnější výstavbu, lepší hospodaření s energiemi a používání materiálů, jejichž výroba a životní cyklus jsou šetrnější k životnímu prostředí.

Spolu s tím pak vede nedostupnost primárních a neobnovitelných zdrojů ke snaze více využívat druhotné suroviny. Recyklace stavebních a demoličních odpadů je tak jednou z cest, jak omezit produkci skleníkových plynů při výrobě nových materiálů, šetřit přírodní zdroje a řešit problematiku nakládání s odpady.

Cíle diplomové práce

Beton je po vodě nejpoužívanější látkou na Zemi, odhaduje se, že se na celém světě ročně vyrobí asi 33 miliard tun tohoto materiálu. Předpokládá se, že se tato hodnota bude v příštích několika letech zvyšovat až o 2,5 % ročně. [7] Nejen v České republice však zásadně ubývá zásob přírodního kameniva, které je plnivem a hlavní složkou betonové směsi. Lze tedy předpokládat, že vyšší míra používání recyklovaného kameniva do betonu bude v budoucnu nevyhnutelná.

Tato diplomová práce si dává za cíl analyzovat možnosti používání betonu s recyklovaným kamenivem do stavebních konstrukcí, popsat komplexní legislativní požadavky v České republice a prezentovat výsledky průzkumu ohledně aktuální zkušenosti české odborné veřejnosti s tímto materiálem.

Cílem praktické části je následně porovnat finanční aspekty použití betonu s přírodním a recyklovaným kamenivem na konkrétním projektu a posoudit dopady různých variant betonových směsí na životní prostředí. Součástí této studie je experimentální posouzení mechanických vlastností navržených betonových směsí s recyklovaným kamenivem a ověření vhodnosti použití tohoto betonu do stavebních konstrukcí.

Struktura diplomové práce

Práce je rozdělena do pěti kapitol. První kapitola obsahuje rešerši odborné literatury, zabývá se problematikou odpadů ve stavebnictví, legislativními požadavky pro recyklaci stavebních a demoličních odpadů, použití těchto recyklátů do betonu a omezeními v technických normách. Zaměřuje se též na vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem a zkušenosti s jeho používáním s České republiky i ve světě. Součástí je analýza výzkumu a vývoje v České republice, kdy pro oblast soukromého sektoru byl proveden průzkum mezi betonáry na účelem získání informací k nabídce betonů s recyklovaným kamenivem na českém trhu.

V druhé kapitole je představeno dotazníkové šetření mezi odbornou veřejností, které bylo prováděno od října roku 2023 do ledna roku 2024, data jsou tedy zcela aktuální. Celkem odpovědělo 201 respondentů a prezentované závěry průzkumu mohou být podkladem pro vývoj dalších strategií v oblasti problematiky betonu s recyklovaným kamenivem.

Třetí kapitola se věnuje popisu příležitosti pro využití betonu s recyklovaným kamenivem ve výstavbovém procesu. Jsou představeny překážky a výzvy pro jednotlivé účastníky výstavby a rozebrána možná řešení, jak se s bariérami použití betonu s recyklovaným kamenivem vypořádat a docílit vyšší míry používání tohoto materiálu.

Čtvrtá kapitola, která je experimentální částí diplomové práce, popisuje návrh receptur betonů s přírodním a recyklovaným kamenivem, jejich výrobu a zkoušky mechanických vlastností za účelem ověření parametrů betonu s recyklovaným kamenivem a možnosti jeho použití do konstrukcí. Vzorky byly vyráběny v laboratoři Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT v Praze, zkoušeny byly v laboratoři Katedry betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze.

Poslední, pátá kapitola, souvisí a navazuje na experimentální část. Byl vybrán vhodný projekt, kde lze využít beton s recyklovaným kamenivem. Poté byl proveden rozbor výkazu výměr a sestaven seznam konstrukcí, u kterých je vhodné provést náhradu původně navrženého betonu s přírodním kamenivem za beton s recyklovaným kamenivem. Pro tyto konstrukce byl v projektu navržen beton třídy C25/30 XC1, C16/20 X0 a C16/20 XC1 (vlastnosti prvního z uvedených betonů byly ověřeny experimentálně ve čtvrté kapitole). Hodnocení životního cyklu je pak prováděno pro tři varianty betonových směsí uvedených tříd – s přírodním kamenivem, s částečnou náhradou hrubé frakce přírodního kameniva za betonový recyklát a s částečnou náhradou hrubé frakce přírodního kameniva za směsný recyklát. Pomocí databáze Envimat 3.1 jsou vyhodnoceny dopady na životní prostředí pro jednotlivé betonové směsi a porovnány mezi sebou, do hodnocení je zakomponován i aspekt dopravy materiálu. Současně je uvedena úspora množství přírodního kameniva v případě použití betonů s recyklovaným kamenivem. Na závěr bylo provedeno finanční porovnání navržených směsí pomocí dat z cenové soustavy ÚRS. Pro představu jsou uvedeny i ceny dostupné z veřejných ceníků betonáren, které nabízí beton s recyklovaným kamenivem. Byla provedena kalkulace nákladů na dodávku různých variant betonů na místo stavby, včetně započítání dopravy.

1. Teoretická část

1.1. Odpad ve stavebnictví

V posledních letech se pozornost zemí Evropské unie upírá mimo jiné k problematice nakládání s odpady. Je přijímána celá řada směrnic a rozhodnutí, které jsou následně implementovány do právního řádu České republiky. Primárním cílem je minimalizace vzniku odpadů, pokud již odpady vzniknou, je snaha je znovu využít jako celek, případně z nich vhodnými úpravami vytvořit novou surovinu.

Jeden z největších hmotnostních materiálových toků jsou stavební a demoliční odpady (SDO). V tomto století se začaly zcela oprávněně považovat za významný zdroj druhotných nerostných surovin. Lze je charakterizovat jako skupiny odpadů, které vznikly v předchozí stavební výrobě a dle principu cirkulárního hospodářství jsou opět zařazeny do oběhu výroby, s důrazem na zachování požadované kvality. [8]

Tento odpad vzniká při nových stavebních činnostech, rekonstrukcích nebo demolicích stávajících staveb a obvykle se skládá z objemných a těžkých materiálů jako je beton, dřevo, asfalt, sádra, kovy, keramické výrobky, plasty, zemina a kámen. [6]



Obr. č.1 – Vlevo: stavební a demoliční odpad [9]; vpravo: stavební a demoliční odpad [9].

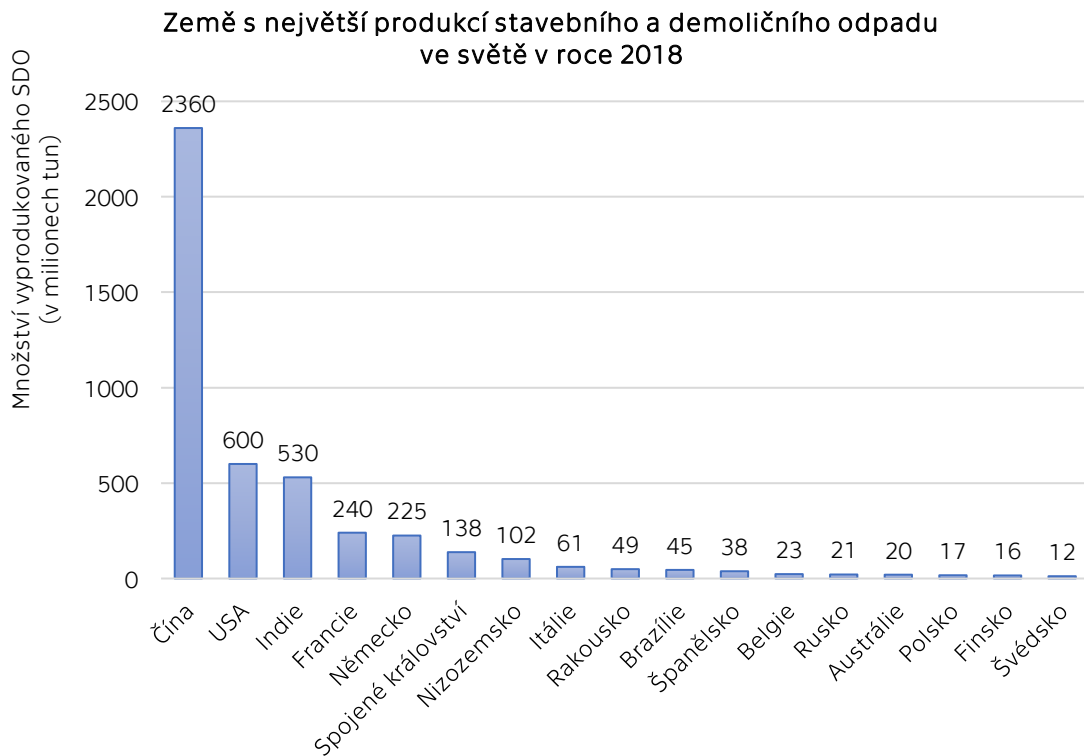
1.1.1. Situace ve světě

Z celosvětově prováděných statistik vyplývá, že existuje přímá úměra mezi velikostí populace, aktivitami souvisejícími s ekonomikou a množstvím vyrobeného SDO, jelikož největší světoví producenti stavebního a demoličního odpadu patří mezi státy s největším HDP. [10]

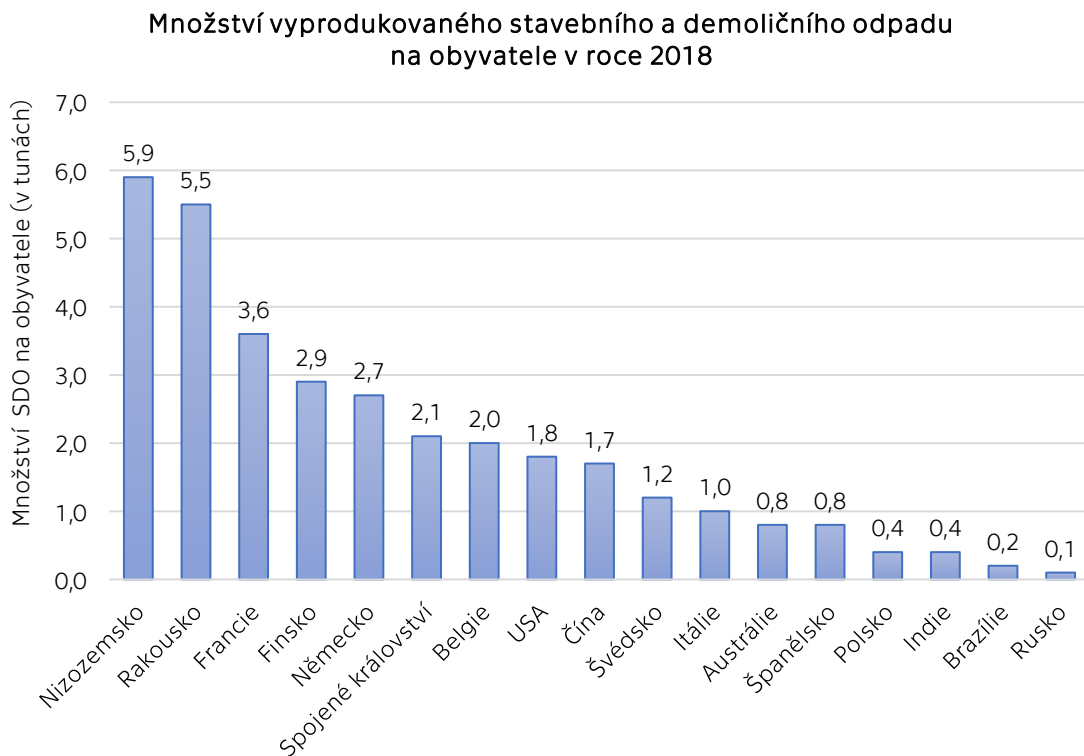
Produkce odpadů se celosvětově zvyšuje každým rokem. V roce 2014 bylo v Evropské unii vyprodukováno 333 milionů tun stavebního a demoličního odpadu. Z toho největšími producenty SDO bylo Německo s 85 miliony tun, Francie s 65 miliony tun a Spojené království s 58 miliony tun. Čína za rok 2014 vyprodukovala 1130 milionů tun stavebního a demoličního odpadu, zatímco ve Spojených státech bylo v roce 2014 vytvořeno 534 milionů tun SDO. [11]

O čtyři roky později, v roce 2018, byla největším producentem stavebního a demoličního odpadu opět Čína (zhruba 2360 milionů tun), následovaly Spojené státy (zhruba 600 milionů tun) a Indie (zhruba 530 milionů tun). V Evropské unii byly hlavními producenty SDO Francie (zhruba 240 milionů tun) a Německo (zhruba 225 milionů tun). [6]

Z těchto údajů je zjevný výrazný nárůst produkce stavebního a demoličního odpadu v celosvětovém měřítku v řádu jednotek let.



Obr. č.2 – Země s největší produkcí stavebního a demoličního odpadu v roce 2018 – převzato z [6].



Obr. č.3 – Množství vyprodukovaného stavebního a demoličního odpadu na obyvatele v roce 2018 – převzato z [6].

Pokud se zaměříme na konkrétní státy, stavební průmysl produkuje v posledních letech asi 44 % z celkového množství odpadu ve Spojeném království, 44 % v Austrálii, 40 % v Brazílii, 29 % ve Spojených státech, 27 % v Kanadě a 25 % v Hong Kongu. Obecně se odhaduje, že stavební a demoliční odpad tvoří více než třetinu veškerého odpadu vyprodukovaného ve světě. [10]

Na skládkách je ukládáno přibližně 35 % z celosvětového stavebního a demoličního odpadu [10], zvyšující se množství SDO a nedostatek prostoru pro skládkování tak může mít za následek prudký nárůst nákladů na likvidaci odpadu [6].

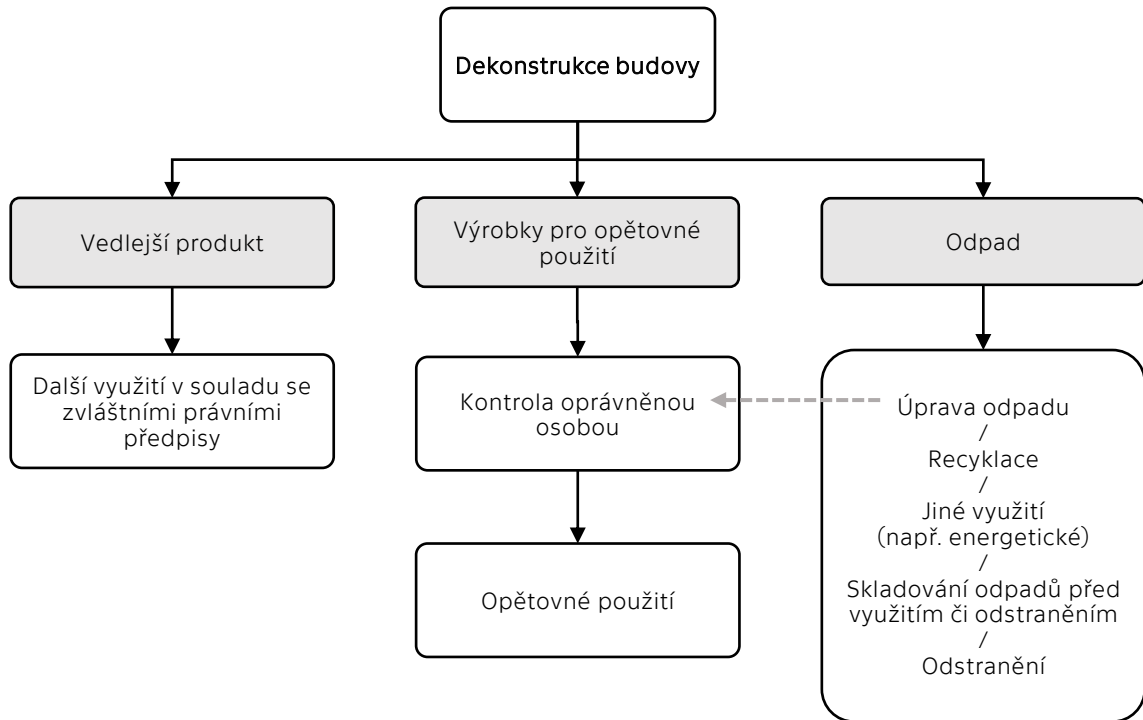
1.1.2. Možnosti nakládání se stavebním a demoličním odpadem

Podle hierarchie nakládání s odpady dle evropských pokynů pro předdemoliční audity [12], by se odpady měly spíše znovu využívat jako celek než zpracovávat. Ve většině případech však není opětovné použití stavebních dílů ani nákladově efektivní, ani technicky proveditelné, možnosti zpracování odpadu jsou pak následující: [13]

- Recyklace, což je způsob využití, při němž se odpad znovu zpracovává na výrobek, materiál nebo látku. Recyklace nezahrnuje energetické využití a zasypávání a přispívá k dosažení souladu se směrnicí EU 2008/98/ES (směrnice o odpadech a o zrušení některých směrnic). [14]
- Zasypávání, což je podle směrnice (EU) 2018/851 [15] jakýkoli způsob využití, při němž se vhodný odpad, který není nebezpečný, používá pro účely rekultivace výkopových prostor nebo pro technické účely při terénních úpravách. Odpady používané k zasypávání musí být vhodné pro výše uvedené účely a musí být omezeny na množství nezbytně nutné k dosažení těchto účelů.
- Energetické využití nebo spalování, při kterém se odpad využívá k výrobě energie. Tato možnost nepřispívá k dosažení souladu se směrnicí EU 2008/98/ES [14] a je použitelný pouze pro vybrané druhy spalitelných SDO (např. využití plastového odpadu v cementářských pecích jako paliva získaného z odpadu nebo využití dřevního odpadu jako biomasy).
- Odstraňování neboli skládkování, s výjimkou některých případů, jako je dočasné skladování odpadů před jejich využitím nebo před jejich přepravou do jiného zařízení k využití. Tato varianta vede k záboru půdy, nesnižuje těžbu přírodních zdrojů a je třeba se jí vyhnout, protože nemá žádnou přidanou hodnotu. Odstraňování není druhem využití odpadu.

Z možných způsobů nakládání s odpadem z SDO přispívá k plnění cíle směrnice EU 2008/98/ES [14] pouze recyklace a zasypávání. [13]

Možnosti nakládání se stavebním a demoličním odpadem zobrazuje následující schéma.



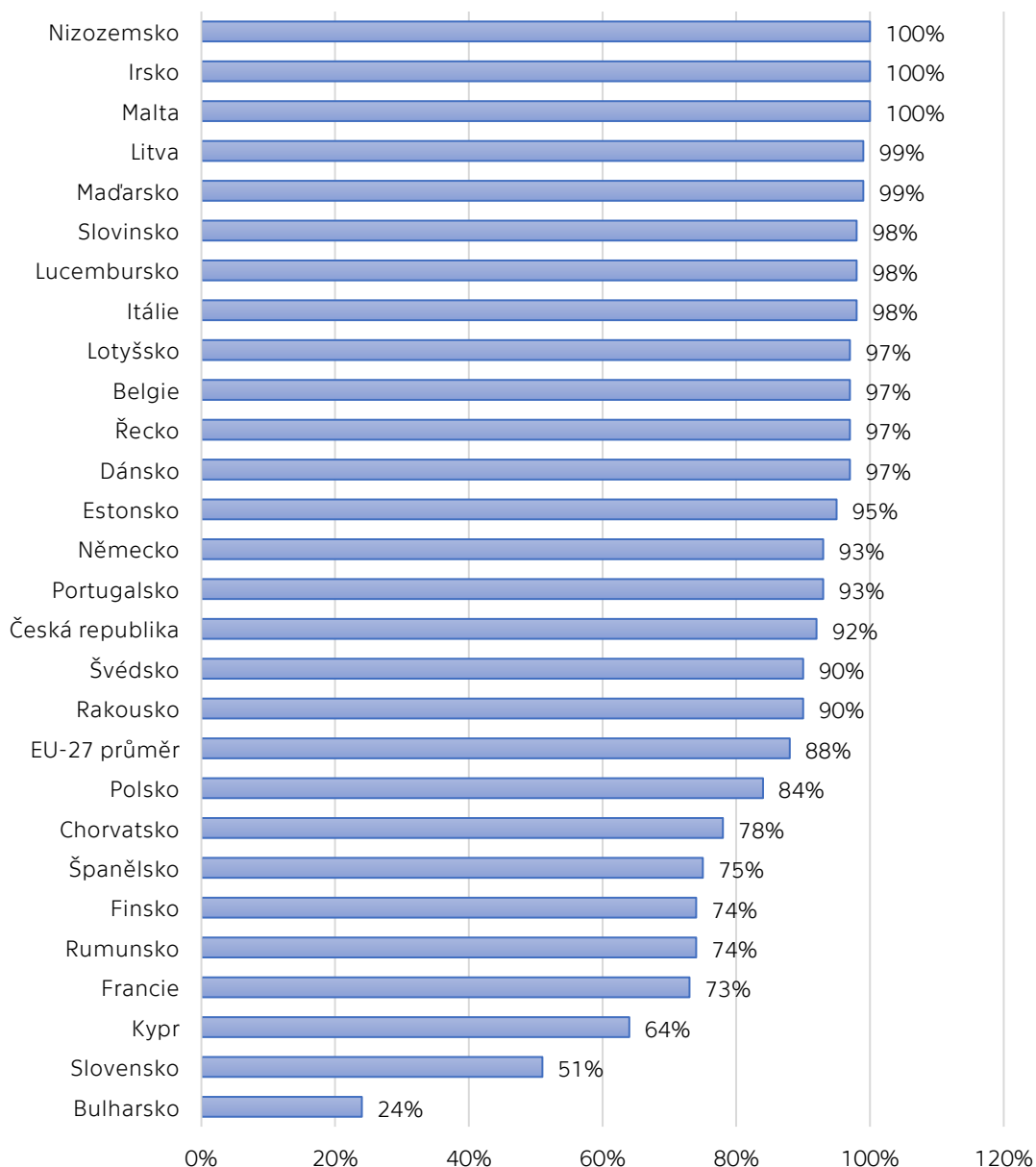
Obr. č.4 – Schéma nakládání se stavebním a demoličním odpadem – převzato z [16].

1.1.3. Vývoj v zemích Evropské unie

Některé složky stavebního a demoličního odpadu jsou velmi dobře recyklovatelné a znovu použitelné, navíc zavedené technologie pro separaci a využití SDO jsou dnes již dostupné a obecně levné. Navzdory svému potenciálu se úroveň recyklace a materiálového využití stavebního a demoličního odpadu v EU značně liší a pohybuje se od necelých 10 % do více než 90 %. Země Evropské unie používají různé definice stavebního a demoličního odpadu, což ztěžuje porovnávání dat mezi jednotlivými členskými státy. [17]

Podle rámcové směrnice o odpadech [18] z roku 2018 byly členské státy povinny do roku 2020 zvýšit míru využití (RR) SDO na 70 % hmotnosti. Výsledky jednotlivých členů EU z roku 2018 jsou vidět v následujícím grafu.

Míra využití stavebního a demoličního odpadu (SDO) v Evropské unii (EU-27) v roce 2018, podle zemí



Obr. č.5 – Míra využití stavebního a demoličního odpadu v EU v roce 2018 – data převzata z [19].

V roce 2018 byla vydána evropská směrnice č. 2018/851/EU [15], která upravuje směrnici 2008/98/ES o odpadech [14]. Cílem nařízení je dosáhnout udržitelného nakládání s odpady a tím zlepšit kvalitu životního prostředí, chránit lidské zdraví, zajistit účinné a racionální využívání přírodních zdrojů, podporovat zásady oběhového hospodářství, zvýšit využívání obnovitelných zdrojů energie, zvýšit energetickou účinnost, snížit závislost Evropské unie na dovážených zdrojích, poskytnout nové hospodářské příležitosti a přispět k dlouhodobé konkurenceschopnosti. [17] Tato směrnice byla dále implementována do dokumentů „Protokol o nakládání se stavebním a demoličním odpadem“ [20] a „Pokyny pro audity před demolicí budov“ [21].

1.1.4. Situace v České republice

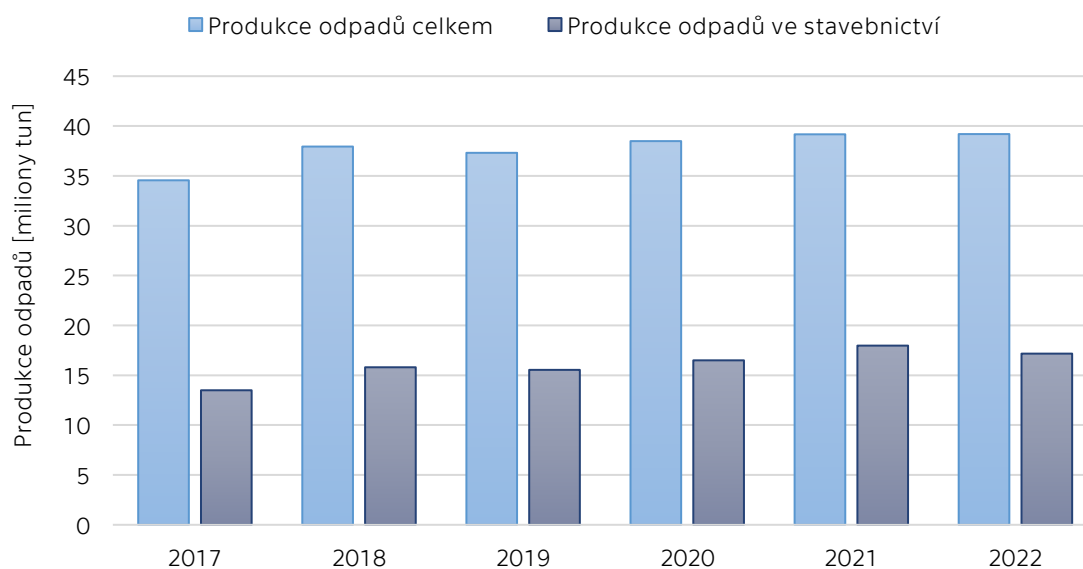
Stavebnictví má největší podíl na produkci odpadu v České republice mezi průmyslovými obory. Dle českého statistického úřadu stavebnictví za rok 2022 vyprodukovalo téměř 44 % z celkového objemu odpadu, to je více než 17 milionů tun. Podíl odpadu ze stavebnictví má rostoucí tendenci, za posledních šest let tvoří nárůst téměř 5 % z celkového objemu odpadu v České republice. [22]

1.1.4.1. Produkce stavebních a demoličních odpadů v České republice

Na Obr. č.6 je znázorněn vývoj produkce odpadů v ČR a podíl odpadů ze stavebnictví dle dat Českého statistického úřadu [22].

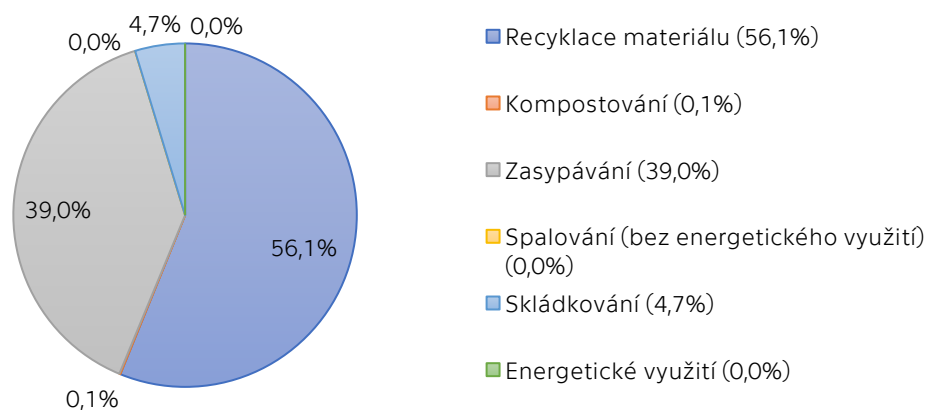
Tab. 1 Vyprodukované množství odpadů ve stavebnictví mezi lety 2017–2022 v České republice [23].

| | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Produkce odpadů celkem [t] | 34 553 461 | 37 940 560 | 37 310 939 | 38 486 186 | 39 168 578 | 39 191 940 |
| Produkce odpadů ve stavebnictví [t] | 13 492 988 | 15 800 053 | 15 539 904 | 16 496 214 | 17 972 321 | 17 169 128 |
| Podíl odpadu ze stavebnictví vůči celkové produkci odpadu | 39 % | 42 % | 42 % | 43 % | 46 % | 44 % |



Obr. č.6 – Graf produkce odpadů ve stavebnictví v ČR (2017–2022) [23].

Výše uvedená data se pojí s produkcí odpadů za sekce dle klasifikace ekonomických činností CZ-NACE [24]. Na webu Českého statistického úřadu lze dohledat též graf nakládání s minerálními odpady v roce 2022 [22], podle kterého recyklace minerálních odpadů převládá nad ostatními způsoby zpracování materiálu.



Obr. č.7 – Graf nakládání s minerálními odpady v ČR (2022) [25].

Český statistický úřad do roku 2021 vydával přehled produkce odpadů dle jednotlivých kódů Katalogu odpadu. Za skupinu 17 (Stavební a demoliční odpady včetně vytěžené zeminy z kontaminovaných míst) se v roce 2021 jednalo o 25,5 milionů tun [26] viz Tab. 2.

Tab. 2 – Množství odpadu skupiny 17 dle Katalogu odpadů za rok 2021 [26].

| Skupina | Název odpadu | Množství odpadu 2021 (v tunách) |
|----------|---|---------------------------------|
| 17 | STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPADY (VČETNĚ VYTĚŽENÉ ZEMINY Z KONTAMINOVANÝCH MÍST) | 25 567 486 |
| 17 01 | Beton, cihly, tašky a keramika | 4 942 983 |
| 17 01 01 | Beton | 1 882 065 |
| 17 01 02 | Cihly | 718 284 |
| 17 01 03 | Tašky a keramické výrobky | 16 061 |
| 17 01 06 | Směsi nebo oddělené frakce betonu, cihel, tašek a keramických výrobků obsahující nebezpečné látky | 31 019 |
| 17 01 07 | Směsi nebo oddělené frakce betonu, cihel, tašek a keramických výrobků neuvedené pod číslem 17 01 06 | 2 295 553 |
| 17 02 | Dřevo, sklo a plast | 86 056 |
| 17 03 | Asfaltové směsi, dehet a výrobky z dehtu | 786 300 |
| 17 04 | Kovy (včetně jejich slitin) | 2 737 135 |
| 17 05 | Zemina (včetně vytěžené zeminy z kontaminovaných míst), kamení, vytěžená jalová hornina a hlušina | 16 204 680 |
| 17 06 | Izolační materiály a stavební materiály s obsahem azbestu | 99 647 |
| 17 08 | Stavební materiály na bázi sádry | 10 832 |
| 17 09 | Jiné stavební a demoliční odpady | 699 852 |

Strategie České republiky v oblasti odpadového a oběhového hospodářství je promítnuta do dokumentu „Plán odpadového hospodářství (POH) České republiky na období 2015–2024“ [27] (POH). Tento plán představuje dlouhodobou vizi a koncepci odpadového hospodářství

České republiky s výhledem do roku 2035. Mezi jeho hlavní priority patří kvalitní recyklace a maximální využití vhodných odpadů. Jedná se zejména o materiálové, energetické a biologické odpady svázané s průmyslovými segmenty v regionech jako je zemědělství, energetika a stavebnictví. [27] V roce 2020 Ministerstvo životního prostředí přistoupilo k zahájení aktualizace POH České republiky v souvislosti s novým Akčním plánem Evropské unie pro oběhové hospodářství („EU action plan for the Circular Economy“) [28].

1.1.4.2. Legislativa v České republice

V roce 2021 byl přijat nový zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech [29], jehož účelem je zajistit vysokou úroveň ochrany životního prostředí a lidského zdraví a trvale udržitelné využívání přírodních zdrojů. V lednu roku 2021 pak Ministerstvo životního prostředí stanovilo vyhláškou č.8/2021 Sb. Katalog odpadů [30].

Požadavky na recyklaci stavebních materiálů jsou zakotveny i v nařízení Evropského parlamentu a Rady 305/2011 [31], kterým se stanoví harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na trh. Dle tohoto nařízení musí být stavba navržena, provedena a zbourána takovým způsobem, aby bylo zajištěno udržitelné využití přírodních zdrojů a zejména opětovné využití nebo recyklovatelnost staveb, použitých materiálů a částí po zbourání. Zároveň má být kladen důraz na životnost staveb a použití surovin a druhotných materiálů šetrných k životnímu prostředí (příloha I – Základní požadavky na stavby, bod 7 – Udržitelné využívání přírodních zdrojů).

Nakládání s materiálem získaným při demolici řeší vyhláška č. 273/2021 Sb. [32]. V té je uvedeno, že při odstraňování stavby, provádění stavby nebo údržbě stavby se mají odděleně soustřeďovat:

- vybourané stavební materiály a výrobky, které je možné opětovně použít, nebo stavební a demoliční odpady, které je možné recyklovat
- vybourané stavební materiály, které mohou být dále využity v režimu vedlejšího produktu
- stavební a demoliční odpady, které obsahují nebezpečné složky.

Dle uvedené vyhlášky je možné recyklovat neznečištěné vybourané stavební materiály a výrobky, které lze opětovně použít jako je beton a betonové konstrukce, cihly a zdící prvky, střešní tašky, keramické obkladové prvky a sanitární keramika, asphaltové směsi, zemina a kamení, štěrk ze železničního svršku, směsi betonu, cihel, tašek a keramických výrobků. Tyto materiály nesmí obsahovat nebezpečné látky. Mezi vybourané stavební materiály, které jsou vedlejším produktem, se řadí zemina a kamení a znovuzískané asphaltové směsi.

V § 83 vyhlášky č. 273/2021 Sb. je uvedeno, že od 31. prosince 2024 přestává být recyklát z SDO odpadem, pokud jde o inertní minerální materiálový výstup recyklace, při které dochází ke změně zrnitosti a roztřídění na velikostní frakce a současně splňuje následující požadavky:

- a) je vyroben výhradně z odpadu, který je minerálním inertním materiálem, katalogových čísel 17 01 01, 17 01 02, 17 01 03, 17 01 07, 17 05 04 nebo 17 05 08 pocházejícího z dřívější stavební konstrukce,
- b) je určen k využití některým z následujících způsobů, pro který splňuje požadavky jiných právních předpisů:

- recyklované kamenivo jako náhrada přírodního kameniva pro použití stanovená v technických normách,
- konstrukční nestmelené a prolévané vrstvy pozemních komunikací nižších tříd, místních komunikací, parkovišť a chodníků, letištních nebo obdobných dopravních ploch,
- ochranná vrstva pozemní komunikace či letištní nebo obdobné dopravní plochy,
- nestmelená konstrukční vrstva polních a lesních cest,
- obsypy inženýrských sítí a zásypy výkopů a rýh pro inženýrské sítě,
- nestmelené a prolévané konstrukční vrstvy stavby železničních tratí,
- nestmelené a prolévané vrstvy účelových komunikací a ploch na staveništích,
- podkladní konstrukční nestmelené a prolévané vrstvy pro vyrovnání terénu pro následné pozemní a inženýrské stavby a pod základové desky při stavbě nižších budov; pokud nedojde k následnému vybudování pozemní nebo inženýrské stavby nebo základové desky a budovy, musí být recyklované kamenivo z místa použití odebráno.

Z těchto skutečností je patrné, že i do české legislativy se propisuje tendence nahlížet na stavební a demoliční odpad jako na potenciální druhotnou surovinu. Nicméně využívání recyklovaných stavebních materiálů je v současné době stále omezeno. Nelze využít tradiční postupy při uvádění výrobků na trh, možnost je uvést recykláty jako nestanovené výrobky, kterým stačí splnit požadavky zákona o obecné bezpečnosti výrobků, č.102/2001 Sb. [33]. Výrobce poté musí dodat příslušnou průvodní dokumentaci, v praxi se nejčastěji jedná o Prohlášení výrobce o shodě. [34] V případě, kdy vlastnosti stanoveného stavebního výrobku nejsou pokryty určenými normami, nebo pokud normy, nebo technické předpisy, nekonkretizují základní požadavky s ohledem na použití výrobků ve stavbě, může být využito stavební technické osvědčení, které vydá autorizovaná osoba. [35]

1.2. Recyklace stavebního odpadu

Produkce hodnotných jedno-druhových recyklátů z SDO je možná pouze z kvalitně vytříděného materiálu. Pokud je tento materiál znečištěn (např. příměsemi jako jsou plasty, dřevo a podobně), značně se zvyšují náklady na výrobu recyklátu. [34]

Recyklována může být široká škála materiálů, další kapitoly budou zaměřeny pouze na recyklaci stavebního a demoličního odpadu pro výrobu recyklovaného kameniva, které lze využít jako plnivo do betonu.



Obr. č.8 – Skládka stavebního odpadu [36].

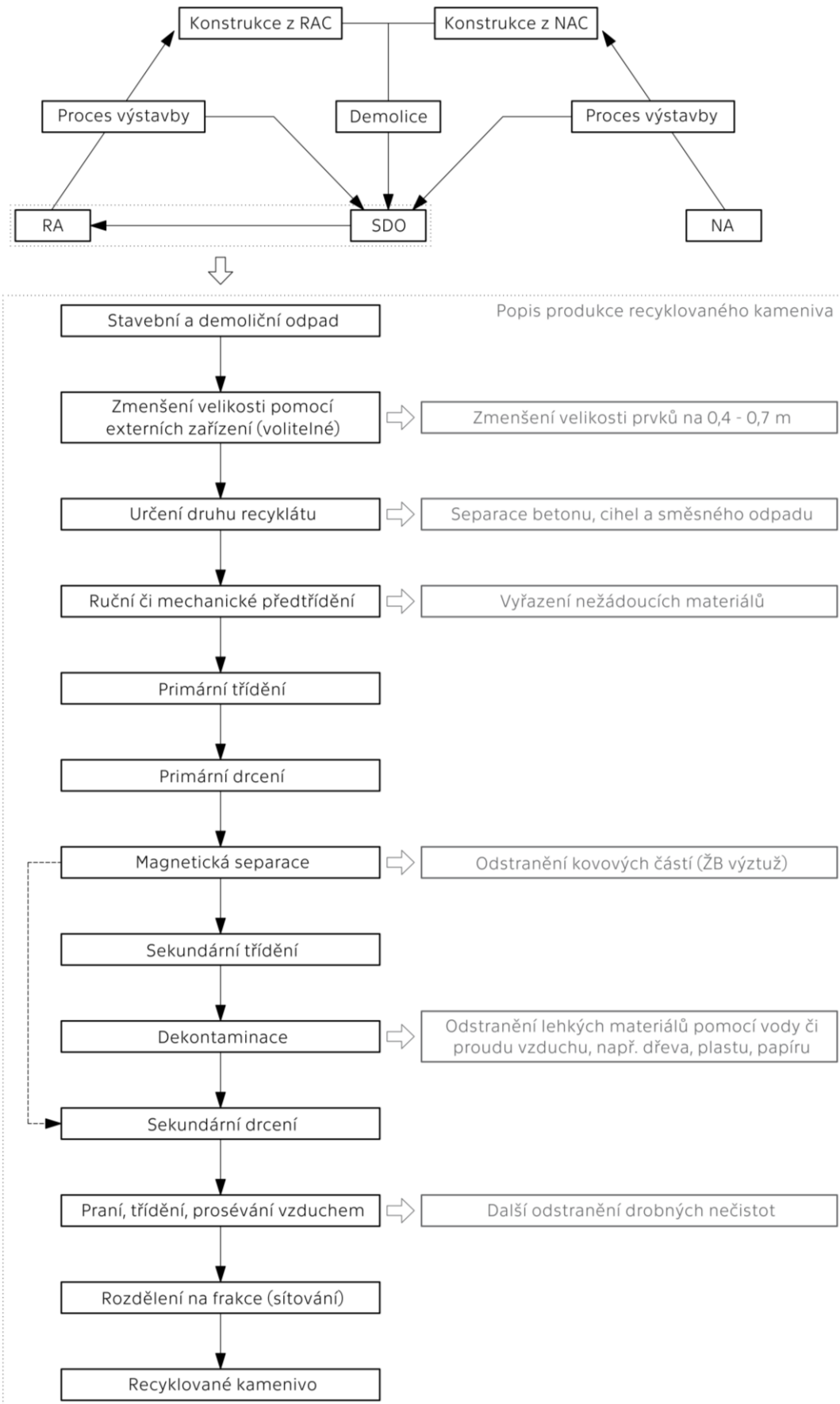
1.2.1. Produkce recyklovaného kameniva z SDO

Proces výroby recyklovaného kameniva (RA) se v posledních deseti letech příliš nezměnil, přestože recyklační zařízení pro stavební a demoliční odpad byla modernizována. Existují především dva typy recyklačních zařízení – stacionární a mobilní. U stacionárních je třeba stavební a demoliční odpad dopravit ze staveniště ke stacionární lince, což klade nároky na transport SDO a logistiku. Výhoda stacionárních zařízení je v tom, že mají vyšší manipulační kapacitu a produkují RA v lepší kvalitě než mobilní recyklační linky. Mobilní zařízení naproti tomu může zpracovávat SDO přímo na místě demolice, materiál lze poté použít pro novou výstavbu v téže lokalitě bez nutnosti další přepravy. [6]

Proces produkce recyklovaného kameniva [6], [37]

- 1) Plánování demoličních prací
- 2) Vlastní demolice
 - a. Separace nebezpečných a nerecyklovatelných odpadů
 - b. Separace jednotlivých složek
- 3) Manipulace se separovaným stavebním a demoličním odpadem
 - a. Převoz do recyklačního střediska nebo k recyklační lince
 - b. Skladování a manipulace před recyklací
- 4) Vlastní proces recyklace
 - a. Zmenšení velikosti (není nutné): redukce velkých kusů odpadu pomocí hydraulického drtiče nebo pneumatického kladiva
 - b. Před-třídění: odstranění velkých kusů oceli, dřeva, plastů nebo papíru pro vyšší účinnost procesu
 - c. Primární třídění: odstranění malých částic (např. ze zeminy a sádry)
 - d. Primární drcení a magnetická separace: zmenšení velikosti RA a odstranění zbývajících kovových prvků
 - e. Sekundární prosévání (např. 10 mm síto): další odstraňování zeminy, sádry nebo prachu
 - f. Dekontaminace: odstranění všech lehkých součástí, jako je dřevo, plasty nebo papír, mytím nebo proséváním vzduchem
 - g. Konečné drcení pro zmenšení velikosti úlomků
 - h. Mytí, prosévání a prosévání vzduchem k odstranění zbývajících kontaminantů, např. plastů, papíru a dřeva
 - i. Rozdělení kameniva do různých velikostních frakcí
- 5) Manipulace s recyklovaným kamenivem
- 6) Ověření jakosti – provedení zkoušek
- 7) Použití jako druhotné suroviny

Na Obr. č.9 jsou tyto procesy zobrazeny ve vývojovém diagramu.



Obr. č.9 – Vývojový diagram recyklace stavebního a demoličního odpadu – převzato z [6].

1.2.2. Problémy a rizika při recyklaci stavebního a demoličního odpadu

Ze stavebních a demoličních odpadů jsou pro recyklaci nejvhodnější beton a zdicí materiály. Níže jsou vypsaná možná rizika při zpracování těchto odpadů a též možnosti jejich opětovného využití jako druhotných surovin.

1.2.2.1. Recyklovaný beton a železobeton

Tab. 3 – Rizika spojená s recyklací železobetonu – převzato z [16].

| Specifikace | Rizika spojená s přeměnou na druhotné suroviny | Možné způsoby využití |
|---------------------------|---|---|
| Betony z podlah a základů | Mohou obsahovat vysoké podíly jílových složek. V případě chemických provozů mohou obsahovat stopy chemických látek používaných v příslušném průmyslu. | Násypy, podsypy, zásypy |
| | | Podkladní vrstva pro základovou desku |
| | | Betony nižších tříd |
| Konstrukční betony | Nedostatečné oddělení výztuže. Riziko kontaminace úkapy ropných látek. | Kamenivo a filer do betonů, malt a cementových potěrů |
| | | Prefabrikované betonové tvárnice |



Obr. č.10 – Betonový recyklát [38].

1.2.2.2. Recyklované zdivo

Tab. 4 – Rizika spojená s recyklací zdiva – převzato z [16].

| Specifikace | Rizika spojená s přeměnou na druhotné suroviny | Možné způsoby využití |
|-------------------------------|--|---------------------------------------|
| Cihla plná pálená – celá | Nepodaří se oddělit cihlu vcelku. Nedostatečné očištění od malty. | Znovuvyužití jako zdicího prvku |
| | | Dlažební prvek |
| Cihla plná pálená a keramické | Může obsahovat stopy malty a omítky – ovlivňuje vlastnosti. | Kamenivo do betonu |
| | | Násypy, podsypy, zásypy |
| | | Podkladní vrstva pro základovou desku |

| | | |
|--|--|---|
| tvárnice – cihelný recyklát | | Betonová tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem |
| Cihla plná pálená – cihelný prach | Může obsahovat stopy malty a omítky – ovlivňuje vlastnosti. | Antuka |
| | | Plnivo do betonu Částečná náhrada cementu v betonu – mikromletí |
| Plynosilikátové tvárnice | Může obsahovat stopy lepidel a omítek. Kontaminace nebezpečnými látkami. | Plnivo do betonu |
| | | Násypy, podsypy, zásypy |
| Odpad z cihlářské výroby a keramických tašek | Mohou obsahovat nežádoucí látky a materiály, které se do recyklátu dostanou nesprávným způsobem zpracování. | Antuka |



Obr. č.11 – Cihelný recyklát [39].

1.2.3. Recyklační stroje

Jak bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, stavební a demoliční odpad se zpracovává v mobilních nebo stacionárních recyklačních linkách.

1.2.3.1. Mobilní recyklační linky

Mobilní recyklační linky lze využívat buď v areálu recyklačního střediska, na skládkách stavebního odpadu či přímo v místě demolice. Lze tak optimalizovat vzdálenosti pro přepravu materiálů a snížit tím náklady výstavby. Pomocí mobilních linek se v České republice zpracuje zhruba 35 % z celkového recyklovaného SDO [40].



Obr. č.12 – Mobilní recyklační linka [41].

Kompaktní mobilní zařízení na recyklaci stavebních odpadů se skládá z drticí jednotky, třídící jednotky s podávacím a dopravním systémem a dalších pomocných zařízení. Rozdíl oproti stacionární recyklační lince spočívá v tom, že hlavní zařízení mobilní linky je instalováno na pásovém nebo kolovém podvozku. [42] Vyhovuje předpisům pro silniční dopravu a lze jej přemísťovat po veřejných komunikacích. [41] Mobilní drticí jednotka má zpravidla vysoký podvozek vozidla a malý poloměr otáčení, což usnadňuje manipulaci a prostorové uspořádání takového zařízení. [42]

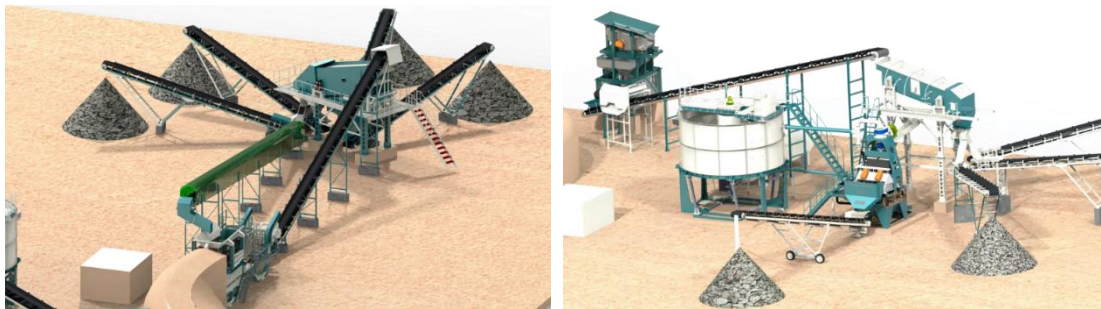


Obr. č.13 – Mobilní recyklační linka [36].

Mobilní zařízení na recyklaci stavebních a demoličních odpadů je zpravidla vybaveno systémem regulace prašnosti, který snižuje znečištění ovzduší během celého procesu. Podle různých účelů drcení a třídění se konstrukce těchto zařízení může lišit. [42]

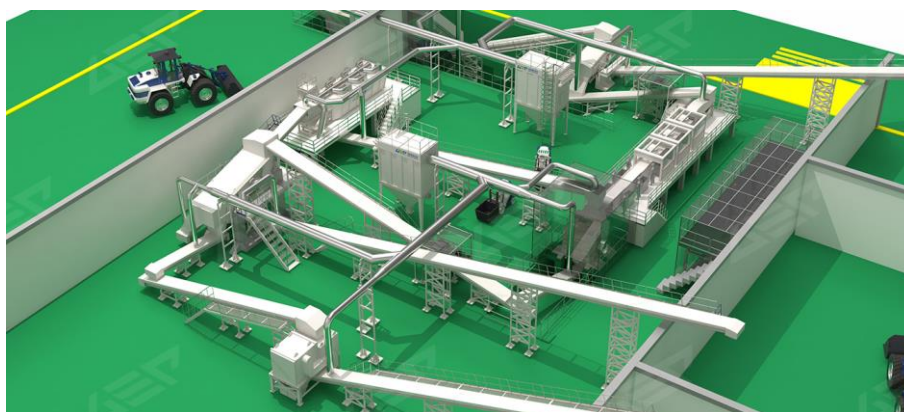
1.2.3.2. Stacionární recyklační linky

Stacionární recyklační linky se vyznačují složitější technologií a vyšší kvalitou produkovaného materiálu. Skládají se z čelistového primárního drtiče, který má za úkol rozdrtit největší kusy stavebního a demoličního odpadu. Následuje magnetický separátor kovů, který odlučuje především zbylou ocelovou výztuž. Dalším prvkem je vibrační drtič, který zbaví materiál příměsí zeminy, sutě, popřípadě dalších nečistot. Materiál poté projde sekundárním drtičem a znovu přes magnetický odlučovač kovů. Pokud je požadováno odstranit i malé prachové částice a nežádoucí příměsí, použije se ještě vodní separátor. Takový recyklát je pak pásem dopraven k vibračnímu třídíči, kde se granulát rozdělí dle frakcí. [40]



Obr. č.14 – Vlevo: stacionární recyklační linka [43]; vpravo: stacionární recyklační linka [43].

Jedná se o řešení pro centralizované zpracování odpadu, které má vysokou výrobní kapacitu a výkonnost. Systém může zahrnovat též balení a lisování či jiné speciální moduly. [41]



Obr. č.15 – Stacionární recyklační linka [41].

Největší závod na zpracování odpadů SDO na světě se nachází ve Velde Pukk v norském Stavangeru, vedle závodu na zpracování přírodního písku a kameniva. Zařízení pracuje rychlostí až 300 tun za hodinu, ročně přemění více než 20 milionů tun stavebního, demoličního a výkopového odpadu na druhotné suroviny pro stavební výrobu. [44]

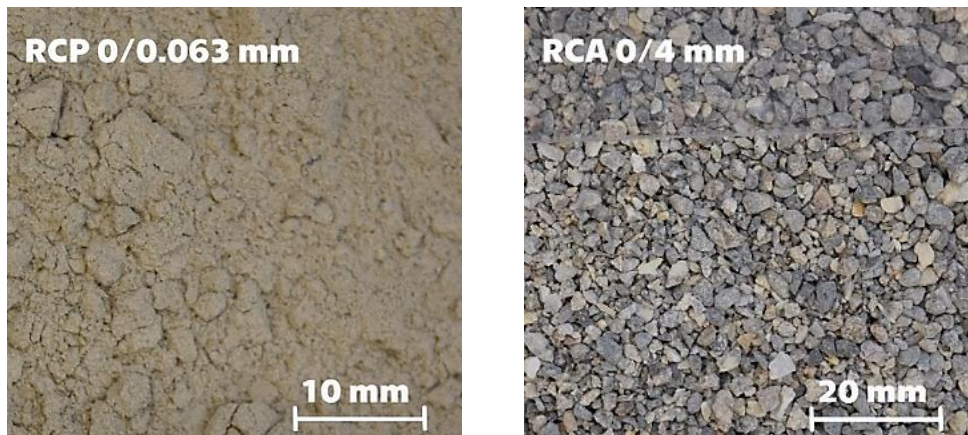


Obr. č.16 – Závod na zpracování odpadů Velde Pukk [45].

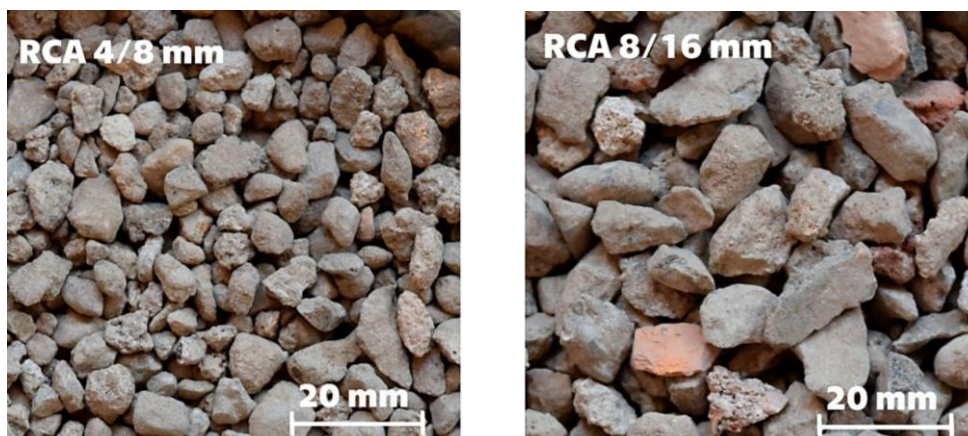
V České republice se nachází přes sto recyklačních středisek, kam je možno stavební a demoliční odpad dovážet. [46] Dle odborníků z praxe je na našem území vhodné využívat

recyklační střediska v maximální vzdálenosti 30 kilometrů (výjimečně 50 kilometrů) od místa demolice, aby měl takový proces ekonomický i ekologický smysl.

1.2.4. Ukázky materiálů z recyklačního procesu



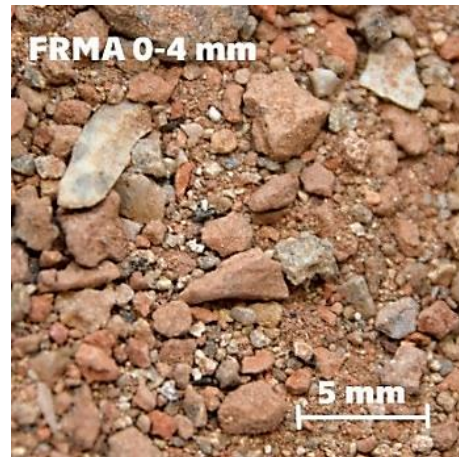
Obr. č.17 – Vlevo: ultra jemné recyklované betonové částice, velikost částic pod 0,063 mm [47];
vpravo: jemné recyklované kamenivo do betonu, velikosti částic mezi 0 a 4 mm [47].



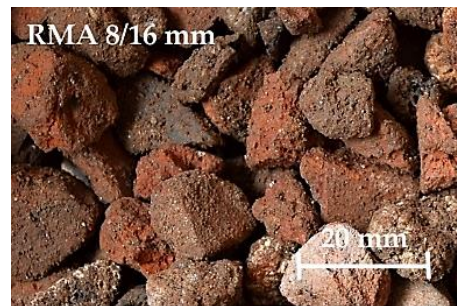
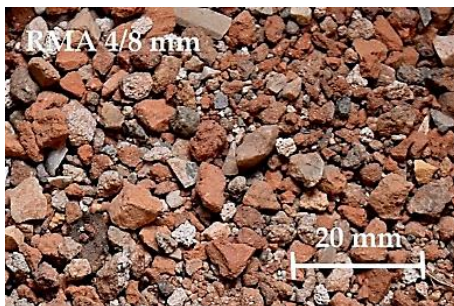
Obr. č.18 – Vlevo: betonový recyklát frakce 4/8 mm [47];
vpravo: betonový recyklát frakce 8/16 mm [47].



Obr. č.19 – Vlevo: betonový recyklát frakce 32/63 mm [48];
vpravo: betonový recyklát frakce 0/63 mm [49].



Obr. č.20 – Vlevo: ultra jemné recyklované keramické částice, velikost částic pod 0,063 mm [50];
vpravo: jemné recyklované keramické kamenivo, velikost zrn mezi 0 a 4 mm [47].



Obr. č.21 – Vlevo: recyklované cihelné kamenivo frakce 4/8 mm [47];
vpravo: recyklované cihelné kamenivo frakce 8/16 mm [47].



Obr. č.22 – Vlevo: recyklované cihelné kamenivo 32/63 mm [51];
vpravo: směsný recyklát 0/63 mm [52].

1.3. Beton s recyklovaným kamenivem

Beton je nejrozšířenější stavební materiál, na trhu se stavebními materiály dominuje od 20. století. Výroba betonu, respektive jeho zásadní složky cementu, však vytváří značné emise CO₂ – na 1 tunu cementu připadá 1 až 1,2 tuny CO₂. Celkem jeho produkce tvoří přibližně 8 % celkových globálních emisí oxidu uhličitého. Světová produkce cementu se navíc za poslední dvě desetiletí ztrojnásobila z 1,1 miliard tun na 3,27 miliard tun, přičemž s rostoucí výstavbou by v roce 2030 mohla produkce cementu dosáhnout až 4,83 miliard tun.

Emise CO₂ z výroby cementu však nejsou jediným negativním dopadem na životní prostředí. S produkcí cementu je svázán i nárůst výroby betonu, přičemž některé jeho další složky se potýkají s výrazným úbytkem přírodních zdrojů. Největší problém se bude týkat zásob kameniva, které jako plnivo tvoří 60–75 % celkového objemu betonu. Ve světě je spotřeba kameniva přibližně 48,3 miliard tun ročně a každý pětiletý růst je odhadován na více než 5 %. Předpokládá se, že poptávka po přírodně těženém kamenivu se v příštích dvou až třech desetiletích zdvojnásobí při současném nárůstu jeho spotřeby. [6]

Využití recyklovaného kameniva (RA) může být přínosem pro životní prostředí a ekonomiku. Odhadem by dlouhodobé náklady na výrobu jedné tuny hrubého recyklovaného kameniva do betonu mohly být přibližně o 10–40 % nižší než náklady na hrubé přírodní kamenivo. [53] Výroba recyklovaného kameniva se může pojit s nižšími emisemi z dopravy a nižší spotřebou energie, zejména tam, kde jsou recyklované materiály znovu použity v těsné blízkosti místa přepracování. Spotřeba energie a výsledné emise skleníkových plynů z recyklace kameniva byly zkoumány v zemích po celém světě, objem emisí vycházel v průměru o 22 % až 46 % nižší oproti těžbě přírodního kameniva z lomu. [54]

1.3.1. Historie betonu s recyklovaným kamenivem

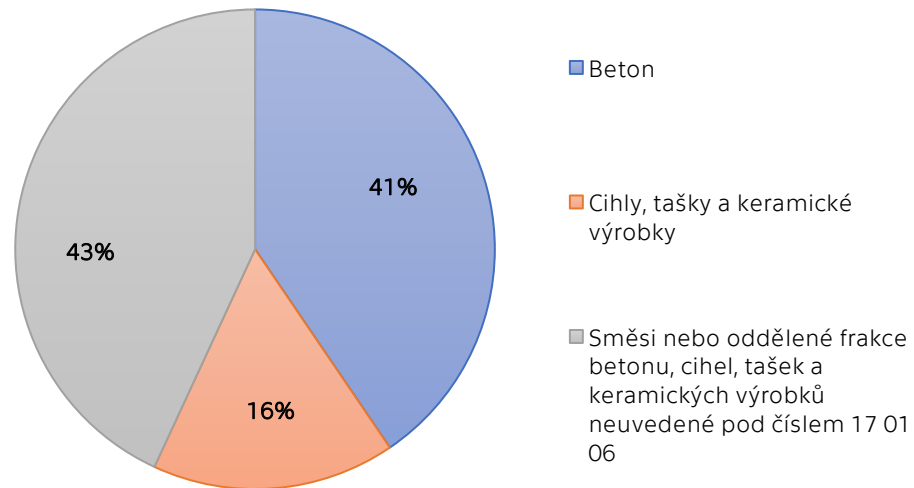
Poprvé bylo recyklované kamenivo využito do nového betonu během druhé světové války a po jejím skončení, jelikož bombardování měst, zejména ve Spojeném království a Německu, zapříčinilo vznik velkého množství sutí a troskek. Již v té době se zjistilo, že beton s recyklovaným kamenivem (RAC) má vyšší absorpci vody, nižší pevnost v tlaku a horší odolnost proti rozmrazování. Za posledních dvacet let se počet publikací o RAC exponenciálně zvýšil, což zvýšilo povědomí a znalosti o tomto materiálu. Zlepšily se také pevnostní modely pro predikci vlastností betonu s recyklovaným kamenivem. [6]

1.3.2. Motivace pro používání betonu s recyklovaným kamenivem v České republice

Z aktuálních analýz situace v České republice lze vyvodit, že úspora přírodního kameniva by mohla být až 30 % v případě spolupráce všech zakomponovaných stran. Průměrný objem výroby betonu v České republice je aktuálně 10 milionů m³, což vyžaduje zhruba 17 milionů tun kameniva do betonu. Ze stavebního a demoličního odpadu by se dalo zpracovat a vyprodukovat až 4,85 milionů tun (průměr za období 2017–2021) recyklovaného kameniva ročně. Údaje vychází z průzkumu statistik produkce stavebních odpadů mezi lety 2017 a 2021. V reálných měřítkách by z produkce betonových a cihelných odpadů mohlo být využito 30 % až 50 % [55] na výrobu betonů – tedy hmotnostně 1,5 až 2,5 milionu tun za rok, což by snížilo požadavky na plnivo z přírodních nerostných surovin zhruba o 9–14%. Procentuální zastoupení nejvýznamnějších stavebních a demoličních odpadů pro výrobu recyklovaného kameniva do betonu je vidět v následujícím grafu. [56]

Odpady vhodné pro výrobu recyklovaného kameniva do betonu (skupina 17 01)

Průměr za období 2017-2021

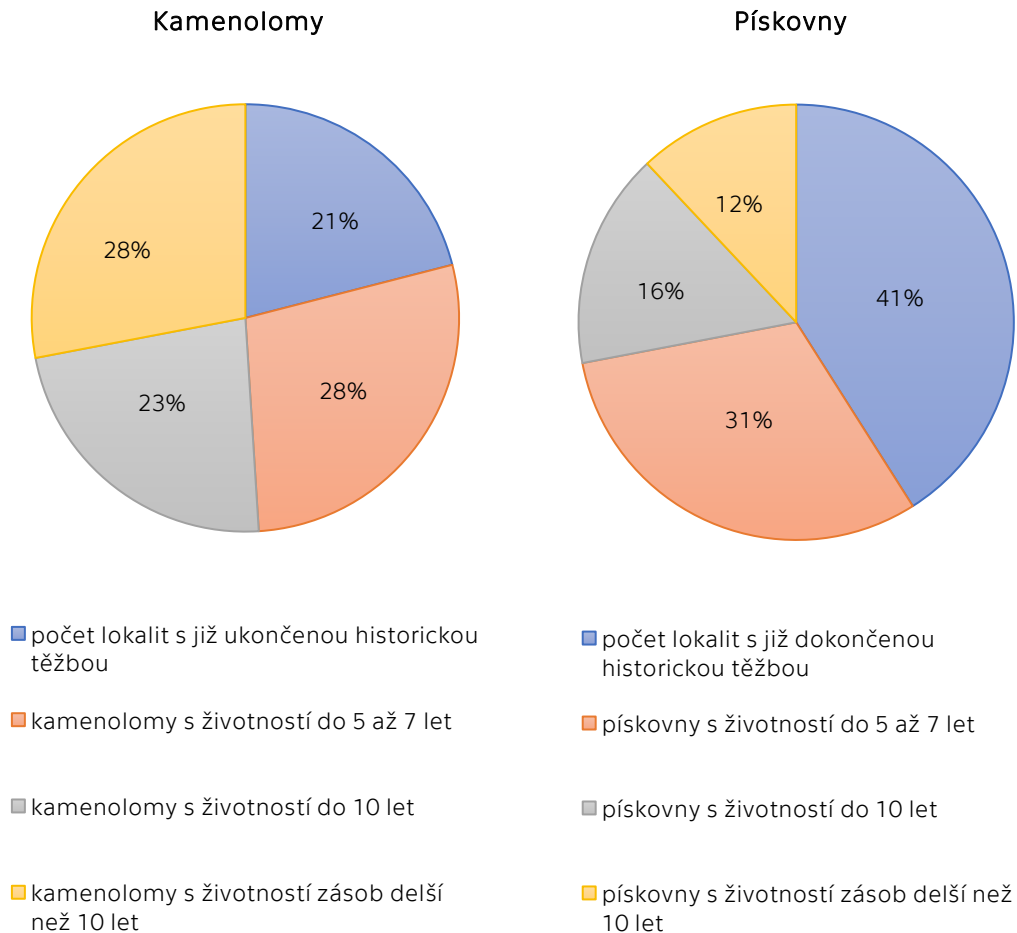


Obr. č.23 – Stavební a demoliční odpady vhodné pro výrobu recyklovaného kameniva do betonu – převzato z [26].

1.3.2.1. Uzavírání kamenolomů

Uzavírání kamenolomů a pískoven je v České republice v současné době velmi diskutované téma. Zásob kameniva na ložiskách povolených k těžbě jednoznačně ubývá a velká část z nich se dokonce blíží ke svému dotěžení. [57] Především pro stavebnictví se jedná o významný problém, kamenolomy a pískovny jsou základním zdrojem surovin pro výrobu stavebních materiálů jako je beton, potřebné jsou i pro spodní vrstvy dopravních staveb. Nedostatek této suroviny spolu se zvýšením úhrad za vytěžené nerosty (Vládní ozdravný balíček 2024/2025 Česko ve formě – navýšení úhrady za dobývání nerostů) [58] bude mít dopad do cen materiálu a posléze do výsledné ceny staveb. [59]

Od roku 1991 nebyl v České republice otevřen žádný nový kamenolom ani pískovna, do deseti let lze očekávat uzavření více než poloviny ložisek přírodního kamene. Podle České geologické služby do začátku následujícího desetiletí skončí kvůli dotěžení osm z deseti aktivních pískoven. Vyhledky na zlepšení situace nejsou příliš optimistické vzhledem k náročnosti otevření nového ložiska či prodloužení nebo rozšíření těžby ložiska stávajícího. [57] Tato řízení mají komplikovaný a zdoluhavý průběh, v některých případech trvají více než deset let. I kvůli tomu se nedaří nahrazovat kapacity uzavíraných ložisek. [60]



Obr. č.24 – Vlevo: současný stav provozu kamenolomů v ČR – převzato z [56];
vpravo: současný stav provozu pískoven v ČR – převzato z [56].

V současné době je v České republice k dispozici řádově okolo 90 milionů tun kamene pro stavební účely ročně. Potřeba pro výrobu betonu je z tohoto množství přibližně 20 % těžného a drceného kameniva dle ČSN EN 12620. [61]

Již dnes české stavební společnosti využívají dodávky této suroviny ze zahraničí, v případě zhoršení situace by se muselo na dovoz ze zahraničí spoléhat čím dál více firem, což by mělo dopady jak ekonomické, tak ekologické. Dlouhé přepravní vzdálenosti jsou způsobeny i neefektivním rozmístěním aktivních kamenolomů v České republice, které nepokrývá potřeby výstavby ve všech oblastech. [57]

1.3.2.2. Regulace skládek odpadů v České republice

V lednu roku 2021 vešel v účinnost zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech [29], který stanovuje základ poplatku za uložení využitelného odpadu na skládku do roku 2030. [29] Základ poplatku se mezi lety 2021 a 2030 má více než zdvojnásobit. Od roku 2030 bude též zakázáno ukládat na skládku odpady, které je za stávajícího stavu vědeckého a technického pokroku možné účelně recyklovat, řadí se mezi ně i materiály využitelné pro výrobu recyklovaného kameniva do betonu. [62]

1.4. Porovnání možností využívání recyklovaného kameniva do betonu v České republice a ostatních zemích z hlediska legislativy

1.4.1. Legislativa v České republice

1.4.1.1. Vývoj norem

Pojem recyklované kamenivo byl využit již v prvním vydání ČSN EN 206–1 (Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda) z roku 2001 [63]. Zde je pojem „kamenivo“ definován jako anorganický materiál vhodný do betonu, který může být přírodní, umělý nebo recyklovaný z materiálu, který byl dříve použitý v konstrukci.

Zmíněnou normu nahradila v roce 2014 norma ČSN EN 206 [64]. Zde se uvádí, že recyklované kamenivo je kamenivo získané při úpravě anorganického materiálu dříve použitého v konstrukci. Tato norma byla zrušena v roce 2017 a nahradila ji norma ČSN EN 206+A1 [65]. Nejnovější verze této normy je z roku 2021 s označením ČSN EN 206+A2 [66].

Harmonizovaná norma ČSN EN 206+A2 (73 2403) [66] je používána pro betonové konstrukce betonované na staveništi, montované konstrukce a pro prefabrikované konstrukční dílce pozemních a inženýrských staveb. Uvádí druhy konstrukčních betonů a specifikuje požadavky pro složky betonu, vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu a jejich ověřování, mezní hodnoty složení betonu, specifikaci betonu, dodávání čerstvého betonu, postupy řízení výroby, kritéria shody a hodnocení shody.

Dle ČSN EN 206+A2 se uvádění a dodávání výrobků na trh řídí legislativou jednotlivých členských států Evropské unie. V České republice se jedná o Nařízení vlády č. 312/2005 Sb. [67] a Nařízení vlády č. 215/2016 Sb. [68]. [69]

Technické požadavky na přírodní recyklované kamenivo stanovuje harmonizovaná evropská norma ČSN EN 12620+A1 – Kamenivo do betonu [70]. Tato norma určuje vlastnosti kameniva a fileru jako kameniva, získaného úpravou přírodního, umělého nebo recyklovaného materiálu a směsi těchto kameniv pro použití do betonu. Zahrnuje kameniva, která mají objemovou hmotnost zrn vysušených v sušárně větší než $2\,000\text{ kg/m}^3$ a také recyklované kamenivo s objemovou hmotností zrn od $1\,500\text{ kg/m}^3$ do $2\,000\text{ kg/m}^3$ s příslušným upozorněním a recyklované drobné kamenivo (4 mm) s příslušným upozorněním. [70]

1.4.1.2. Podmínky pro použití recyklovaného kameniva do betonu

Aplikace betonu s recyklovaným kamenivem je omezená z důvodu nejednotných vlastností odvozených od původu recyklovaného kameniva. Kvalita recyklovaného kameniva se může lišit jak napříč recyklačními středisky, tak v rámci jednoho recyklačního střediska. Proto je nutné dbát zvýšených požadavků na tento materiál, testovat jeho vlastnosti a dodržovat technologické postupy při samotné recyklaci. Posléze pak přizpůsobit návrh betonové směsi pro jednotlivé zdroje recyklátu. [71]

Pro použití recyklovaného kameniva do betonu je nutné splnit podmínky normy ČSN EN 12620+A1 [70]. Především se jedná o řadu zkoušek pro stanovení fyzikálních a chemických vlastností, vyžadováno je též stanovení poměru složek materiálů v hrubém recyklovaném kamenivu dle článku 5.8. Vzhledem k tomu, že se jedná o odpad, je třeba dále provést rozbory dle vyhlášky Ministerstva životního prostředí č. 273/2021 Sb. o podrobnostech

nakládání s odpady [32]. Výsledky musí splňovat hodnoty dle tabulek 5.1 (nejvýše přípustné koncentrace škodlivin v sušině odpadů) a tabulky 5.3 (limitní hodnoty ekotoxikologických testů). Tyto úkony je třeba provést při každé změně zdroje recyklovaného kameniva, tzn. každé další stavby nebo objektu. Recyklované kamenivo je možné začít používat až po vydání prohlášení o vlastnostech, kterému musí předcházet provedení všech zkoušek a rozborů uvedených výše. [69]

1.4.1.3. Dělení betonu s recyklovaným kamenivem dle české legislativy

Níže je popsáno dělení betonu s recyklovaným kamenivem dle české legislativy. Norma ČSN EN 206+A2 [66] stanovuje v informativní příloze E mezní hodnoty obsahu recyklovaného kameniva pro beton dle stupně vlivu prostředí, a to v závislosti na zdroji recyklovaného kameniva.

Tabulka E.2 uvádí meze při nahrazování přírodního hutného hrubého kameniva hrubým recyklovaným kamenivem, tj. s velikostí zrna větší než 4 mm.

Tab. 5 – Tabulka E.2 z ČSN EN 206+A2– Maximální procento nahrazení hrubého kameniva (% hmotnosti) – převzato z [66].

| Druh recyklovaného kameniva | Stupně vlivu prostředí | | | |
|--|------------------------|----------|-------------------------|-------------------------------------|
| | X0 | XC1, XC2 | XC3, XC4, XF1, XA1, XD1 | Všechny ostatní stupně ^a |
| Typ A: (R_{C90} , R_{CU95} , R_{b10} , R_{a1} , FL_2 , XR_{g1}) | 50 % | 30 % | 30 % | 0 % |
| Typ B ^b : (R_{C50} , R_{CU70} , R_{b30} , R_{a5} , FL_2 , XR_{g2}) | 50 % | 20 % | 0 % | 0 % |
| ^a Recyklované kamenivo druhu A ze známého zdroje se může použít pro stupně prostředí, pro které byl navržen původní beton, s maximálně 30 %-ním nahrazením. | | | | |
| ^b Recyklované kamenivo druhu B se nepoužívá do betonu třídy pevnosti v tlaku > C30/37 | | | | |

Jednotlivé zkratky pro typ betonu jsou vysvětleny v Tab. 6, dle normy EN 933–11. [72]

Tab. 6 - Význam zkratk – Složky hrubého recyklovaného kameniva podle EN 933–11 [72].

| Složka | Popis |
|--------|--|
| Rc | Beton, betonové výrobky, malta Betonové zdící prvky |
| Ru | Nestmelené kamenivo, přírodní kámen Směsi kameniva stmelené hydraulickými pojivy |
| Rb | Pálené zdící prvky (tj. cihly a dlaždice) Vápenopískové zdící prvky Provzdušněný neplovoucí beton |
| Ra | Asfaltové materiály |
| Rg | Sklo |
| X | Jiné složky: Soudržné (např. jíla a zemina) Různé: kovy (železné a neželezné) Neplovoucí dřevo, plasty a guma Sádrová omítka |
| FL | Plovoucí materiál podle objemu |

Pokud se kamenivo skládá z betonu či malty, jde o složku s označením Rc. Jedná-li se o směs kameniva stmelého či nestmelého hydraulickými pojivy, jedná se o složku s označením Ru. Norma ČSN EN 206+A2 odráží skutečnost, že tyto dvě složky spolu budou často koexistovat, proto uvádí společnou složku Rcu (tzv. betonový recyklát). Pokud se složka skládá z pálených či vápenopískových zdicích prvků, jde o složku s označením Rb (tzv. cihelný recyklát). [73]

Norma ČSN EN 206+A2 doporučuje v příloze E max. 50 % náhradu objemu hrubého kameniva v betonu za recyklovaného kamenivo, a to pouze pro stupeň vlivu prostřední X0. Tento limit platí pro recyklované kamenivo typu A i B. Pro stupeň vlivu prostředí XC1 a XC2 je možné nahradit pouze 30 % hrubé frakce kameniva za recyklát pro typ A a 20 % hrubé frakce kameniva pro typ B. Pro prostředí XC3, XC4, XF1, XA1 a XD1 je možné použít pouze typ A, maximální náhrada přírodního kameniva recyklátem je zde 30 %. Pro všechny ostatní stupně vlivu prostředí není doporučeno použití recyklovaného kameniva. [66]

Recyklované kamenivo typu A obsahuje minimálně 90 % betonového recyklátu či 95 % směsi Rcu a maximálně 10 % cihelné složky. Typ B obsahuje minimálně 50 % betonového recyklátu či 70 % směsi Rcu a maximálně 30 % cihelného recyklátu.

Dále z této normy vyplývá, že recyklované kamenivo typu B se nepoužívá do betonu třídy betonu vyšší než C30/37. [66]

Norma ČSN EN 206+A2 uvádí doporučení pro hrubé recyklované kamenivo v tabulce E.3.

Tab. 7 – Tabulka E.3 z ČSN EN 206+A2 – Doporučení pro hrubé recyklované kamenivo dle ČSN EN 12620 – převzato z [66].

| Vlastnost ^a | Článek V EN 12620:2002 + A1:2008 | Druh | Kategorie podle EN 12620 |
|---|-------------------------------------|------|--|
| Obsah jemných částic | 4.6 | A+B | Kategorie nebo deklarovaná hodnota |
| Index plochosti | 4.4 | A+B | $\leq Fl_{50}$ nebo $\leq Sl_{55}$ |
| Odolnost proti drcení | 5.2 | A+B | $\leq LA_{50}$ nebo $\leq SZ_{32}$ |
| Objemová hmotnost vysušených zrn ρ_{rd} | 5.5 | A | $\geq 2100 \text{ kg/m}^3$ |
| | | B | $\geq 1700 \text{ kg/m}^3$ |
| Nasákavost zrn | 5.5 | A+B | Hodnota musí být určena |
| Složky ^b | 5.8 | A | $RC_{90}, RCU_{95}, Rb_{10}, Ra_{1}, FL_{2}, XRG_{1-}$ |
| | | B | $RC_{50}, RCU_{70}, Rb_{30}, Ra_{5}, FL_{2}, XRG_{2-}$ |
| Sírany rozpustné ve vodě | 6.3.3 | A+B | $\leq SS_{0,2}$ |
| Obsah ve vodě rozpustných chloridových iontů | 6.2 | A+B | Hodnota musí být určena |
| Vliv na začátek tuhnutí | 6.4.1 | A+B | $\leq A_{40}$ |
| ^a Kategorie NR (bez požadavků) se může použít pro jiné vlastnosti, neuvedené v této tabulce. Pro ně může být kategorie NR deklarována dle EN 12620 ^b Pro speciální aplikace vyžadující vysokou kvalitu povrchů, by měla být složka FL omezena na $FL_{0,2-}$ | | | |

Obdobné dělení a požadavky na recyklované kamenivo platí dle informativní přílohy N normy ČSN P 73 2404. V tomto případě se kamenivo dělí na Typ 1 a Typ 2 dle tabulky N.1. U Typu 1 musí být použito minimálně 90 % betonové složky a maximálně 10 % cihelné složky. Typ 2 musí obsahovat minimálně 70 % betonové složky a maximálně 30 % cihelné složky. Typ 2 lze ovšem použít pouze pro výrobu betonů pevnostních tříd C8/10 a nižších, pro praxi je tudíž možnost jeho využití minimální.

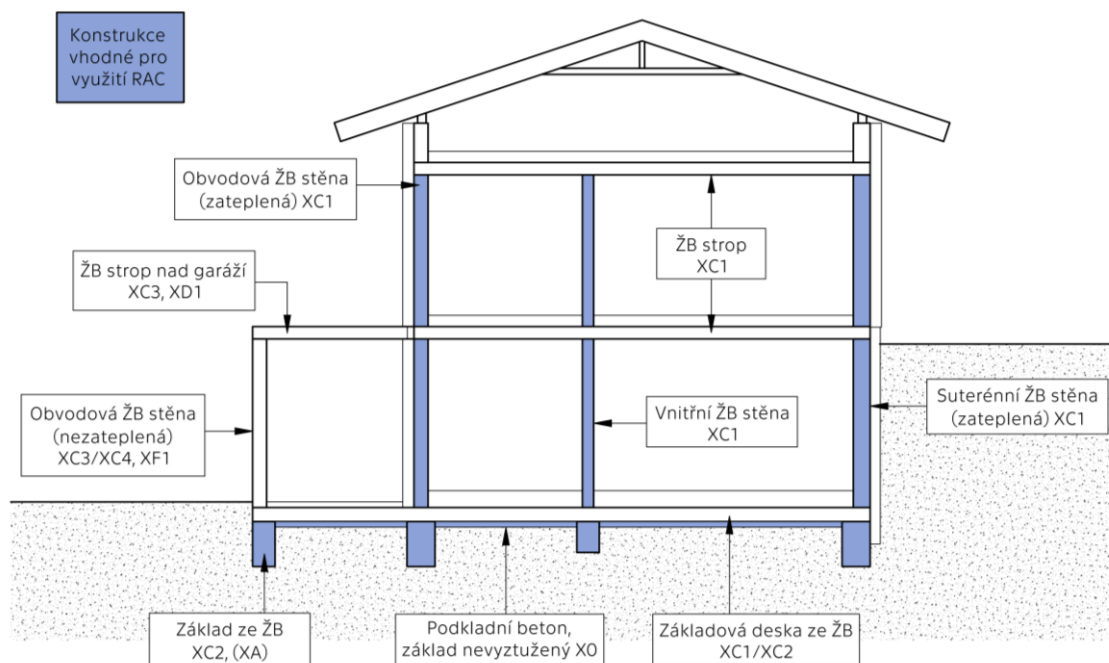
Tab. 8 – Tabulka N.1 – Přípustný obsah hmot v jednotlivých typech recyklátu [74, s. 24].

| Druh hmoty | Obsah hmot v hmotnostních procentech v jednotlivých typech recyklátu | |
|--|---|---|
| | Typ 1 drť nebo písek vyrobený drcením pouze betonu (betonová drť) | Typ 2 drť nebo písek vyrobený drcením stavební sutě |
| Beton a kamenivo podle ČSN EN 12620 | ≥90 | ≥70 |
| Slinutá keramika, nikoliv porézni cihelný střep | ≤10 | ≤30 |
| Vápencový pískovec | ≤10 | ≤30 |
| Ostatní minerální podíly ^{a)} | ≤2 | ≤3 |
| Asfalt | ≤1 | ≤1 |
| Ostatní příměsi ^{b)} | ≤0,2 | ≤0,5 |
| ^{a)} Ostatní minerální podíly jsou například: porézni cihelný střep, lehký beton, pórobeton, mezerovitý beton, štuk, malta, porézni struska nebo škvára, pemza. ^{b)} Ostatní příměsi jsou například: sklo, keramika, struska z neželezných kovů, štuková sádra, guma, plasty, kovy, dřevo, rostlinné zbytky, papír. | | |

Dle této normy nelze recyklované kamenivo použít pro stupeň vlivu prostředí XF2, XF4 a XD1–3. Nehodí se též pro předpjaté betonové konstrukce, pro konstrukce s vysokými požadavky na odolnost betonu proti průsaku tlakovou vodou a pro pohledový beton. [74, s. 24]

ČSN P 73 2404 nadále definuje obsah jemných částic v recyklovaném kamenivu, jehož hodnota musí být menší než 15 %. Obsah humusu se v recyklátu může objevit maximálně v 1 %. [69]

Z obou norem vyplývá, že betonový recyklát má vyšší potenciál využití než směsný a přístup k němu je v těchto normách benevolentnější. Betonový recyklát je obecně kvalitnější, zároveň však hůře dostupný a dražší. [56]



Obr. č.25 – Konstrukce vhodné pro využití betonu s recyklovaným kamenivem (vlastní tvorba).

1.4.2. Situace ve světě

V této kapitole jsou analyzovány podmínky pro použití recyklovaného kameniva do betonu v různých státech, přičemž autorka vycházela z vědeckých článků a předpisů vydaných mezi lety 2018–2023 [13], [50], [54], [75], [76] vzhledem k omezené možnosti nahlížet do zahraničních technických norem.

Předpisy pro státy Evropské unie týkající se kvality recyklovaného kameniva zpravidla doplňují normu EN 12620+A1 [77] a předpisy, které definují maximální přípustný poměr zabudování RA do betonu, doplňují normu EN 206+A2 [66]. Tyto předpisy jsou obvykle vydávány na úrovni jednotlivých států, výjimečně se jedná o ustanovení s regionální platností.

Obecně pro předpisy platí, že na základě složení recyklovaného kameniva a stupně vlivu prostředí je definován maximální přípustný poměr zapracování RA a maximální pevnostní třída betonu. Poté se k ověření předpokládané třídy použijí další vlastnosti recyklovaného kameniva. Tab. 9 uvádí přehled doporučeného procenta nahrazení přírodního kameniva v betonu, podrobnější specifikace byly pro přehlednost vynechány a lze je dohledat v uvedených publikacích, případně v technických normách jednotlivých států.

Tab. 9 – Normy zahrnující použití betonu s recyklovaným kamenivem v různých státech.

| Země | Norma/nařízení | Velikost zrn | Typ RA | Maximální poměr náhrady NA recykláty a další omezení |
|--------|---------------------------|---------------|-------------------------|--|
| Belgie | NBN B 15–001:2022 [78] | hrubé | obsah Rc+Ru \geq 80 % | železobeton: 30 % (\leq C30/37) prostý beton: 50 % |
| | PTV 406–2003 [79] | hrubé | obsah Rc+Ru \geq 70 % | max.100 % (\leq C16/20) |
| Dánsko | DS/EN 206 DK NA:2023 [80] | hrubé a jemné | obsah Rc+Ru \geq 80 % | drobné kamenivo: 30 % (\leq C30/37) hrubé kamenivo: 100 % (\leq C40/50) |

| | | | | |
|-------------|---|---------------|-------------------------|---|
| | | | obsah Rc+Ru \geq 80 % | drobné kamenivo: až 20 % (\leq C20/25) hrubé kamenivo: až 100 % (\leq C20/25) |
| Francie | NF EN 206+A2/CN [81] | hrubé | obsah Rc+Ru \geq 95 % | 30 % |
| | | hrubé | obsah Rc+Ru \geq 80 % | 15 % (\leq C25/30) |
| | | hrubé | obsah Rc+Ru \geq 70 % | 5 % (\leq C25/30) |
| | | jemné | obsah Rc+Ru \geq 80 % | 5 % (\leq C25/30) |
| Německo | DIN 1045-2:2023-08 [82] DIN 4226-101:2017-08 [83] DIN 4226-102:2017-08 [84] | hrubé | obsah Rc+Ru \geq 95 % | 45 % celkového kameniva (jemné + hrubé) (pro třídy s nízkým vlivem karbonátace) |
| | | | | 35 % celkového množství kameniva (jemné + hrubé) pro prostředí s vlivem chloridů není povoleno pro prostředí s chemickou agresivitou |
| | | | obsah Rc+Ru \geq 80 % | 35 % celkového kameniva (jemné + hrubé) (pro třídy s nízkým vlivem karbonátace) |
| | | | | 25 % celkového množství kameniva (jemné + hrubé) pro prostředí s vlivem chloridů není povoleno pro prostředí s chemickou agresivitou |
| Itálie | NTC:2018 [85] | hrubé | obsah Rc+Ru \geq 95 % | 60 % (\leq C20/25) |
| | | hrubé | obsah Rc+Ru \geq 95 % | 30 % (\leq C30/37) |
| | | hrubé | obsah Rc+Ru \geq 80 % | 100 % pro nekonstrukční prvky (\leq C12/15) |
| Nizozemí | NEN 8005 [86] | hrubé a jemné | obsah Rc+Ru \geq 80 % | 50 % (\leq C35/45) |
| | | | obsah Rc+Ru \geq 70 % | 20 % (\leq C35/45) |
| Norsko | RESIBA 2002 [87] | jemné + hrubé | obsah Rc+Ru \geq 80 % | 10 % jemné RA a 30 % hrubé RA (\leq C20/25) 20 % hrubé RA (\leq C45/55) |
| | | jemné + hrubé | obsah Rc+Ru \geq 70 % | 5 % jemné RA a 10 % hrubé RA (\leq C20/25) |
| Portugalsko | LNEC E471 [88] | jemné + hrubé | obsah Rc+Ru \geq 95 % | 25 % (\leq C40/50), cihly \leq 10 % |
| | | | obsah Rc+Ru \geq 80 % | 20 % (\leq C40/50), cihly \leq 30 % |
| Španělsko | EHE-08 [89] | hrubé | obsah Rc+Ru \geq 95 % | 20 % (\leq 40/50) |
| Švédsko | SS-EN 206:2013+A2:2021 [90] | hrubé | obsah Rc+Ru \geq 95 % | 50 % (\leq C30/C37) |
| | | | | 30 % (\leq C35/C45) |
| | | | obsah Rc+Ru \geq 70 % | 30 % (do XC4, XS1, XD1, XF1) (\leq C40/C50) |
| | | | | 50 % (\leq C30/C37) |
| | | | | 20 % (\leq C35/C45) |

| | | | | |
|---------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------------|--|
| Velká Británie | BS 8500–2:2015+A2:2019 [91] | jemné + hrubé | Obsah Rc+Ru ≥ 95 % | 20 % (≤C40/45) |
| Čína | (DG/TJ07–008) | hrubé | betonové (>95 % RCA, <5 % cihel) | 100 %, bez limitu |
| | GB/T 25176:2010 [92] | hrubé | betonové vysoké kvality | 30 % (≤C40/50) |
| | GB/T 25177:2010 [93] | hrubé | betonové střední kvality | 30 % (≤C25/30) |
| | GB/T 2573–2008 [94] | jemné | betonové | 100 % (≤C40/50) |
| | | jemné | betonové | 30 % (≤C25/30) |
| | | cihelné | ≤90% betonové, >10% cihelné | |
| Hong Kong | WBTC–12: 2002 [95] | hrubé | betonové | 20 % (≤C25/30 (30/37)) 100 % pro nekonstrukční betony (≤C16/20) |
| Japonsko | JIS A 5021 [96] | jemné, hrubé | betonové vysoké kvality | ≤C45/55 |
| | JIS A 5022 [97] | jemné, hrubé | betonové střední kvality | ≤C35/45 |
| | JIS A 5023 [98] | jemné, hrubé | směsné střední kvality | Nekonstrukční beton, výplňový |
| Austrálie a Oceánie | AS 1141.6.2 [99] | hrubé | betonové | 30 % (≤C40/50) Směs RCA s max. 0,5 % cihelného kameniva |
| | HB 155:2002 [100] | hrubé | betonové | 100 % (≤C25/30) Směs RCA s max. 30 % cihelného kameniva |
| Brazílie | NBR 15.116 [101] | jemné a hrubé | betonové | až 20 % pro nekonstrukční betony |
| | | jemné a hrubé | směsné | |

Z přehledu vyplývá, že většina států doporučuje využívání recyklovaného kameniva jako náhrady hrubé frakce, pokud se připouští i náhrada jemné frakce, je to zpravidla v menším množství. Použití recyklovaného kameniva je značně omezeno stupněm vlivu prostředí, přičemž v případě rizika karbonatce, pronikání chloridů nebo chemické agresivity prostředí je téměř vždy zakázáno recyklované kamenivo používat.

Při porovnání doporučení technických norem a reálného využívání betonu s recyklovaným kamenivem lze říci, že potenciál produkce a využívání RAC není ani zdaleka naplněn ve většině zemí světa. [13]

1.5. Vlastnosti recyklovaného kameniva a RAC

Je prokázáno, že nahrazení přírodního kameniva v betonu za beton recyklovaný má spíše nepříznivý dopad na výsledné vlastnosti betonu. Míra zhoršení fyzikálních a mechanických vlastností je závislá především na množství a kvalitě použitého recyklátu. [102]

V připravované normě prEN 1992–1–1:2023 – Eurokód 2 – Navrhování betonových konstrukcí [103] jsou v informativní příloze N uvedena pravidla pro návrh konstrukcí z betonu s recyklovaným kamenivem. V tabulce N.1 lze najít vzorce pro přepočítání mechanických vlastností betonu s recyklovaným kamenivem, se kterými by se mělo uvažovat při návrhu konstrukcí. Tento přepočítání se provádí na základě procenta nahrazení přírodního kameniva

recyklátem, typy kameniva následují normu EN 206+A2 [104]. Norma uvádí, že při náhradě (α_{RA}) max. 20 % celkového množství kameniva kamenivem typu A dle EN 206+A2 [104] (betonový recyklát), se mechanické vlastnosti železobetonu nemění oproti železobetonu s přírodním kamenivem. V případě kameniva typu B (směsný recyklát) se připouští maximální náhrada 10 %. Při nahrazení 20–40 % přírodního kameniva v železobetonu recyklovaným kamenivem typu A (resp. 10–20 % kamenivem typu B), příloha N doporučuje řídit se tabulkou N.1, případně prokázat vlastnosti betonu zkouškami. Náhrada více než 40 % přírodního kameniva v železobetonu kamenivem typu A (resp. 20 % kamenivem typu B) znamená provést zkoušky takové betonové směsi pro deklarování požadovaných vlastností.

1.5.1. Fyzikální a mechanické vlastnosti RA a RAC

Základními fyzikálními vlastnostmi recyklovaného kameniva jsou objemová hmotnost, nasákavost, zpracovatelnost a další. Tvar zrn recyklovaného kameniva je oproti přírodnímu kamenivu více nepravidelný a hranatý, což je způsobeno drcením již použitých stavebních materiálů. Vzhledem k většímu rozptylu vlastností je pro recyklované kamenivo vyžadováno provádět více zkoušek než pro kamenivo přírodní.

1.5.1.1. Objemová hmotnost

Objemová hmotnost recyklovaného kameniva je nižší oproti přírodnímu kamenivu. Jeden z důvodů je vyšší podíl cementové pasty, která má menší objemovou hmotnost. Větší množství cementu v betonu s recyklovaným kamenivem je zapříčiněno výskytem cementu v recyklátu (především betonovém). Obecně platí, že průměrná objemová hmotnost betonu se sníží přibližně o 5–15 %, pokud se jedná o nahrazení přírodního hrubého kameniva recyklovaným. [6], [56] Dalším faktorem snížení objemové hmotnosti je obsah materiálů jako jsou cihly a keramické výrobky. [6] Nižší objemová hmotnost má pak dopad především na akustické vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem. [56]

1.5.1.2. Propustnost

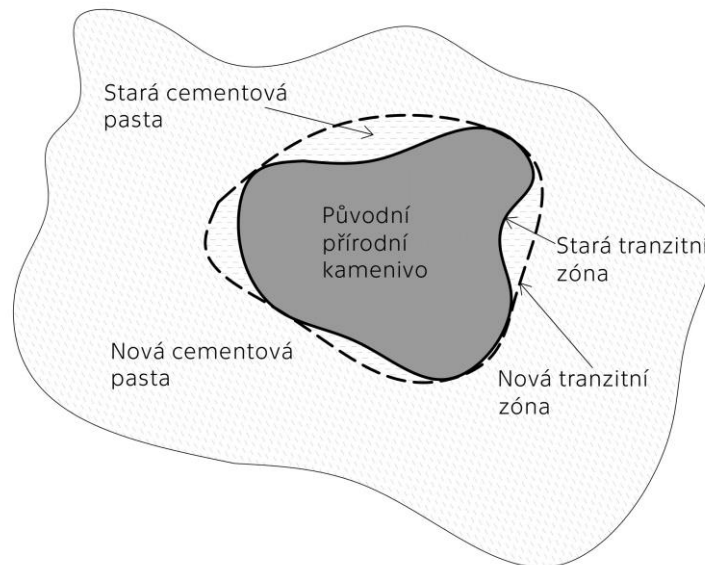
Propustnost souvisí s mikrostrukturou betonu a závisí na porézności, vzájemném propojení pórů, přítomnosti trhlin a obsahu vody v kamenivu. Vzhledem k porézní povaze recyklovaného kameniva je propustnost uváděna vyšší u RAC než u NAC. Obecně se pórovitost RAC zvyšuje se zvyšujícím se poměrem náhrady recyklovaného kameniva. [105] Pórovitost je kritickým faktorem při hodnocení trvanlivosti betonu, vysoká poréznost RAC přímo vede k jeho horší odolnosti. [106]

1.5.1.3. Nasákavost

Jedním z největších problémů recyklovaného kameniva je vedle nesourodosti vyšší nasákavost, což je způsobeno především podílem keramických výrobků a drceného betonu. Nelze navrhnout stejné množství záměsové vody pro jakýkoli recyklát (a to především u drobného recyklovaného kameniva), je třeba vždy individuálně posoudit každou šarži recyklovaného kameniva, aby bylo dosaženo požadované konzistence betonu. Způsobuje to nejistotu při stanovení skutečného vodního součinitele. [107]

Vyšší nasákavost je způsobena značnou pórovitostí recyklovaného kameniva a přítomností další tranzitní zóny v RA. V NAC je pouze jedna tranzitní zóna mezi kamenivem a cementovou pastou, v RAC jsou však přítomny dvě: první je tranzitní zóna mezi přírodním kamenivem a starou cementovou pastou a druhá tranzitní zóna se nachází mezi recyklovaným

kamenivem a novou cementovou pastou. Tranzitní zóna je považována za slabý článek betonu.



Obr. č.26 – Schéma tranzitních zón v betonu s recyklovaným kamenivem (vlastní tvorba).



Obr. č.27 – Stará a nová cementová pasta kolem kameniva (foto autorky).

Vícenásobná recyklace stavebního a demoličního odpadu je také zajímavým výzkumným tématem a přímo souvisí s kvalitou recyklovaného kameniva. S nárůstem počtu recyklačních cyklů se zvyšuje absorpce vody a obsah cementové pasty v kamenivu. [106]

1.5.1.4. Zpracovatelnost

Zpracovatelnost betonu je definována jako vlastnost čerstvě namíchaného betonu nebo malty, která určuje snadnost, s jakou jej lze míchat, umísťovat, zpevňovat a dotvářet do homogenního stavu. Nízká zpracovatelnost obvykle vede k vysoké pórovitosti, protože beton s nízkou zpracovatelností se obtížně zhušťuje. Obvykle lze zpracovatelnost čerstvého betonu určit zkouškou sednutí. Čerstvá směs RAC má zpravidla nižší hodnotu sednutí než odpovídající NAC hlavně kvůli vyšší absorpční kapacitě a ve většině případů hrubším povrchům a nepravidelnějším tvarům RA. Pro dosažení podobné zpracovatelnosti jako u NAC je proto během míchání betonu potřeba přidání vody. Z různých studií lze uvést, že pro míchání RAC bylo zapotřebí o 5 %–15 % vody navíc, aby se dosáhlo stejné zpracovatelnosti jako NAC. [6] Zhoršení konzistence lze také vylepšit přidáním přísad a úpravou technologie. [56]

1.5.1.5. Pevnost

Pevnost betonu s recyklovaným kamenivem je dle mnoha výzkumů nižší než u NAC a pevnost se snižuje s narůstajícím podílem recyklátu ve směsi. Po nahrazení 100 % přírodního kameniva směsným či cihelným recyklátem došlo průměrně až 30–40% snížení pevnosti v tlaku RAC. [62], [106] Tyto důsledky lze kompenzovat složením betonu a technologií výroby. [56] Je též zřejmý vztah mezi čistě cihelným a směsným recyklovaným kamenivem, kdy náhrada pouze cihelným recyklátem vede k výraznějšímu snížení pevnosti betonu v tlaku.

Při 50% náhradě přírodního kameniva recyklovaným byly poklesy pevnosti v tlaku průměrně o 11 % v případě použití betonového recyklátu, až o 22 % v případě směsného recyklátu a nejvýše o 30 % v případě použití cihelného recyklátu. [73] Tyto výsledky jsou uvedeny pro orientační představu poklesu pevností v tlaku, mechanické vlastnosti betonu je však třeba vždy posuzovat pro konkrétní materiálové složení betonu.

1.5.1.6. Modul pružnosti

Modul pružnosti lze při 100% nahrazení přírodního kameniva recyklovaným snížit až o 35–50 %. [56], [73], [106] Tyto hodnoty jsou pouze orientační, liší se na základě druhu použitého kameniva a receptury betonu, nicméně zatím není znám efektivní způsob, jak modul pružnosti vylepšit. [56] V případě nahrazení 50 % hrubého kameniva betonovým recyklátem je pokles poměrně nízký, v rozsahu 5–15 % oproti betonu s přírodním kamenivem. Modul pružnosti je závislý na kvalitě hrubého kameniva, tudíž nejlepších hodnot dosahuje RAC s betonovým recyklátem, následuje beton se směsným recyklátem a nejhorší modul pružnosti má beton s cihelným recyklátem. [73]

1.5.2. Trvanlivost betonu s recyklovaným kamenivem

Vzhledem k tomu, že návrhová životnost a provozuschopnost jsou zásadní pro posouzení projektu, je trvanlivost klíčovým parametrem pro konstrukční aplikace betonu s recyklovaným kamenivem. Trvanlivost RAC lze hodnotit za pomoci různých charakteristik, jako je odolnost proti karbonataci, odolnost proti mrazu a rozmrazování, pronikání chloridových iontů a další. Výzkum a vývoj v této oblasti je velmi důležitý pro plnohodnotné využití betonů s recyklovaným kamenivem v praxi.

1.5.2.1. Vývoj dlouhodobé pevnosti betonu s recyklovaným kamenivem

Pevnost betonu je jednou z jeho nejdůležitějších materiálových charakteristik vzhledem k tomu, že se jedná o konstrukční materiál. V případě běžného betonu pevnost roste s postupující hydratací, standardní pevnostní zkoušky se provádějí po 28 dnech, kdy beton dosahuje zhruba 70 % své pevnosti. Po několika měsících pak hodnoty dosahují přibližně 90% výsledné pevnosti a k ustálení pevnosti dochází zhruba po 10–20 letech.

Z výzkumů vyplývá, že pevnosti RAC v tlaku po 28 dnech jsou až o 40 % menší než u betonu s přírodním kamenivem, velmi záleží na množství a kvalitě použitého recyklovaného kameniva. Nárůst pevnosti v betonu s recyklovaným kamenivem je pak mnohem strmější mezi 28 a 100 dny – přibližně o 60 %, zatímco beton s přírodním kamenivem vykazuje nejvyšší nárůst pevnosti do 28 dnů. [102]

1.5.2.2. Smršťování

Smršťováním betonu vznikají trhliny v jeho struktuře, které ohrožují životnost stavebních konstrukcí. Tyto objemové změny jsou ovlivňovány mnoha faktory jako je složení betonu, vlastnosti cementového tmelu, rozměry a tvar stavební konstrukce. Princip smršťování betonu je stejný pro kompozit s recyklovaným kamenivem i přírodním. Dle zahraničních výzkumů je smršťování betonu s recyklovaným kamenivem vyšší než u betonu s přírodním kamenivem – tento nárůst může dosahovat až 100 %. Je to způsobeno především vyšší nasákavostí recyklovaného kameniva, míra smršťování pak roste se zvyšujícím se poměrem recyklovaného kameniva na úkor přírodního. [102]

1.5.2.3. Dotvarování

Dotvarování znamená trvalé změny objemu betonu, zároveň lze tímto pojmem mínit změny v betonu způsobené jeho dlouhodobým zatížením. To vyvolá v betonu napětí a dojde k deformaci, která narůstá. Po odtížení konstrukce dojde ke snížení napětí a tím i deformace. Oba případy deformací vznikají současně, proto je obtížné je rozlišit a určit jejich velikosti. Z výzkumů vyplynulo, že použití recyklovaného kameniva způsobí zvýšení dotvarování betonu a to o 20–60 %. Je to zapříčiněno především obsahem původního ztvrdlého cementového tmelu v recyklovaném kamenivu. Dotvarování se tudíž zvyšuje s nárůstem obsahu recyklovaného kameniva. [102]

1.5.2.4. Odolnost RAC proti karbonataci

Karbonatace je jednou z významných příčin koroze oceli v železobetonových konstrukcích. Odolnost RAC proti karbonataci závisí na mnoha faktorech jako je poměr náhrady přírodního kameniva recykláty, obsah cementu, kvalita a drcení SDO a vlastnosti betonu, který byl zpracován na recyklované kamenivo. [106]

Karbonace je proces, kdy hydroxid vápenatý (Ca(OH)_2) v betonu reaguje s oxidem uhličitým (CO_2) ve vzduchu za přítomnosti vlhkosti. Tato reakce převádí hydroxid vápenatý na uhličitán vápenatý (CaCO_3) a snižuje hodnotu pH betonu. Obecně může být hodnota pH roztoku pórů nezkarbonatovaného betonu mezi 12,5 a 13,5. Po karbonataci lze hodnotu pH snížit na méně než 9,0. Takto nízká hodnota pH v cementu naruší pasivační vrstvu na povrchu zapuštěné ocelové výztuže a vystaví ocelovou výztuž kyslíku a vodě, což povede ke korozi ocelové výztuže v betonu. [6] Karbonatace má poměrně pomalý postup, řádově desetiny milimetrů za rok. [102]

Hloubka karbonatace se obvykle používá jako parametr k popisu rychlosti pronikání oxidu uhličitého do konstrukce, který závisí na propustnosti a obsahu vlhkosti betonu. Obecně platí, že vyšší pórovitost vede k vyšší propustnosti betonu, protože voda snadněji proniká do betonu kanálky vytvořenými póry. Vzhledem k vyšší pórovitosti RAC, než je pórovitost NAC, je hloubka karbonatace RAC obecně větší a zvyšuje se se zvyšováním náhradového poměru recyklovaného kameniva. [6]

1.5.2.5. Odolnost proti zmrazování a rozmrazování

Mrazuvzdornost je schopnost betonu odolávat v nasyceném stavu opakovanému zmrazování a rozmrazování. Výsledkem těchto procesů je porušení povrchu betonu, dochází k poklesu pevnosti v tlaku a tahu za ohybu nebo snížení modulu pružnosti, mohou též odpadávat kusy materiálu. [102]

Odolnost RAC proti zmrazování a rozmrazování se uvádí nižší než u NAC, přímo souvisí s vlastnostmi původního betonu. RAC s recyklovaným kamenivem vyrobeným ze původního betonu s vysokou mrazuvzdorností vykazoval ve výzkumech odolnost proti zmrazování a rozmrazování téměř stejnou jako NAC. Avšak RAC s recyklovaným kamenivem vyrobeným z původního betonu s nízkou mrazuvzdorností vykazoval špatnou odolnost proti zmrazování a rozmrazování. [106]

1.5.2.6. Alkalicko-křemičitá reakce

Alkalicko-křemičitá reakce vzniká v případě, kdy jsou v betonu přítomny tři reakční složky a to alkálie, voda a amorfni křemík. Alkálie mohou být součástí přidaného cementu, amorfni křemík se nachází v kamenivu z některých lomů. Chemická reakce zapříčiní vnitřní rozpínání betonu a vznik trhlin, to může vést k posunu konstrukčních prvků a degradaci povrchu. Takové následky již není možné opravit.

V případě recyklovaného kameniva často nelze určit složení původního betonu, proto je téměř nemožné stanovit spolehlivou metodu na určení množství alkálií. Preventivním opatřením může být použití cementu s nízkým obsahem alkálií. [102] Recyklované kamenivo složené z betonu s nereaktivním přírodním kamenivem nezpůsobují alkalicko-křemičitou reaktivitu RAC. [108] Naopak vysoce alkalicky reaktivní přírodní agregáty způsobují alkalicko-křemičitou reakci v RAC a rozpínání se zvyšuje se zvýšením náhradového poměru recyklovaného kameniva. Horší trvanlivost RAC je způsobena také přítomností nečistot v recyklovaném kamenivu. [106]

1.5.2.7. Odolnost vůči pronikání chloridů

Vedle karbonatace betonu je pronikání chloridových iontů jednou z hlavních příčin vzniku koroze oceli. Chlorid obvykle narušuje ochrannou vrstvu ocelové výztuže, což vede k tvorbě trhlin a za přítomnosti vlhkosti a kyslíku dojde ke korozi. Stejně jako karbonatace, pronikání chloridových iontů je také silně ovlivněno propustností betonu, protože chloridové ionty jsou obvykle transportovány vodou. Proto je pronikání chloridových iontů u RAC častější než u NAC kvůli vyšší poréznosti RAC. Se zvyšujícím se obsahem hrubého recyklovaného kameniva se pronikání iontů zvyšuje. Při 100 % náhradě přírodního kameniva recykláty může být průnik chloridových iontů až dvojnásobný. [6]

Pronikání chloridů je oproti karbonataci poměrně rychlý proces, řádově se jedná o milimetry za rok. Z důvodu vzniku trhlin dochází též k odlupování krycí vrstvy výztuže. Dále dochází ke změnám soudržnosti betonu s výztuží a zmenšení efektivní plochy výztuže. [102]

1.5.3. Environmentální vyhodnocení betonu s recyklovaným kamenivem

Způsobů, jakými je možné hodnotit environmentální dopady spojené s produkcí a použitím betonu, je mnoho. Jedním z nejčastějších je vyhodnocení životního cyklu materiálu pomocí analýzy LCA (life cycle assessment). Používá se pro jednotlivé prvky i celé konstrukce. Jedná se o srovnávací metodiku, která vyhodnocuje životní cyklus dvou srovnatelných materiálů či prvků tím, že porovnává environmentální dopady spojené s jejich životním cyklem. Do toho spadá výroba materiálu, jeho transport, zabudování na stavbě, užívání při provozu stavby a demolice či demontáž v závěrečné fázi životnosti stavby, případně recyklace materiálů. [109]

Z dat výzkumů v České republice vyplývá, že potřeba energie na produkci recyklovaného kameniva je zhruba poloviční oproti těžbě lomového kameniva, čímž dochází ke značnému

snížení emisí CO₂, zhruba o 60 %. Tyto výsledky nezahrnují dopady dopravy recyklátu do recyklačního střediska, tento transport se počítá do životního cyklu předchozího výrobku (stejně, jako by bylo nutné ho odvézt na skládku). Lze říci, že betony s vyšším náhradovým poměrem recyklovaného kameniva mají nižší environmentální dopady ve všech posuzovaných kategoriích dopadu. [109] Téma LCA analýzy bude podrobněji rozebráno v kapitole 5.

1.6. Výzkum a vývoj RAC v České republice

Tato část je zaměřena na analýzu výzkumu v akademické oblasti a soukromé sféře. Byl proveden průzkum udělených grantů na vysokých školách se stavebním zaměřením a přidružených výzkumných institucích, které se týkají používání recyklátů do betonu. V Tab. 10 jsou uvedeny některé z grantů a projektů, které je možno dohledat ve veřejných databázích.

O tématu betonu s recyklovaným kamenivem vyšlo v České republice již nespočet vědeckých článků, výzkumy jsou zaměřeny na zkoušení různých variant náhrady recyklovaného kameniva v betonu a porovnávání jejich výsledných vlastností. Zatímco v praxi se náhrada přírodního kameniva provádí prozatím především u hrubé frakce, vědecké výzkumy se zaměřují i na možnosti náhrady frakce jemné, případně používání fileru z recyklátů jako příměsi do cementu.

1.6.1. Granty na vysokých školách a výzkumných ústavech

Tab. 10 – Přehled podaných grantů na českých vysokých školách mezi lety 2010–2023.

| Příjemce grantu | Označení | Název projektu | Období |
|-----------------|----------------|--|------------------------------|
| VUT | FAST-S-11-46 | Návrh technologických postupů při recyklaci a následném využití při výstavbě v oblastech brownfieldů. [110] | 01.01.2011 – – 31.12.2011 |
| VUT | FAST-S-12-24 | Využití jemných podílů stavební suti vzniklých při recyklaci k rekultivacím [111] | 01.01.2012 – – 31.12.2012 |
| VUT | FAST-J-14-2363 | Komplexní rekonstrukce panelových domů za využití recyklovaných materiálů a informačního modelu budovy [112] | 01.01.2014 – – 31.12.2014 |
| VUT | TA02010680 | Využití recyklovatelných odpadů pro výrobu prefabrikovaných stavebních dílců [113] | 01.01.2012 – – 31.12.2014 |
| VUT | FAST-J-15-2809 | Využití odpadů z výroby prefabrikovaných betonových dílců jako recyklované kamenivo do betonu [114] | 01.01.2015 – – 31.12.2015 |
| VUT | FAST-J-17-4704 | Studium vlastností a možností využívání betonového recyklátu pro výrobu betonu [115] | 01.03.2017 – – 28.02.2018 |
| VUT | FAST-J-18-5554 | Možnosti využití betonového recyklátu pro opětovné použití ve stavebnictví [116] | 01.03.2018 – – 28.02.2019 |
| VUT | FAST-S-20-6338 | Envi4BIM – Vývoj datové interoperability založené na aktivním BIM přístupu pro analýzu a posuzování environmentálních aspektů recyklovaných betonů [117] | 01.03.2020 – – 28.02.2021 |
| VUT | FAST-J-20-6457 | Vliv náhrady těžného kameniva betonovým recyklátem na vlastnosti betonu [118] | 01.03.2020 – – 28.02.2021 |
| VUT | FAST-J-20-6459 | Vliv vlastností recyklovaných kameniv na životnost a udržitelnost betonových konstrukcí [119] | 01.03.2020 – – 28.02.2021 |

| | | | |
|------|-----------------------------|--|------------------------------|
| VUT | TH04030342 | Recyklované stavební materiály pro stavby dopravní infrastruktury [120] | 01.01.2019 – – 31.12.2021 |
| VUT | 8J20AT013 | Aspekty integrity a trvanlivosti kompozitů s recyklovaným plnivem (InDuRAC) [121] | 01.01.2020 – – 31.12.2021 |
| VUT | FAST-J-21-7288 | Analýza a posuzování environmentálních aspektů recyklovaných betonů metodou LCA a její implementace do digitálního dvojčete budovy na základě aktivního BIM přístupu [122] | 01.03.2021 – – 28.02.2022 |
| VUT | FAST-J-21-7532 | Vliv mnohonásobného zatěžování na vybrané parametry betonu s náhradou přírodního kameniva betonovým recyklátem [123] | 01.03.2021 – – 28.02.2022 |
| VUT | TN01000056/04 | Pokročilé materiály a technologie – ADMATEC [124] | 01.04.2019 – – 31.12.2022 |
| VUT | CK04000162 | Vývoj nízkouhlíkových trvanlivých cementobetonových krytů vozovek [125] | 01.01.2023 – – 31.12.2025 |
| ČVUT | GA22-02702S | Mikrobiologicky indukované srážení kalcitu při recyklaci betonu pro produkci materiálů se zápornou uhlíkovou stopou [126] | 01.01.2022 – – 31.12.2025 |
| ČVUT | SGS23/034/OHK1/1T/11 | Udržitelný vývoj v oblasti betonových konstrukcích [126], [127] | 01.01.2023 – – 31.12.2023 |
| ČVUT | SGS14/122/OHK1/2T/11 | Experimentální metody použitelné pro analýzu materiálů a konstrukcí [128]–[130] | 01.01.2014 – – 31.12.2015 |
| ČVUT | SGS16/201/OHK1/3T/11 | Pokročile od návrhu materiálu ke konstrukci [128], [131]–[133] | 01.01.2016 – – 31.12.2018 |
| ČVUT | SGS19/148/OHK1/3T/11 | Vybraná témata materiálových vlastností z pohledu mechaniky [128], [134]–[136] | 01.01.2019 – – 31.12.2021 |
| ČVUT | GA ČR 17-06771S | Možnosti využití mikromletého recyklovaného betonu jako mikroplniva s pojivovými vlastnostmi [137] | 01.01.2017 – – 31.12.2021 |
| ČVUT | TA04031256 | Rozvoj mechanicky aktivovaných materiálů na bázi recyklovaného betonu pro progresivní stabilizované a za studena recyklované konstrukční vrstvy [138] | 01.07.2014 – – 31.12.2016 |
| ČVUT | SS03010302 | Vývoj efektivních nástrojů pro minimalizaci vzniku stavebního a demoličního odpadu, jeho monitoring a opětovné využití [139] | 01.01.2021 – – 31.12.2023 |
| ČVUT | HORIZON 2020+ č. 101058580 | Automated solutions for whole-life construction and demolition waste management [140] | 01.07.2022 – – 30.06.2026 |
| ČVUT | SGS22/032/OHK1/1T/11 | Akustické vlastnosti stěn z betonu z recyklovaného kameniva [141] | 01.01.2022 – – 31.12.2022 |
| ČVUT | SGS21/096/OHK1/2T/11 | Vliv chemických vlastností na použití odpadních materiálů v betonových aplikacích [136], [141] | 01.01.2021 – – 31.12.2022 |
| ČVUT | SGS13/109/OHK1/2T/11 | Doplňkové konstrukce z přírodních a recyklovaných materiálů pro lehké železobetonové skelety [129], [142] | 01.01.2013 – – 31.12.2014 |
| ČVUT | SGS č. SGS17/123/OHK1/2T/11 | Trvanlivost betonových kompozitů s recyklovanými materiály [132], [133] | 01.01.2017 – – 31.12.2018 |
| ČVUT | GAČR P104-10-1128 | Identifikace materiálových charakteristik cementovláknových kompozit s plným využitím recyklátu [143] | 01.01.2010 – – 31.12.2012 |
| ČVUT | SGS11/103/OHK1/2T/11 | Experimentální ověření lehkého skeletu z vysokohodnotového a recyklovaného betonu | 01.01.2011 – – 31.12.2012 |

| | | | |
|----------------|---------------------------------------|--|------------------------------|
| | | v kombinaci s obvodovými plášti na bázi dřeva [144], [145] | |
| ČVUT | GA ČR 14–17636S | Analýza fyzikálních a chemických charakteristik cementových kompozitů s užitím recyklovaného kameniva a disperzní polymerové výztuže [146] | 01.01.2014 – – 31.12.2016 |
| UCEEB | FV10397 | Recyklovaný environmentální beton pro stavební konstrukce [147] | 01.12.2016 – – 30.11.2020 |
| ČVUT, UCEEB | LTAIN19205 (MSMT– 2066/2020–20) | Návrh a ověření vlastností betonů s recyklovaným pískem ze stavebních a demoličních odpadů [148] | 01.01.2020 – – 31.01.2022 |

Mimo výše zmíněné projekty byl v roce 2018 vytvořen pracovníky kolektivu ČVUT v Praze (UCEEB) „Katalog výrobků a materiálů s obsahem druhotných surovin pro použití ve stavebnictví,“ který je přehledným souhrnem v oblasti nakládání se stavebním a demoličním odpadem. Vydání tohoto katalogu zajistila Česká agentura pro standardizaci, s.r.o., ve spolupráci s Ministerstvem průmyslu a obchodu. V roce 2022 byl poté vydán nový rozšířený katalog pod názvem Katalog výrobků a materiálů s obsahem druhotných surovin z průmyslových provozů a komunálních odpadů pro použití ve stavebnictví. [16] V katalogu jsou uvedeny příklady recyklace různých kategorií výrobků, výrobky s obsahem recyklované složky a podpůrné legislativní dokumenty. Byl též vytvořen doprovodný web www.recyklujmestavby.cz. [149]

1.6.2. Soukromý sektor

O výzkum v soukromém sektoru se zasazují především velké betonářské společnosti a recyklační střediska, v jejichž vlastním zájmu je vyvíjet nové produkty využívající recykláty kvůli očekávaným legislativním úpravám v této oblasti. Na českém trhu je beton z recyklovaného kameniva nabízen několika firmami. S nejodvážnější technologií přišla firma ERC-TECH a.s., která v roce 2019 nechala patentovat cementový kompozit se 100% náhradou přírodního kameniva za recyklát. Z jejího know-how vychází značka RED Beton, tento produkt vyrábí brněnská firma THERMOSERVIS–TRANSPORT s.r.o. a Rebetong od společnosti Skanska Transbeton, s.r.o. Beton s recyklovaným kamenivem dále nabízí například firma TBG Metrostav s.r.o. s produktem R-CRETE® (do 12/2023 ECOCRETE® R), ZAPA beton a.s. s produktem ZAPA NEXT, AZS BETON s.r.o. či slovenská společnost ALAS SLOVAKIA, s.r.o.

1.6.2.1. R–CRETE®

Společnost TBG Metrostav vyvinula produkt s názvem ECOCRETE® R (od 01/2024 změna názvu na R-CRETE®) [150] a uvedla jej na trh v roce 2021. Vyrábí se až se 100 % náhradou přírodního kameniva za recyklované získané zpracováním stavební suti po demolici objektů na konci životnosti. Produkt R-CRETE® obsahuje více recyklovaného kameniva, než doporučuje norma ČSN EN 206+A2, proto byla vytvořena podnikové norma TBG MTS 03/2021–RCA, která vychází z normy pro výrobu betonu. K výrobku firma poskytuje stavebně technické osvědčení č. STO–205/286/2021 a certifikát systému řízení výroby pro všechny betonárny TBG Metrostav s.r.o., kde se beton s recyklátem vyrábí. Jedná se o betonárnu Libeň, Písnice, Radlice a Rohanský ostrov.

Dle TBG Metrostav s.r.o. beton z recyklátu R-CRETE® nalezne uplatnění především u méně zatížených a exponovaných konstrukcí jako jsou například podkladové betony, základové konstrukce (pasy, patky), výplňové konstrukce, vnitřní stěnové konstrukce či dočasné

konstrukce. Naopak tento beton není vhodné v současné době využít na vodorovné ohýbané konstrukce (stropní deska nebo průvlak), základové desky a stěny pro konstrukce bílých van, silně zatížené sloupy a pilíře, konstrukce vystavené agresivnímu prostředí.

Vlastnosti betonu R-CRETE® přímo závisí na kvalitě a podílu recyklovaného kameniva v betonu. K dispozici jsou dvě varianty betonu R-CRETE® – varianta s 50 % podílem recyklovaného kameniva a se 100 % podílem recyklovaného kameniva. V první variantě je nahrazena pouze hrubá frakce kameniva recyklovaným, a to až do 50 % podílu z celkového obsahu kameniva. Při 100% nahrazení přírodního kameniva recyklátem je nahrazena jak hrubá, tak jemná frakce kameniva. [150]



Obr. č.28 – Cihelný a směsný recyklát [151].

Tab. 11 – Nabídka betonů R-CRETE® [150].

| Pevnostní třída | Stupeň vlivu prostředí | |
|-----------------|------------------------|-------|
| | X0 | XC1–2 |
| C12/15 | 50 % 100 % | – |
| C16/20 | 50 % 100 % | – |
| C20/25 | 50 % 100 % | – |
| C25/30 | 50 % | 50 % |
| C30/37 | – | 50 % |

R-CRETE® se vyrábí do pevnostní třídy C 30/37. Hodnoty pevnosti v tahu betonu R-CRETE® jsou srovnatelné s běžným betonem z přírodního kameniva. Pro výpočet soudržnosti betonu s výztuží lze tedy uvažovat střední hodnoty pevnosti betonu v prostém tahu (f_{ctm}) podle ČSN EN 1992–1–1.

Beton R-CRETE® lze použít pro stupeň vlivu prostředí X0 (bez nebezpečí koroze nebo narušení) a XC1–2 (koroze vlivem karbonatace). Momentální nabídka odpovídá současným technologickým znalostem. Lze předpokládat, že nabídka bude po dokončení potřebných zkoušek v budoucnu rozšířena o další stupně vlivu prostředí. [150]

Fyzikální a mechanické vlastnosti

Betony R-CRETE® jsou vyráběny běžně v následujících konzistencích:

- konzistence S3 – sednutí Abramsova kužele 100–150 mm
- konzistence S4 – sednutí Abramsova kužele 160–210 mm

R-CRETE® není vhodné vyrábět v řidších konzistencích, ani je do nich upravovat na stavbě, jelikož může hrozit vyplavání lehkých složek recyklovaného kameniva na povrch betonu.

Maximální průměr zrna kameniva betonu R-CRETE® se odvíjí podle dodávané frakce recyklovaného kameniva z recyklačního střediska. Nejčastěji je použito maximální zrno kameniva D_{\max} 16 mm a D_{\max} 22 mm. [150]

Příklady využití na stavbách

- Rohan City – beton s náhradou drobného kameniva směsným recyklátem (15 %), posudek statika pro strop C 25/30 [152]
- Obytný soubor Na Vackově – stěnové konstrukce – cementový kompozit s náhradou hrubého kameniva recyklátem (50 %) C 25/30 90d [56]
- Nová Waltrovka – podkladní betony – cementový kompozit s náhradou hrubého kameniva směsným recyklátem (50 %) C8/10 [56]
- OD Máj – výtahové šachty – cementový kompozit s náhradou hrubého kameniva směsným recyklátem 15 % (posudek statika)
- VESI Hostivař (bytový komplex) – podkladní betony a stěnové konstrukce [56]
- Výhledy Chodovec – podkladní a stěnové konstrukce [56]

1.6.2.2. Rebetong

V polovině října 2019 představila firma Skanska a. s., na základě společného výzkumu se společností ERC-TECH a.s. nový materiál s využitím recyklovaného kameniva jako 100% náhrady kameniva přírodního v betonu, tedy včetně drobné frakce do 4 mm. Držitelem patentu je společnost ERC-TECH a.s., své know-how poskytuje i zahraničním firmám. Skanska Transbeton, s.r.o. nabízí výrobek pod značkou Rebetong na šesti betonárnách Skanska Transbeton, s.r.o. v Čechách a na Moravě. [153]

Společnost rozlišuje dva produkty – Rebetong a Rebetong. Rebetong je obecný název betonu, kde je přírodní kamenivo až ve 100 % nahrazeno recyklátem, může být vyroben z betonového, cihelného nebo směsného recyklátu. Rebetong je obecný název betonu, kde je použito recyklované i přírodní kamenivo. Recyklované kamenivo je zde zastoupeno mezi 10 % až 75 % z celkového obsahu kameniva. Výhodou je zlepšení některých užitečných vlastností (např. modulu pružnosti) a zvýšení stability jejich výsledků. [154]

Produkty značky Rebetong i Rebetong jsou vyráběny na základě vydaného stavebního technického osvědčení (STO) č. 060–049062 [155], [156] a zavedeného Systému řízení výroby v konzistencích S1–S5 dle podnikové normy TN TRB 03/2019. Podniková norma TN TRB 03/2019 přebírá specifikované vlastnosti podle ČSN EN 206+A2 [66], ČSN P 73 2404 [74] a navazujících zkušebních norem a technických požadavků. [157]



Obr. č.29 – Rebetong [157].

Nabídka betonů Rebetong a RebetoNG

Rebetong i RebetoNG se používá pro konstrukce z prostého betonu pevnostních tříd C12/15 X0; C16/20 X0, XC1; C20/25 X0, XC1; C25/30 a C30/37 X0, XC1, XC2. RebetoNG je navíc možné použít pro stupeň vlivu prostředí XC3 a XD1 (závisí na konkrétním složení receptury).

Materiály jsou vhodné zejména pro základové konstrukce, podkladní betony, jako výplň pro systémy ztraceného bednění, vnitřní stěny a příčky v bytových a kancelářských budovách, podkladní vrstvy vozovek a výplňové betony. Pro aplikaci železového betonu jsou vhodné pevnostní třídy C20/25 a vyšší. [154]

Fyzikální a mechanické vlastnosti

Při návrhu (zejména vodorovných konstrukcí) je potřeba vzít v úvahu nižší hodnoty statického modulu pružnosti – zhruba o 1/3 až 1/2 oproti konvenčnímu betonu s použitím přírodního kameniva. Doporučuje se též provést statické posouzení.

Pro produkty je použito kamenivo s maximálním zrnem 16 mm nebo 22 mm.

Pro měkké konzistence S3–S5 se přidávají ztekuující přísady.

Objemová hmotnost Rebetong i RebetoNG je v rozmezí $2000 \pm 300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [154].

Certifikát systému řízení výroby byl vydán pro betonárny Skanska Olomouc [158], Brno [159], Řeporyje [160], Uhřetěves [161], Veltrusy [162].

Příklady využití na stavbách

- Čertův vršek v pražské Libni – podkladní betony, železobetonové nosné stěny [153]
- Bytový komplex Emila Kolbena v Praze-Vysočanech [153]
- Modřanský cukrovar [163]
- Envelopa Office Center v Olomouci – podkladní betony [164]

1.6.2.3. Výzkum a vývoj v soukromém sektoru

Bylo provedeno dotazníkové šetření mezi 23 výrobci betonu v České republice za účelem zjistit jejich zkušenosti s betonem s recyklovaným kamenivem. Průzkum byl prováděn v prosinci roku 2023, v této době 17 z dotázaných betonáren odpovědělo, že RAC nenabízejí, čtyři z nich zařadí výrobky s recykláty v následujících letech, zbylých 13 betonáren neplánuje využívat recyklát do betonu ani v budoucnu. Ostatním šesti betonárnám, které RAC nabízí, byl zaslán dotazník, jedná se o společnosti TBG METROSTAV s.r.o., Skanska Transbeton, s.r.o.,

ZAPA beton a.s., THERMOSERVIS–TRANSPORT s.r.o., AZS BETON s.r.o. a BETONÁRNA HLUČÍN s.r.o. Závěry vycházející z odpovědí v dotazníku jsou shrnuty níže.

Jak dlouho výrobci RAC nabízejí a jaký podíl náhrady přírodního kameniva je v jejich produktech:

TBG METROSTAV s.r.o.

Společnost nabízí produkt beton s recyklovaným kamenivem přibližně tři roky, aktuálně pod názvem R-CRETE® (do 12/2023 ECOCRETE® R). Možnost náhrady přírodního kameniva recyklátem je 15 %, 50 % a 100 %.

Skanska Transbeton, s.r.o.

Společnost nabízí beton s recyklovaným kamenivem čtyři roky, aktuálně se jedná o produkty Rebetong, RebetoNG, prefabrikované legobloky Reblok z Rebetongu a Rebetong® STABIL pro podkladní vrstvy vozovek a zpevněných ploch. Podíl náhrady přírodního kameniva je závislý na zdroji recyklovaného kameniva. Jedná se především o náhrady 30, 40, 50, až 80 %. V případě nenosných a málo náchylných konstrukcí se používá náhrada až 100 %.

THERMOSERVIS–TRANSPORT s.r.o.

Společnost nabízí beton s recyklovaným kamenivem dva roky, aktuálně pod názvem RED Beton. Pro transportní beton využívá náhrady až 80 %, u prefabrikátů až 100 %.

ZAPA beton a.s.

Společnost nabízí beton s recyklovaným kamenivem přibližně jeden rok pod názvem ZAPA NEXT. Možnost náhrady je 0–100 %, přičemž nejčastěji se využívá beton s náhradou 20–50 %.

BETONÁRNA HLUČÍN s.r.o.

Společnost nabízí beton s recyklovaným kamenivem, tzv. EKOBETON několik měsíců, pracuje s náhradou přírodního kameniva až 80 %.

AZS 98 s.r.o., AZS BETON s.r.o., AZS RECYKLACE ODPADU s.r.o.

Skupina nabízí beton s recyklovaným kamenivem přibližně tři roky, u transportbetonů je náhrada do 20 %, v prefabrikátech až 100 %.

Hlavní důvody, proč betonárny produkt nabízí:

- Omezení spotřeby neobnovitelných zdrojů
- Produkty podporují cirkulární ekonomiku
- Výrobky jsou vhodné pro stavby cílící na udržitelné řešení (certifikace apod.)
- Snižování potenciálu globálního oteplování (CO₂) apod.
- Konkurenční výhoda, prezentace firmy jako šetrné k životnímu prostředí
- Levnější alternativa betonu pro odběratele

Pět ze šesti výrobců uvedlo, že je jejich produkt s recyklovaným kamenivem pro zákazníky finančně výhodnější než NAC. Pro samotné betonárny je však ve většině případů úspora za materiály zanedbatelná.

Čtyři z dotázaných firem odebírají recyklované kamenivo z recyklačních středisek, dvě si vyrábějí vlastní recyklát v rámci společnosti. Společnost TBG Metrostav s.r.o. má zkušenosti i s použitím recyklátu přímo z místa demolice.

Všechny společnosti uvedly, že u nich probíhá další vývoj v této oblasti a navrhují nové směsi využívající recykláty.

Dle výrobců betonu by mělo být v technických normách stanoveno:

- Použitelnost směsného a cihelného recyklátu pro konkrétní stupně vlivu prostředí a pevnostní třídy.
- Přesně definované parametry recyklovaného kameniva (doporučené křivky zrnitosti, objemová hmotnost, množství a druh cizorodých látek, obsah chloridů apod.).
- Určit možnosti využití většího procentuálního zastoupení recyklátů v betonu, vyšší flexibilitu ve využívání recyklátu v betonu.
- Regulace nakládání s demoličním odpadem – omezit nebo významně zpoplatnit ukládání na skládky.
- Jak recyklované kamenivo testovat, třídít a podobně.
- Pro zhotovitele staveb a dodavatele betonu u určitých konstrukcí předepisovat maximální podíl použitých materiálů, které nelze znovu využít či recyklovat.
- Stanovit podmínky pro možnost využití frakce menší než 4 mm.
- Zavést pravidlo pro veřejné zakázky, ve kterých by bylo nutné (pro vytypované konstrukce), použít materiál s podílem recyklátu.

Všechny dotázané betonárny aktivně nabízí svým zákazníkům možnost náhrady přírodního kameniva za recyklát, ovšem pouze dvě betonárny mají zkušenost, že zákazníci zájem o takový produkt mají. Ostatní uvádí, že stále panuje nedůvěra a obava o kvalitě transport betonů s recyklovaným kamenivem. U prefabrikátů se materiál neřeší.

Nejčastější důvody zákazníků betonáren pro odběr betonu s recyklovaným kamenivem

- Nižší cena je aktuálně primární motivací pro odběr betonu s recyklovaným kamenivem – zákazníci mají zájem o podobné produkty pouze v případě, že je tento beton prodáván levněji (což může být ovšem ztrátové pro výrobce)
- Cirkulární ekonomika a ekologické řešení
- Splnění certifikací LEED a BEEM
- Úspora CO₂

1.7. Inženýrské aplikace RAC ve světě

Mnoho zemí podporuje využívání RAC (většinou s recyklovaným betonovým kamenivem) pro strukturální aplikace za účelem udržitelnější výstavby. Nejpokročilejším státem v této oblasti je Švýcarsko, v roce 2002 byla v Curychu zahájena pilotní veřejná stavba, škola „Im Birch“, která obsahovala 80 % recyklovaného betonu. Úspěšná realizace tohoto pilotního projektu vedla k závazku švýcarské vlády, že alespoň 25 % recyklovaného betonového kameniva by mělo být použito pro všechny veřejné budovy. [6] Pilotní projekty se na přelomu století začaly objevovat i v jiných částech světa, níže je uvedeno pouze několik příkladů staveb, které ukazují aplikaci betonu s recyklovaným kamenivem.

1.7.1. Waldspirale



Obr. č.30 – Waldspirale [165].

Lokalita: Darmstadt, Německo

Popis objektu: 12podlažní bytový objekt

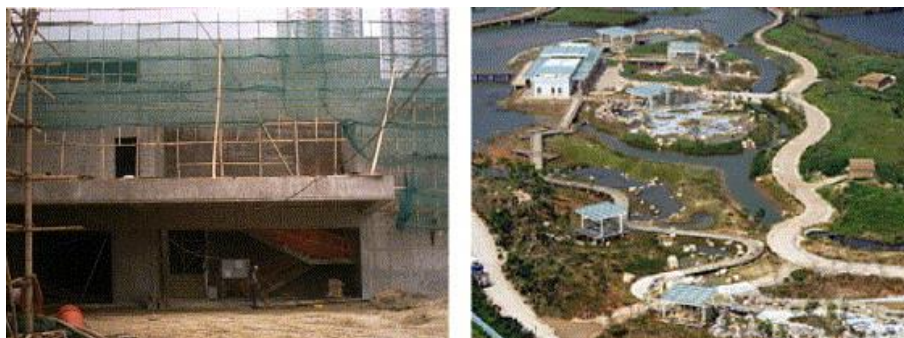
Období výstavby: 11/1998–09/1999

Budova Waldspirale je druhým projektem rakouského umělce Friedensreicha Hundertwassera, kde byl využit beton s recyklovaným kamenivem. První budovou s touto technologií byl kancelářský objekt Vilberel Weg postavený též v Darmstadtu mezi lety 1997–1998. Při výstavbě Vilberel Weg stavba čelila problémům s nasákovostí recyklovaného kameniva, což zapříčinilo nejednotnou konzistenci materiálu v průběhu výstavby. Proto byly pro projekt Waldspirale vytvořeny a implementovány metody a technologie pro kontrolu výroby materiálu a konzistence betonu. Výsledky ukázaly, že tyto metody jsou vysoce účinné a zajišťují srovnatelnou kvalitu RAC s NAC. [166] Celkem bylo v tomto projektu použito 12 000 m³ RAC. [76]

Tab. 12 Procento nahrazení přírodního kameniva v RAC konstrukcích projektu Waldspirale.

| Max. charakteristická krychelná pevnost po 28 dnech | Procento nahrazení přírodního hrubého kameniva recyklovaným | Konstrukce |
|---|---|-----------------------|
| 30 MPa | 30 % | Základy |
| 30 MPa | 50 % | Stěny, stropy, sloupy |

1.7.2. Hong Kong Wetland Park



Obr. č.31 – Wetland Park v Hong Kongu [167].

Lokalita: severo-západní část Hong Kongu

Popis objektu: nízkopodlažní objekty a venkovní konstrukce v areálu parku

Období výstavby: 2003–2006

Na začátku 21. století vedl rychlý rozvoj Hongkongu v předchozích dvou desetiletích ke vzniku značného množství stavebního a demoličního odpadu. V polovině července 2002 zřídila vláda pilotní projekt dočasného recyklačního zařízení SDO ve čtvrti Tuen Mun, které mělo vyrábět recyklované kamenivo pro použití v průmyslu, vládních projektech a pro výzkumné práce. Závod měl plánovanou manipulační kapacitu 240 000 tun denně. Jedním z projektů, které využily nabídky recyklačního střediska, byla výstavba Wetlandského parku. V projektu bylo použito recyklované kamenivo z betonového recyklátu, přičemž nejvyšší třída betonu byla s charakteristickou krychelnou pevností 35 MPa dle místních norem. [168], [169] Výstavba betonových konstrukcí ve Wetland parku spotřebovala zhruba 14 300 m³ RAC. [167]

Tab. 13 – Procento nahrazení přírodního kameniva v RAC konstrukcích projektu Wetland Park [76], [167].

| Max. charakteristická krychelná pevnost po 28 dnech | Procento nahrazení přírodního hrubého kameniva recyklovaným | Konstrukce |
|---|---|---|
| 20 MPa | 100 % | Beton pro drobné betonářské práce |
| 30 MPa | 20 % | Vnější konstrukce – opěrné zdi |
| 35 MPa | 20 % | Piloty, základové desky, nosníky a obvodové zdi |

1.7.3. Samwoh Eco-Green Building



Obr. č.32 – Samwoh Eco-Green Building [168].

Lokalita: Singapur

Popis objektu: 3podlažní budova

Období výstavby: 2008–2010

Přední stavební společnost a dodavatel ekologických produktů Samwoh Corporation Pte Ltd postavila první budovu v regionu z betonu až se 100 % náhradou přírodního kameniva za recyklát. Budova je součástí Samwoh Eco-Green Park, který byl oficiálně otevřen v březnu 2010, v objektu sídlí výzkumné a vývojové centrum Samwoh. Výstavba budovy byla součástí výzkumného projektu, který byl částečně financován výzkumným grantem Ministerstva pro národní rozvoj v Singapuru. Projekt měl dvě fáze – rozsáhlý laboratorní výzkum a vyhodnocení použití RAC, po kterém následovala samotná výstavba a monitoring konstrukcí s RAC. Ve fázi výstavby byl použit beton s krychelnou pevností až 40 MPa a až se 100% náhradou přírodního kameniva. Budova se skládá ze tří podlaží a RAC byl využit pro

všechny typy konstrukčních prvků – nosníky, sloupy, desky a stěny. Pro možnost dalšího monitoringu byly do sloupů zabudovány senzory s optickými vlákny, které v reálném čase měří deformace sloupů, což lze použít k analýze chování konstrukce budovy. [168], [170]

1.7.4. Výzkumná a laboratorní budova pro přírodní vědy na Humboldtově univerzitě v Berlíně



Obr. č.33 – Budova pro přírodní vědy na Humboldtově univerzitě [171].

Lokalita: Berlín, Německo

Popis objektu: 4podlažní budova

Období výstavby: 06/2014–09/2014

Výzkumná a laboratorní budova pro přírodní vědy na berlínské Humboldtově univerzitě byla postavena za spolupráce se společností Cemex, téměř výhradně z transportbetonu vyrobeného z kameniva z recyklovaného betonu. Celkem Cemex dodal 3 800 m³ tohoto materiálu. [172]

Byly použity betony s recyklovaným kamenivem do maximální pevnostní třídy C30/37, XC3, frakce 8/16 mm. Ve většině případů se jednalo o 45 % nahrazení přírodního kameniva kamenivem recyklovaným. [76]

1.7.5. Projekt Twin-tower v Šanghaji



Obr. č.34 – Twin-tower v Šanghaji [173].

Lokalita: Šanghaj, Čína

Popis objektu: dvě 12podlažní železobetonové rámové konstrukce se ztužujícími stěnami

Období výstavby: 2015-2017

Jedinečný 12podlažní projekt Twin-tower v Šanghaji je tvořen konstrukcí vyrobené z RAC (věž A) a konstrukcí vyrobené z NAC (věž B). Tento projekt demonstruje konkurenceschopnost RAC pro použití ve výškových budovách v praxi. [173]

Vzhledem k nedostatečným zkušenostem s aplikací RAC ve vysokých budovách bylo procento nahrazení hrubého recyklovaného betonového kameniva v RAC omezeno na 30 %. V tomto projektu nebylo nahrazeno žádné jemné kamenivo. Kromě toho nebyla použita žádná hrubá RCA v podzemních betonových konstrukcích, suterénu a svislých konstrukcích prvního a druhého podlaží, aby nebyla narušena statická funkce konstrukce RAC v případě zemětřesení. [76]

Tab. 14 – Procento nahrazení přírodního kameniva v RAC konstrukcích projektu Twin-tower.

| Max. charakteristická krychelná pevnost po 28 dnech | Procento nahrazení přírodního hrubého kameniva recyklovaným | Konstrukce |
|---|---|--------------------------|
| 30 MPa | 30 % | Trámy a desky |
| 40 MPa | 30 % | Ztužující stěny a sloupy |
| 50 MPa | 10 % | Ztužující stěny a sloupy |

1.7.6. Recygénie



Obr. č.35 – Komplex Recygénie. [174].

Lokalita: předměstí Paříže, Francie

Popis objektu: komplex sociálního bydlení

Období výstavby: 2022–2024

Mezinárodní skupina Holcim aktuálně staví u Paříže komplex sociálního bydlení s 220 jednotkami nazvaný Recygénie. Inovační centrum Holcim vyvinulo pro tento projekt první plně recyklovaný beton na světě. Beton byl vyroben pomocí technologie ECOCycle®, všechny jeho složky – cement, kamenivo a voda – jsou vyrobeny z recyklovaných materiálů. Očekává se, že stavba ušetří 6 000 tun přírodních zdrojů, včetně 4 000 tun cementu, 1 500 tun kameniva a 500 tun písku. Rovněž sníží emise CO₂ o 50 % ve srovnání s běžnou betonovou budovou. [174]–[176]

1.7.7. Talpa House



Obr. č.36 – Projekt Talpa House – Trnava [177].

Lokalita: Slovenská republika

Popis objektu: rodinné domy přikryté vrstvou zeminy

Období výstavby: od 2023

Talpa house je označení nového projektu rodinných domů, ve kterých je použit beton s recyklovaným kamenivem. Velká část objektu se nachází pod úrovní terénu a využívá akumulace tepla v okolní zemině. Nosný systém je navržen jako desko-stěnová konstrukce. U tohoto pilotního projektu je použit beton s 55 % náhradou hrubého přírodního kameniva betonovým recyklátem, frakce 4–16 mm. Stropní desky jsou kromě vlastní tíhy zatíženy zásypem nasáknuté jílové zeminy mocnosti 500 až 3 000 mm (šikmý zásyp). Pilotní projekty v Trnavě a Rohožníku jsou aktuálně ve výstavbě, od doby odbednění stropní desky je u nich monitorován průběh přetvoření stropní desky, výsledky v současnosti vyhovují požadovaným parametrům. Tloušťka obvodových stěn je 300 mm a tloušťka stropů je 280 mm. [178]

Tab. 15 – Procento nahrazení přírodního kameniva v RAC konstrukcích projektu TALPA HOUSE [178].

| Třída betonu | Procento nahrazení přírodního hrubého kameniva recyklovaným | Konstrukce |
|--------------------------------------|---|--|
| C25/30, XC1, CI 0,2 Dmax 16 mm S3 | 55 % | Svislé obvodové nosné konstrukce ve styku se zeminou |
| C25/30, XC1, CI 0,2 Dmax 16 mm S3 | 55 % | Stropní desky |

2. Dotazníkové šetření

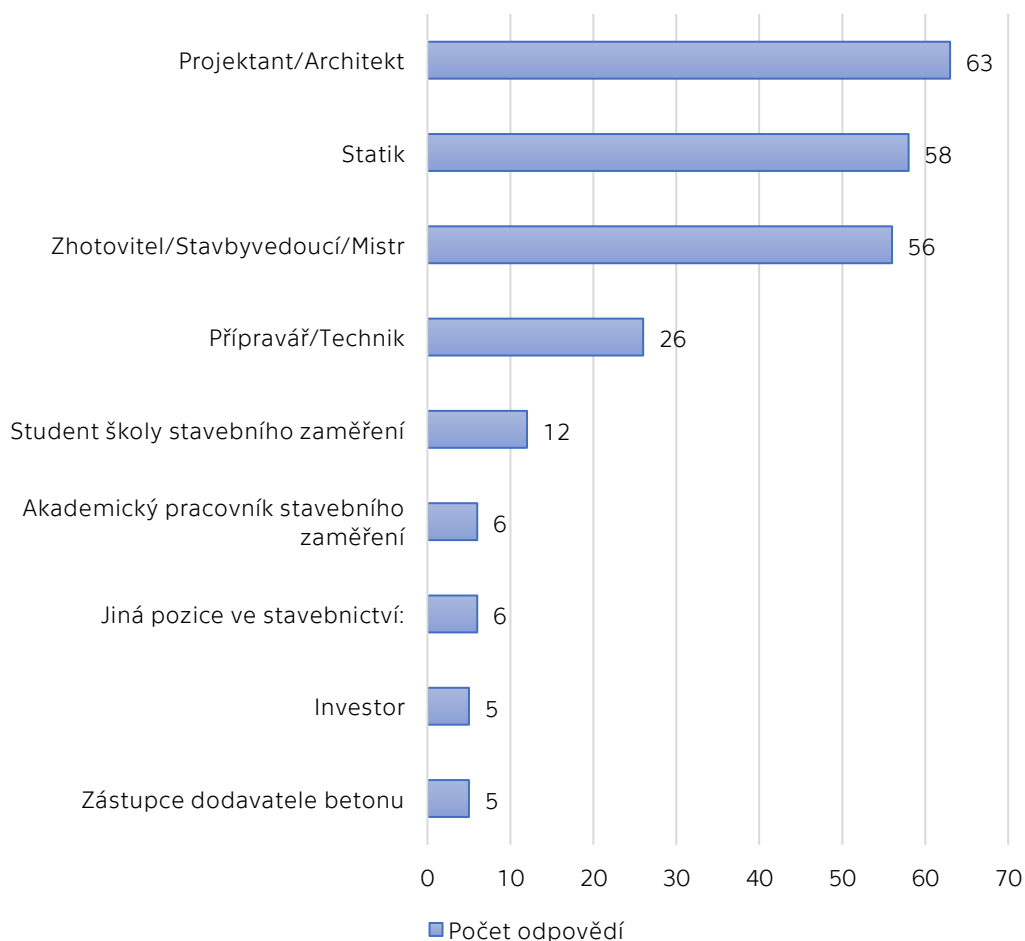
V rámci diplomové práce byl proveden průzkum mezi českou odbornou veřejností pomocí dotazníkového šetření. Cílem dotazníku bylo zjistit současnou úroveň zkušeností s RAC v České republice a povědomí stavební komunity o tomto materiálu. Autorka rozeslala dotazník více než sedmi set osobám pracujícím ve stavebnictví, především projektantům, statikům, přípravářům, technikům, ale i studentům a akademikům. Dotazník byl anonymní, skládal se ze 17 otázek, pouze některé odpovědi byly povinné.

Data byla sbírána od října roku 2023 do prosince roku 2024, dotazník vyplnilo 201 respondentů, zpracované výsledky jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

2.1. Výsledky průzkumu

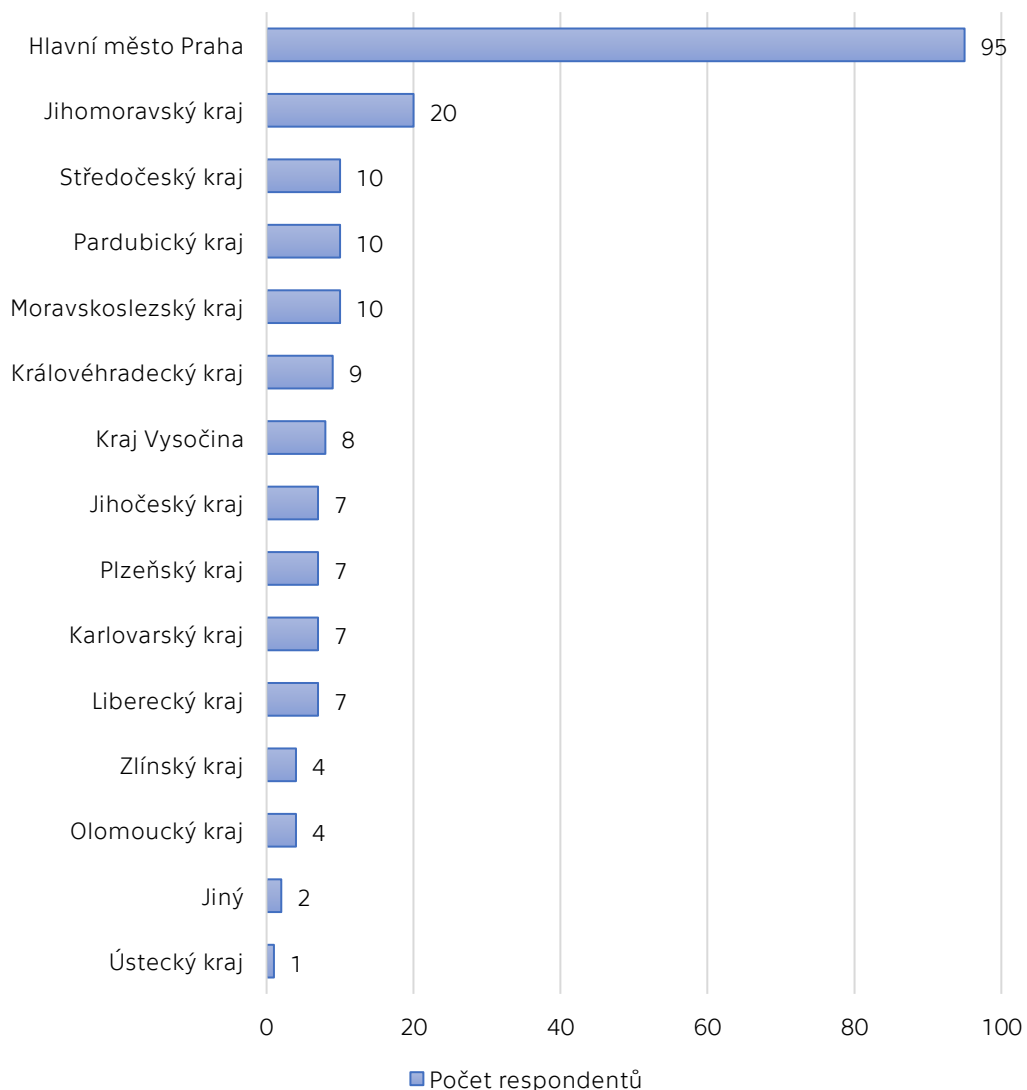
PROFESNÍ INFORMACE O RESPONDENTECH

Profesní zaměření respondentů



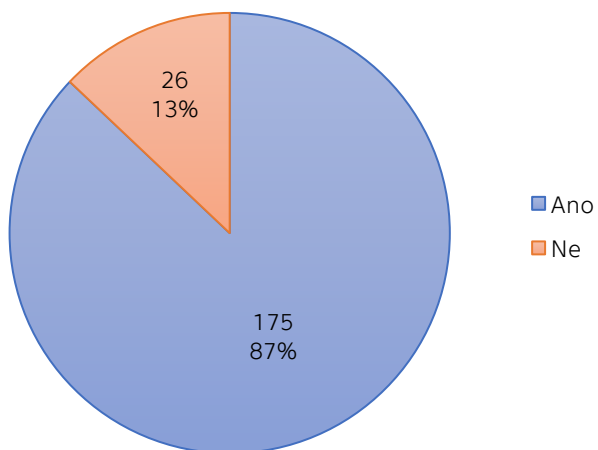
Komentář: Dotazník byl cílen především na stavební profese, kterých se nejvíce týká možnost rozhodování o využití RAC na projektech, tj. projektantů, statiků a zhotovitelů. Mezi dotazovanými osobami byli zaměstnanci velkých i malých stavebních společností a osoby samostatně výdělečně činné, s různou úrovní vzdělání a délkou praxe.

Kraj působení respondentů

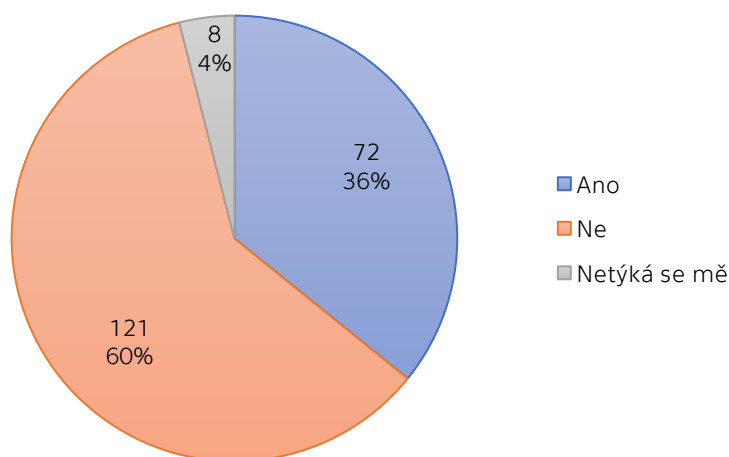


DOTAZY OHLEDNĚ ZKUŠENOSTÍ S VYUŽITÍM RAC

Znáte pojem beton s recyklovaným kamenivem?

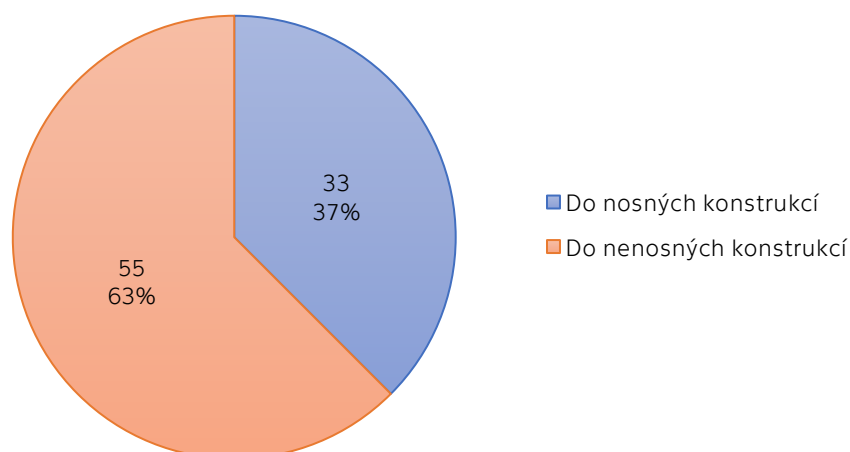


Setkali jste se v praxi s využitím betonu s recyklovaným kamenivem?



Komentář: Z odpovědí u posledních dvou dotazů je zřejmé, že mnoho stavebních odborníků pojem beton s recyklovaným kamenivem zná, nicméně většina se s jeho využitím v praxi prozatím nesešla.

Pokud jste se v praxi setkali s použitím betonu s recyklovaným kamenivem – byl využit do nosných či nenosných konstrukcí?



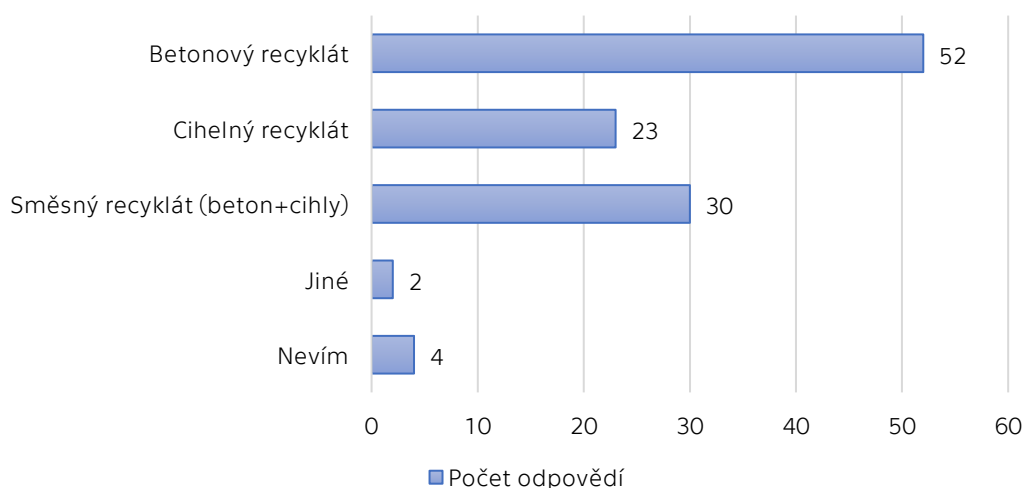
Napište prosím konkrétně, do kterých konstrukcí byl tento beton využit.

| ODPOVĚĎ | POČET ODPOVĚDÍ |
|---|----------------|
| Podsypy (recyklované kamenivo) | 1 |
| Podkladní beton spodní stavby budov | 29 |
| Podkladní a stabilizační vrstvy vozovek | 4 |
| Svrchní vrstva vozovky | 2 |
| Piloty | 3 |
| Základy | 9 |
| Opěrné stěny | 4 |
| Podzemní šachty na horkovodní potrubí | 1 |

| | |
|---|----|
| Obvodové stěny | 2 |
| ŽB nadzemní nosné vnitřní stěny | 28 |
| Stěny výtahových šachet | 3 |
| Příčky | 6 |
| Atiky | 1 |
| Stropní deska | 3 |
| Betonové mazaniny, podlahy | 3 |
| Spádové betony | 2 |
| Výplňový a nenosný materiál, pomocné konstrukce | 8 |
| Prefabrikované silniční panely | 2 |
| Lego bloky, BETkostky | 4 |
| Dlažba | 1 |
| Mobiliář | 1 |

Komentář: Dle předpokladu je v České republice beton s recyklovaným kamenivem využíván převážně do nenosných a výplňových konstrukcích, stále panuje velká míra nejistoty a neznalosti ohledně používání tohoto materiálu. Nejčastěji je RAC použit do podkladních betonů, značná část respondentů má však zkušenost i s aplikací do nosných vnitřních stěn, což je velmi pozitivní zjištění.

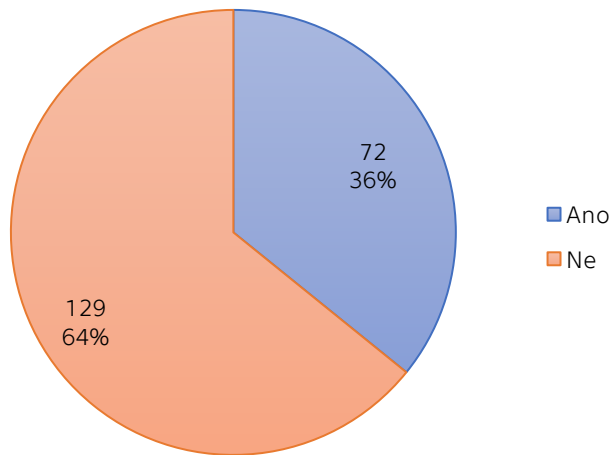
S jakým druhem recyklátu jste se v praxi setkali u betonu s recyklovaným kamenivem?



Komentář: Beton s recyklovaným betonovým kamenivem, který je dle dotazníku aktuálně využíván nejvíce, vykazuje vlastnosti velmi podobné běžným betonům, v jistých případech dokonce lepší díky většímu podílu cementu, jak bylo zmíněno v kapitole 1.5.1. Nicméně snaha je začít využívat ve větším měřítku směsné a cihelné recykláty, u kterých je předpoklad horších mechanických parametrů, na druhou stranu se pojí s menšími dopady na životní

prostředí a vyšší finanční úsporou. Většina betonáren v České republice nabízí své ekologické betony právě se směsným recyklátem.

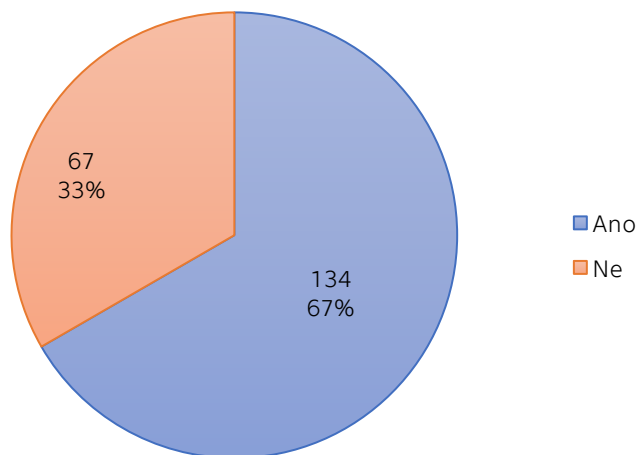
Znáte dodavatele betonu s recyklovaným kamenivem či konkrétní produkty?



Komentář: Respondenti uváděli především následující produkty a společnosti: ECOCRETE® R (od 01/2024 R-CRETE®) od TBG METROSTAV s.r.o., REBETONG od Skanska Transbeton, s.r.o., Českomoravský beton, a.s. a ZAPA beton a.s. Výjimečně pak THERMOSERVIS–TRANSPORT s.r.o. a AZS BETON s.r.o.

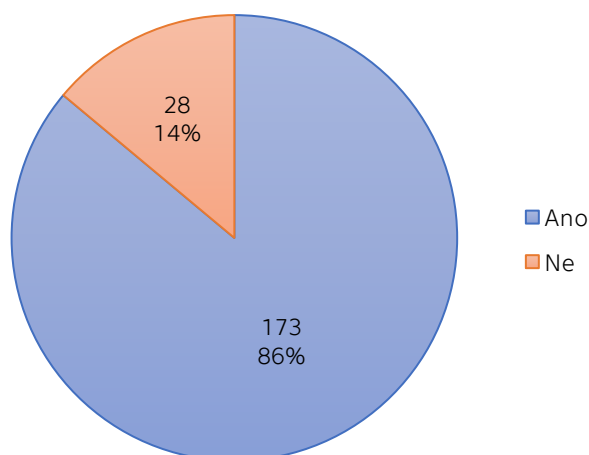
DOTAZY CÍLÍCÍ NA NÁZORY RESPONDENTŮ OHLEDNĚ VYUŽÍVÁNÍ RAC

Myslíte si, že je využití betonu s recyklovaným kamenivem finančně výhodnější? (oproti přírodnímu kamenivu)



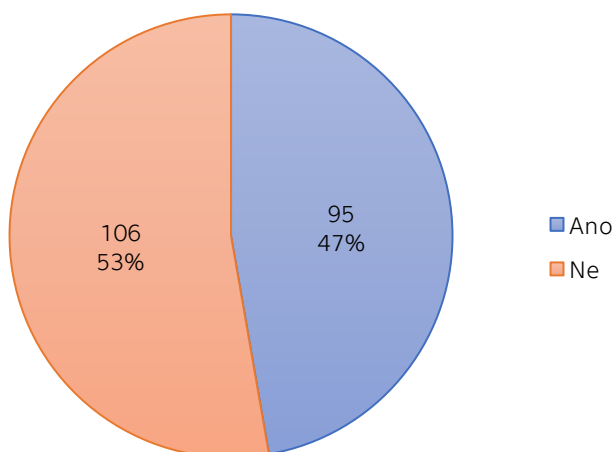
Komentář: Většina respondentů si myslí, že beton s recyklovaným kamenivem je finančně výhodnější oproti betonu s přírodním kamenivem. Aktuálně to lze potvrdit při průzkumu ceníků výrobců betonu. Jak ale uvedli zástupci betonáren v dotazníku z kapitoly 1.6.2.3, pro výrobce betonu finanční úspora příliš velká není kvůli náročnosti zajištění kvality kameniva a je pravděpodobné, že se ceny betonu s recyklovaným kamenivem budou zvyšovat.

Myslíte si, že je využití betonu s recyklovaným kamenivem ekologičtější? (oproti přírodnímu kamenivu)



Komentář: V případě otázky dopadů na životní prostředí většina respondentů odpověděla, že dle jejich názoru je beton s recyklovaným kamenivem šetrnější k životnímu prostředí. Využívání druhotných surovin bezesporu podporuje udržitelnost ve výstavbě a šetří přírodní zdroje. Nicméně i menší část odborné veřejnosti, která má opačný názor, může mít v některých případech pravdu, například pokud nejsou pro výrobu RAC používány lokální zdroje SDO či není efektivně nastavena technologie výroby. Vždy je potřeba tyto faktory zvážit a nejlépe vypracovat LCA analýzu pro konkrétní projekt.

Myslíte si, že je používání betonu s recyklovaným kamenivem rizikové?

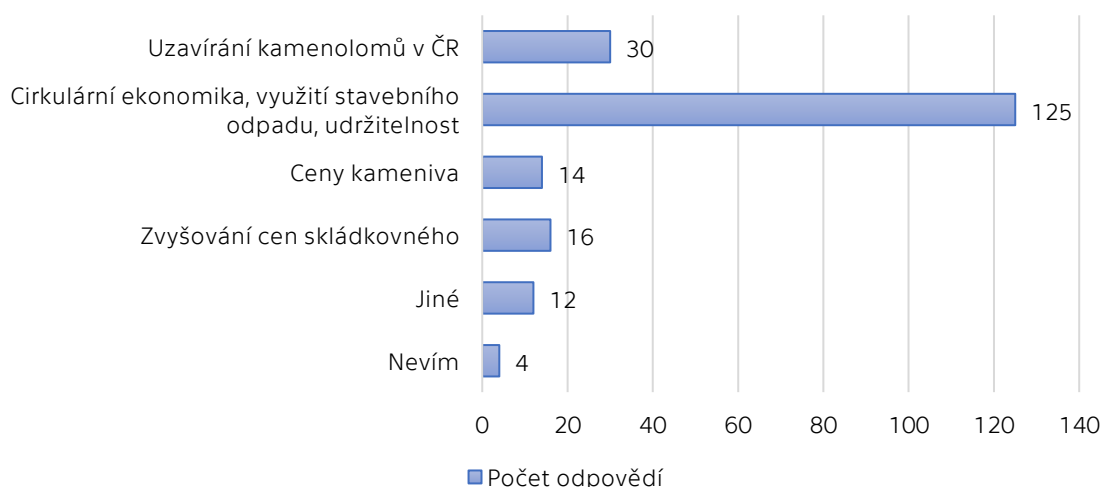


Uveďte konkrétní rizika, která se dle Vašeho názoru pojí s využitím betonu s recyklovaným kamenivem.

| ODPOVĚĎ | POČET ODPOVĚDÍ |
|---|----------------|
| Absence dostatečných zkušeností s materiálem | 3 |
| Nejistota ohledně kvality kameniva, nestejnorodosti a původu kameniva | 27 |
| Kontaminace kameniva škodlivými látkami (azbest, škvára apod.) | 18 |
| Obsah zbytků jiných materiálů, které nebyly důkladně vytříděné a odstraněné | 12 |

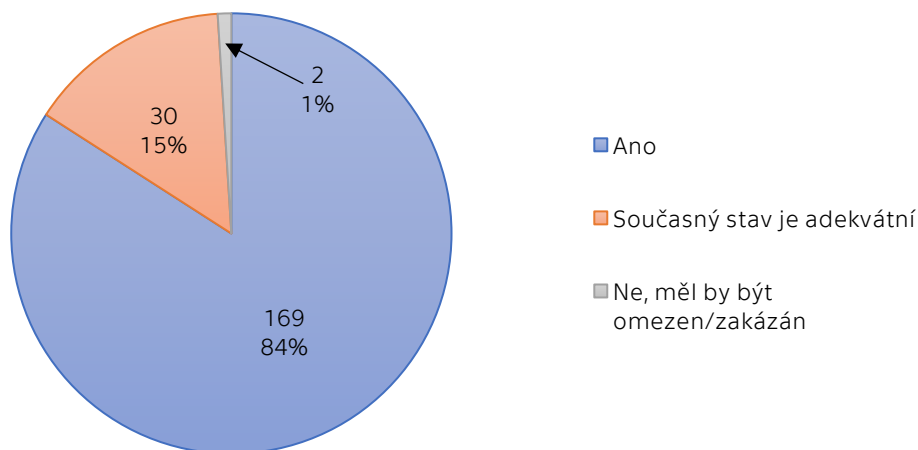
| | |
|--|----|
| Umístění drtiček/třídíček recyklátu (hluk, prach, prostor atd.) | 4 |
| Variabilita frakcí kameniva | 1 |
| Není dostatek čistého betonového recyklátu, nutno používat směsné | 1 |
| Nasákavost kameniva | 4 |
| Kolísání mechanických vlastností betonu a kameniva | 16 |
| Nutný větší důraz na sledování kvality, opatření pro zajištění kvality jsou finančně náročná | 14 |
| Nižší pevnost betonu | 15 |
| Nižší modul pružnosti | 13 |
| Špatná odolnost proti vlivům prostředí | 6 |
| Větší smrštění a dotvarování (reologické vlivy) | 7 |
| Odolnost vůči CHRL | 3 |
| Mrazuvzdornost | 5 |
| Nejistá či horší trvanlivost | 9 |
| Horší zpracovatelnost | 3 |
| Hlídání receptury, různé dávkování vody | 1 |
| Reakce recyklátu v betonu na vlhkost – mapy na omítkách apod. | 2 |
| Nesourodost betonu | 1 |
| Horší soudržnost s výztuží | 1 |
| Barevnost, nevhodný materiál pro pohledové betony | 3 |
| Není možné určit přesný poměr složek betonové směsi | 4 |
| Odlíšné parametry tepelného odporu betonu | 1 |
| Horší požární odolnost | 1 |
| Špatné akustické vlastnosti – u cihelného recyklátu | 3 |
| Certifikace materiálu | 3 |
| Ostré tvary kameniva společně s nasákavostí mohou způsobovat kaverny v konstrukcích, tvar drceného materiálu (není ani ostrohranný – drcené kamenivo), ani zaoblený (říční kamenivo) | 2 |
| Nesprávné použití – neinformovanost odborné i laické veřejnosti o možnostech a limitech použití recyklátů | 13 |
| Technologická nekázeň, nedodržování předpisů | 4 |
| Jiná metodika pro výpočet při návrhu než u betonu s přírodním kamenivem | 2 |
| Nedostatečná podpora využívání recyklátů | 1 |
| Není příliš výhodné ekonomicky | 1 |
| Není garance vlastností pro betony vyšší třídy | 1 |

Co je dle Vašeho názoru nejsilnější důvod pro výrobu betonu s recyklovaným kamenivem?



Komentář: Vedle výše uvedených odpovědí vidí respondenti největší benefity používání RAC v možnosti využití stavební suti při odstranění stavby přímo na místě pro novou stavbu. Tím lze docílit výrazné úspory nákladů za dopravu a snížení negativních dopadů na životní prostředí. Dalším důvodem je menší zátěž skládek. Několik odpovědí se týkalo i výhody z hlediska vylehčení konstrukce či zajímavého povrchu materiálu z pohledu estetiky. Někteří respondenti se dále domnívají, že používání či výroba RAC může být konkurenční výhodou na stavebním trhu, ať už z hlediska nižších nabídkových cen či požadavku veřejnosti a klientů na udržitelnost výstavby.

Myslíte si, že by se měl beton s recyklovaným kamenivem ve stavebnictví více využívat?



2.2. Vyhodnocení průzkumu

Z průzkumu vyplynulo, že v České republice jsou zkušenosti s betonem s recyklovaným kamenivem prozatím malé, a i mezi odbornou veřejností panuje nejistota ohledně tohoto materiálu. S použitím RAC na konkrétním projektu se setkala zhruba 36 % respondentů, jednalo se o použití RAC především do podkladních betonů a nenosných konstrukcí. Pozitivním zjištěním je četnost odpovědí u využívání RAC do svislých nosných vnitřních konstrukcí.

Jako největší rizika uváděli respondenti rozptyl kvality recyklovaného kameniva a s tím související kolísání mechanických vlastností betonu. Mnoho účastníků průzkumu si myslí, že

beton s recykláty má nižší pevnost i modul pružnosti a kratší životnost. Stavitelé, kteří mají s RAC zkušenost uvádějí problém vyšší nasákavosti kameniva, což se může negativně projevit špatnou zpracovatelností čerstvého betonu a u dokončených konstrukcí například mapami na omítkách a podobně. Obecně byl jako rizikový faktor uváděn nedostatek zkušeností s materiálem a neinformovanost mezi stavební komunitou, což může mít za následek používání RAC do nevhodných konstrukcí a ohrožení statické únosnosti konstrukce.

Reakce na závěrečný dotaz jasně ukazují, že mezi odbornou veřejností je ochota více využívat beton s recyklovaným kamenivem v projektech a na stavbách, z celého průzkumu ovšem vyplývá, že bude třeba překonat jisté bariéry spojené s tímto materiálem, aby byla míra jeho použití a akceptace ve stavebnictví vyšší. V následující části diplomové práce jsou některé tyto překážky a potenciální výzvy popsány.

3. Překážky a výzvy na stavebním trhu pro beton s recyklovaným kamenivem

3.1. Popis příležitosti

Na základě dotazníku v předchozí části diplomové práce i na základě dalších studií lze říci, že akceptace betonu s recyklovaným kamenivem je ve společnosti prozatím poměrně nízká. Ze strany spotřebitelů stále panuje nedůvěra vůči výrobkům z recyklovaných materiálů. Ve většině případů závisí volba zákazníka na ceně a kvalitě, tudíž lze předpokládat, že recyklovaný materiál bude preferován pouze tam, kde je cena takového kameniva podstatně nižší než cena přírodního materiálu.

Evropa se jeví jako trh s velkými příležitostmi, mimo jiné díky očekávaným nařízením Evropské unie, která by měla podporovat využití recyklovaného kameniva – v této souvislosti se zdůrazňuje evropský Green Deal a Akční plán pro oběhové hospodářství zmíněné v předchozích kapitolách. [54] Opatření na podporu zavádění recyklovaného kameniva na trh pak musí brát v úvahu celý dodavatelský řetězec, to znamená společnosti zabývající se demolicemi a skládkováním a též výrobci betonu a veřejnost kvůli zajištění poptávky. [13]

Níže jsou uvedeny aktuální překážky pro širší používání betonu s recyklovaným kamenivem a možné příležitosti pro jednotlivé účastníky výstavbového procesu platné nejen v České republice a Evropské unii.

3.1.1. Stát/mocenské organizace

Stát by měl mít ochotu spolupracovat se soukromým sektorem, v současné době je nátlak na využívání ekologičtějších materiálů a udržitelnějšího přístupu ve stavebnictví spíše ze strany koncových účastníků výstavby – od zhotovitelů, dodavatelů betonu, uživatelů staveb a veřejnosti. V ideálním případě by však tyto požadavky měly vzejít od státu či nadnárodních uskupení, které mohou své nároky zasazovat do legislativního rámce.

Překážky [13]

- Nelegální skládkování je dnes pro společnosti často ekonomicky nejatraktivnější možností pro vypořádání se s odpadem.
- Dlouhé povolovací procesy pro přijímání a zpracovávání SDO.
- Normy považují recyklované kamenivo za jiný typ kameniva, což vyvolává skepticismus (přitom i přírodní kamenivo z různých zdrojů se může lišit svými vlastnostmi).

Příležitosti a výzvy [13]

- Veřejné orgány na místní, regionální a celostátní úrovni by měly být proškoleny o významu udržitelných otázek v sektoru stavebnictví.
- Poskytnutí jasných pokynů pro řádnou recyklaci SDO a vykazování údajů o opětovném využívání.
- Provádět spolehlivé statistiky, které umožňují pravidelné monitorování využívání SDO, což důležité pro tvorbu dalších strategií v oblasti nakládání s SDO. Je důležité monitorovat výsledky nasazených opatření, poučit se z nich a přizpůsobovat legislativu dle reakcí trhu.

- Zajistit široké geografické pokrytí zařízeními na recyklaci SDO. Bez řádné infrastruktury není správa SDO praktická, ekologicky nezávadná ani nákladově efektivní. Zajistit dostatečné kapacity pro výrobu recyklovaného kameniva (s kvalitou pro použití v betonu) před tím, než se prosadí trh s RAC.
- Snížit ekonomickou zátěž pro recyklační střediska a výrobce betonu s recyklovaným kamenivem, např. poskytováním investičních půjček za nízké sazby, poskytováním dotací a osvobozením výrobců recyklovaného kameniva od daní (snížení výrobních nákladů recyklovaného kameniva).
- Poskytnout finanční výhody pro producenty SDO v případě správného nakládání s takovým odpadem.
- Poskytnout podněty pro modernizaci betonáren. Stavebnictví je vysoce konkurenční obor a beton s recyklovaným kamenivem musí být nákladově konkurenceschopný, aby mohl existovat jako stavební výrobek. Je třeba vytvořit poptávku na trhu a motivaci pro využívání RAC:
 - o Snížit náklady na recyklované kamenivo.
 - o Zavést RA a RAC v zelených veřejných zakázkách – vytvořit kritické množství poptávky pro rozvoj trhu pro RA a RAC a prokázat, že RAC je vhodným alternativním materiálem pro určité typy aplikací.
 - o Zdanit nebo zakázat skládkování, aby společnosti odpovědné za výrobu SDO hledaly jiná řešení, jak s odpadem naložit.
 - o Zdaňovat producenty a uživatele přírodního kameniva – záleží na konkrétních okolnostech, aby kvůli zvýšení daní nedocházelo např. k dovozu materiálů ze zahraničí.
- Prosazovat tvorbu předdemoličních auditů, které přispějí ke spolehlivosti statistik produkce SDO a vyšší kvalitě recyklace SDO. Nařídit, aby demolice byly v souladu s Protokolem o nakládání se stavebním a demoličním odpadem [20].
- Vytvořit systém ekoznaček recyklovaného betonu – štítky pro společnosti, které splňují požadavky pro využívání SDO a recyklátů. Ekoznačky pak mohou být použity jako systém certifikace nebo zajistit členství v asociacích zabývajících se tématem udržitelnosti ve stavebnictví.
- Prosazovat nástroje pro hodnocení cirkulární výstavby, aby bylo zajištěno, že budovy jsou navrženy s principy oběhového hospodářství a aby se maximalizovalo opětovné využití materiálů.

3.1.2. Akademická sféra a vzdělávání

Výzvy a příležitosti [13]

- Sponzorovat školicí programy. Školení by se měla zabývat především výrobními procesy, zajišťováním kvality materiálů a identifikací odpovědností různých zástupců dodavatelského řetězce.
- Akademické osnovy by měly být přizpůsobeny pokračujícímu trendu cirkulace a udržitelnosti ve stavebnictví.
- Studenti stavebního inženýrství by se měli seznámit s konstrukčním navrhováním betonu s recyklovaným kamenivem, učit se od odborníků z praxe.
- Zaměřit se na výzkum a inovace metod v oblasti opětovného využívání materiálů a recyklace.

3.1.3. Investoři a developeři

Výzvy a příležitosti

Pro investory je na prvním místě otázka financování zakázky a ekonomické návratnosti projektů. Měli by tedy zvážit hodnotu investice v delším časovém úseku a posoudit celkovou ekonomickou životnost stavby (tj. náklady na přírodní kamenivo oproti recyklovanému, náklady na recyklaci, náklady na skládkování a podobně).

Využití recyklovaných materiálů může též podpořit image společnosti. Zákazníci v dnešní době často cení snahu firem o udržitelnost a šetrnost k životnímu prostředí.

3.1.4. Architekti, projektanti, statici

Výzvy a příležitosti

Architekti a projektanti by se měli zabývat otázkami, jak díky svému návrhu zajistit nízkoemisní stavění, provoz a dekonstrukci. Dle toho volit konstrukční řešení a materiály. Porovnávat různá hlediska dopadů na životní prostředí pro více návrhů. Motivovat investory pro udržitelnější varianty i z hlediska možnosti finančních úspor u recyklovaných materiálů.

Již od začátku projektu je vhodné spolupracovat s experty na demolice a recyklaci materiálů.

3.1.5. Stavební firmy

Výzvy a příležitosti

Zhotovitelé by se měli zaměřit na výstavbu budov, u kterých lze předpokládat minimální produkci odpadů a efektivní využití materiálů. I zde lze uplatnit motivaci v podobě podpory image společnosti jako šetrné k životnímu prostředí. Díky recyklaci odpadů se firma vyhne poplatkům na skládkách za uložení SDO, lze též předpokládat finanční úsporu při nákupu materiálů obsahujících recyklát.

Kompozity s recyklátem obecně nevyžadují žádné speciální technologické zásady odlišné od konvenčního betonu s přírodním kamenivem. Čerstvý beton se standardně zhutňuje ponornými vibrátory, případně vibračními lištami a lze ukládat buď přímo vysypáním z mixu, bádíemi nebo čerpadlem na beton. Pro ukládání i ošetřování platí obecné zásady dle ČSN EN 13670 – Provádění betonových konstrukcí [179].

3.1.6. Recyklační střediska

Překážky

- Při zakládání recyklačních středisek může být problém nedostatek znalostí a zkušeností, což má za následek neefektivní výrobu recyklovaného kameniva (horší kvalita, vyšší cena).
- Nízká tržní hodnota kameniva znamená, že investice do recyklačních středisek může přinést zisk až po dlouhé době.
- Náklady na recyklované kamenivo certifikované pro beton jsou vysoké, pokud výrobce recyklovaného kameniva nevyrábí tento typ RA rutinně.

Výzvy a příležitosti

- Pro splnění požadavků a nároků ze strany trhu by měla být zajištěna stálá dodávka recyklovaného kameniva, měla by být snaha rozšiřovat a modernizovat provozy.

- K získání kameniva vyšší kvality jsou zapotřebí pokročilé metody separace a zpracování. Je třeba též rozšířit výběr frakcí RA (jemné a drobné kamenivo). [13]
- Využívat mobilní recyklační linky pro oblasti bez dostatečné infrastruktury stacionárních zařízení.
- Propojit sítě zástupců stavební výroby, skládek, recyklačních středisek a místních úřadů s cílem maximalizovat kvalitu a efektivitu používání recyklovaného kameniva, současně sdílet zkušenosti a podporovat nové investice.

3.1.7. Dodavatelé betonu

Překážky

- Výrobci betonu většinou nemají zkušenosti s výrobou RAC.
- Z důvodu malé poptávky výrobci nemají motivaci k přizpůsobení svých průmyslových jednotek a výrobních procesů pro nové materiály.

Výzvy a příležitosti

- Provozní úpravy pro výrobu RAC většinou nepředstavují zásadní problém, z technologického hlediska je výroba RAC prováděna stejným zařízením používaným k výrobě NAC. Doprava se realizuje autodomíchačem nebo na sklápěčím voze.
- Dodavatelé materiálů by měli nabízet produkty, které využívají odpad a které lze po jejich dekonstrukci opětovně využít jako druhotnou surovinu.

3.1.8. Technologové

Výzvy a příležitosti

Kvalita recyklovaného kameniva a SDO často kolísá, což vyvolává technické problémy. Technologové tak musí vyvinout adekvátní řešení a nástroje, jak s těmito surovinami nakládat a zajistit požadované vlastnosti pro využití ve větší míře.

Vzhledem k tomu, že nejudržitelnějším a nejefektivnějším způsobem zabudování recyklovaného kameniva je částečná náhrada přírodního kameniva, mohou výrobci betonu obavy o jakost materiálu minimalizovat prostřednictvím kvalitního návrhu směsi a provedením potřebných testů a zkoušek, které jsou předepsány legislativou.

3.2. Fáze výstavbového projektu a popis příležitosti

Mezi strategické cíle stavebnictví by mělo patřit zefektivnění materiálové toků a snížení spotřeby primárních surovin. Na budovy lze pohlížet jako na banky materiálů, je tak vhodné tyto materiály evidovat a po vypršení životnosti konstrukce je v nejvyšší možné míře recyklovat.

3.2.1. Předinvestiční fáze

Smyslem předinvestiční fáze je definovat účel a cíle projektu. Ze strany investora by mělo docházet především ke sběru informací, jejich analýze a vyhodnocení. Jsou provedeny předběžné studie v oblasti podnikatelských příležitostí a technického a ekonomického řešení. V závěru by mělo dojít k rozhodnutí o realizaci či nerealizaci projektu. [180], [181]

Tab. 16 – Hlavní činnosti v této fázi a popis příležitosti – využití RAC.

| Strana | Činnost [180]–[182] | Popis příležitosti ohledně využití betonu s recyklovaným kamenivem |
|----------|--|--|
| Investor | Strategie postupu a cíl projektu | Je cílem investora realizovat udržitelnější projekty? |
| | Výběr lokality a vhodného stavebního pozemku | Je v okolí betonárna s nabídkou RAC? Je na pozemku budoucí stavby objekt určený k demolici? Pokud ano: a) Možnost využití materiálu z demolice přímo pro novou stavbu - recyklát horší kvality je vhodný využít pro zásypy, obsypy, vyrovnávací vrstvu pod základové konstrukce - na základě lokality rozhodnout, zda SDO odvézt do recyklačního střediska či nasadit mobilní recyklační linku na stavbu – je pozemek vhodný pro její umístění (brát ohled na okolní zástavbu a hygienické limity – hluk, prach apod.) - kvalitní recyklát využít přímo do betonových konstrukcí stavby – využít mobilní betonárku přímo na stavbě b) Odvoz materiálu do recyklačního střediska – u kvalitně vytříděného odpadu možnost získat finanční náhradu |
| | Způsob organizace a řízení – personální a organizační uspořádání | Přizvat si na otázky udržitelné výstavby experty pro řízení této oblasti |
| | Harmonogram realizace | – |
| | Způsob financování (rozhoduje se o způsobu financování) | Je možné získat dotaci / výhodnější podmínky při řízení se principy udržitelné výstavby? |
| | Zpracování dokumentace (architektonická studie, DUR) | Které konstrukce z návrhu jsou vhodné pro využití RAC? Přemýšlet o návrhu i z hlediska jeho budoucí dekonstrukce – využít větší modularity, recyklovatelných materiálů apod. |
| | Odhad pořizovacích nákladů – propočet | Bude použití RAC finančně výhodnější? Jaké množství RAC lze v u konkrétní stavby použít? |
| | Analýza trhu, odhad poptávky, marketingový průzkum | Bude mít využití betonu s recyklovaným kamenivem a snaha o udržitelnost přidanou hodnotu pro budoucí klienty? Je to výhoda oproti konkurenci? |

3.2.2. Investiční fáze – investiční a realizační příprava

Investiční fáze je propracovanější verzí předchozí etapy, dotváří se architektonické a stavebně-technické řešení a ekonomické dopady vybraných variant. Dále se zpřesňuje způsob financování, organizace a řízení projektu. Cílem této fáze je zpracovat příslušnou projektovou dokumentaci stavby a po získání stavebního povolení vybrat nejvhodnějšího dodavatele stavby. [180], [181]

Tab. 17 – Hlavní činnosti v této fázi a popis příležitosti – využití RAC (pokračování na další straně).

| Strana | Činnost [180]–[182] | Popis příležitosti ohledně využití betonu s recyklovaným kamenivem |
|----------|--|--|
| Investor | Upřesňuje se způsob organizace a řízení | – |
| | Definují se hlavní termíny výstavby | – |
| | Finální rozhodnutí o způsobu financování | – |

| | | |
|-----------|---|---|
| | Výběr projektanta, zadávací řízení | Uvést požadavek na použití RAC. |
| | Smlouvy o dílo (projektant) | – |
| | Zhotovení projektu (zahrnuje i ekonomickou stránku, architektonické, technické a technologické řešení), EIA | Zahrnutí použití RAC – posouzení projektanta a statika, finanční porovnání. Vedle projektové dokumentace je vypracována studie EIA, která vyhodnocuje vliv stavby na životní prostředí. Bude využita mobilní recyklační linka či mobilní betonárna? |
| | Projednání dokumentace s dotčenými orgány | V případě použití RAC je třeba doložit provedené zkoušky či osvědčení, že materiál a konstrukce vyhoví všem požadavkům. |
| | Stavební povolení | – |
| | Vypracování zadávací dokumentace a dokumentace pro provedení stavby | Ve vhodných konstrukcích nahradit běžný beton betonem s recyklovaným kamenivem. Stanovit konkrétní požadavky pro využití RAC. |
| | Výběr dodavatele pro realizaci stavby | Uvedení požadavku na použití RAC. Mají dodavatelé s tímto materiálem zkušenosti? |
| | Podpis smlouvy o dílo | – |
| Dodavatel | Nabídková příprava | Umí zhotovitel využívat RAC? Dokáže zajistit logistiku s tím spojenou? |
| | Zpracování nabídky (nabídkový rozpočet, výrobní kalkulace, časový plán) | Je RAC finančně výhodnější? – výhoda při nacenění zakázky a ve výběrovém řízení Návrh pro využití RAC může vzejít i ze strany zhotovitele. |
| | Realizační příprava | Vyhodnocení možností dodávek betonu a logistické plánování. |

3.2.3. Investiční fáze – realizace projektu

Tato fáze začíná předáním a převzetím staveniště mezi investorem a dodavatelem. Cílem je zhotovit stavbu podle uzavřené smlouvy za stanovenou cenu, ve stanoveném čase a požadované jakosti. Fáze zahrnuje kontrolu kvality a průběhu stavebních prací, vedení stavebního deníku, přípravu dokumentů pro provoz a údržbu aj. Dále dochází k vyhodnocení projektu a finančnímu vypořádání závazků. Ověřují se všechny funkce stavby a probíhá zaškolení uživatelů či personálu provozovatele. Investor přebírá stavbu plně funkční, případně ověřenou zkušebním provozem. Po převzetí se odstraňují vady a nedodělky a je též zpracována dokumentace skutečného provedení. [180], [181] Po kolaudaci je pak stavba uvedena do normálního provozu. [182], [183]

Popis příležitosti

Pro dodavatele znamená využití betonu s recyklovaným kamenivem možnou finanční úsporu. V současné době se tento trh teprve rozvíjí a je vhodné získat kontakty a obchodní vztahy s dodavateli RA a RAC zavčas, mimo jiné pro obeznámení se s problematikou.

3.2.4. Fáze užívání projektu – provozní fáze

Výstavbový projekt je ukončen a začíná běžet záruční doba, která byla sjednaná ve Smlouvě o dílo. V této fázi probíhá již vlastní provoz stavby zahrnující údržbu, opravy, rekonstrukce a modernizace. Dochází k vyhodnocování projektu, posuzování splnění účelu stavby. [180], [181]

3.2.5. Ukončení provozu a likvidace stavby

Ukončení provozu a odstranění stavby představuje závěrečnou fázi života projektu. Součástí je prodej určitého likvidovaného majetku, nicméně i vydání nákladů na likvidaci neprodejných složek. Tato fáze zahrnuje zejména činnosti spojené s demontáží stavby a také účetní vypořádání odstraňované stavby. Likvidační hodnota projektu znamená rozdíl příjmů a výdajů z likvidace projektu (včetně respektování případných daňových dopadů), dle výsledné likvidační hodnoty lze vyhodnotit ukazatele ekonomické efektivity projektu. [184]

Popis příležitosti

V případě důsledného třídění materiálů při dekonstrukci budovy mohou být tyto materiály posléze opět zapojeny do oběhového hospodářství a využity jako druhotné suroviny. Pro tento účel je vhodné vypracovat předdemoliční audit. Při odstraňování hrubé stavby je standardem separovat výztuž z betonových konstrukcí a prodat ji do sběrných zařízení. Dále je možné nabídnout betonovou či cihelnou suť do recyklačních středisek. Je třeba zmínit, že aktuálně mohou recyklační střediska požadovat finanční náhradu za příjem SDO, pokud je však SDO kvalitní a dobře vytříděný, může za něj naopak recyklační středisko platit dodavateli odpadu.

4. Experimentální část

4.1. Cíle experimentální části

Pro účely multikriteriálního vyhodnocení betonu s recyklovaným kamenivem na konkrétním případě, které je zpracováno dále v kapitole 5, bylo třeba navrhnout receptury betonů použitých na daném projektu. Jedná se o betony třídy C16/20 X0, C16/20 XC1 a C25/30 XC1, všechny pevnostní třídy byly navrženy ve třech variantách – s přírodním kamenivem (referenční směsí), s částečným podílem recyklovaného betonového kameniva a částečným podílem recyklovaného směsného kameniva. Procenta nahrazení přírodního kameniva recykláty byla stanovena dle doporučení normy ČSN EN 206+A2 – tabulka E.2. (viz kapitola 1.4.1.3). V případě recyklovaného kameniva typu A je doporučená náhrada hrubé frakce přírodního kameniva max. 50 % pro stupeň vlivu prostředí X0 a max. 30 % pro stupeň vlivu prostředí XC1–XC2. V případě recyklovaného kameniva typu B se doporučuje náhrada hrubé frakce přírodního kameniva max. 50 % pro stupeň vlivu prostředí X0 a max. 20 % pro stupeň vlivu prostředí XC1–XC2.

První dva typy betonů jsou v projektu využity do podkladních a výplňových konstrukcí, beton C25/30 XC1 je navržen do nosných stěn nadzemních podlaží. Pro ověření správnosti návrhu receptury byly vyrobeny laboratorní vzorky betonu C25/30 XC1 a po 13 až 16 dnech (z časových důvodů) byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu a modulu pružnosti. Výsledky zkoušek byly následně přepočteny na 28-denní hodnoty.

Cílem experimentální části bylo ověřit mechanické vlastnosti betonů s různým podílem recyklovaného kameniva a jejich vhodnost pro použití do konstrukcí na vybraném projektu.

4.2. Návrh receptur betonu

4.2.1. Postup návrhu

Návrh receptur betonu byl proveden dle empirického množství vody. Tato metoda vychází z praktických zkušeností a předepisuje podle pevnosti betonu a druhu cementu optimální vodní součinitel. [185]

Tab. 18 – Postup navrhování betonu [186] (pokračování na další straně).

| Fáze | Zadání | Stanovení |
|-------------------------|--|--|
| 1. definování požadavků | <ul style="list-style-type: none"> ▪ třída vlivu prostředí ▪ typ betonové konstrukce ▪ technologie zpracování betonu ▪ ostatní požadavky | <ul style="list-style-type: none"> ▪ min. množství cementu (min. m_c) ▪ max. vodní součinitel (max. w) ▪ min. obsah vzduchu (min. V_z) ▪ min. pevnost v tlaku (min. f_c) ▪ max. zrno kameniva (D_{max}) ▪ konzistence ▪ doba tuhnutí ▪ nárůst pevnosti ▪ objemová hmotnost ▪ max. průsak tlakovou vodou |
| 2. volba složek betonu | kamenivo | druh, zrnitost |
| | cement | druh, pevnostní třída |
| | příspěvky a příměsi | druh a dávka (m_p) |

| | |
|----------------------------------|---|
| 3. výpočet návrhu složení | |
| 4. experimentální ověření návrhu | <ul style="list-style-type: none"> ▪ stanovení konzistence čerstvého betonu ▪ úprava složení na požadovanou konzistenci ▪ zhotovení zkušebních těles ▪ úprava složení na potřebnou pevnost při zachování konzistence ▪ určení definitivního složení betonu |

Základním vztah pro výpočet složení betonu je rovnice absolutních objemů:

$$\frac{m'_c}{\rho_c} + \frac{m'_v}{\rho_v} + \frac{m'_k}{\rho_k} + \frac{m'_p}{\rho_p} = 1 - \frac{V_z}{100} \quad (1)$$

kde:

m'_c, m'_v, m'_k, m'_p množství cementu, vody, kameniva a přísady, příp. příměsi [kg/m³]
 $\rho_c, \rho_v, \rho_k, \rho_p$ obj. hmotnosti cementu, vody, kameniva a přísady, příp. příměsi [kg/m³]
 V_z objem vzduchu v betonu v % objemu

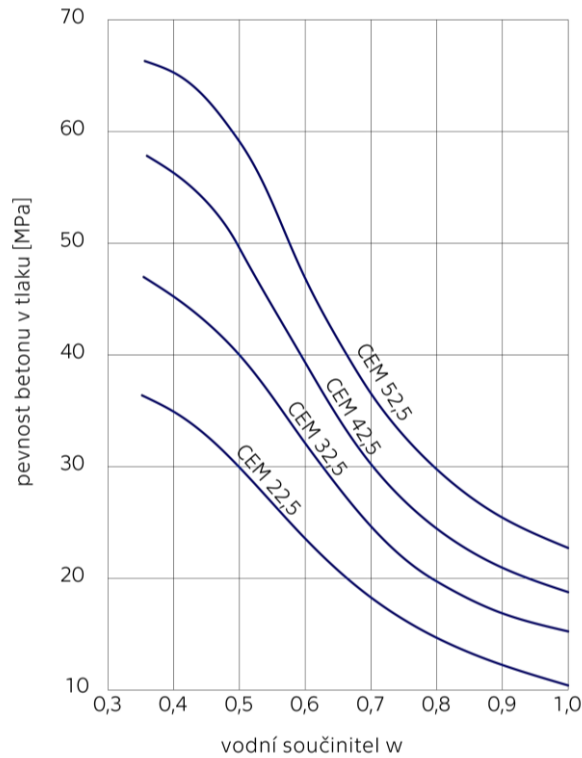
Uvažované objemové hmotnosti jsou uvedeny v Tab. 19, pro cement a plastifikátor bylo vycházeno z technických listů výrobce, pro vodu byla uvažována běžná hodnota 1000 kg/m³. Pro přírodní kamenivo byly hodnoty objemové hmotnosti uvedeny v Prohlášení o vlastnostech, v případě recyklovaného kameniva byly hodnoty změřeny experimentálně.

Tab. 19 – Objemové hmotnosti použitých materiálů.

| Materiál | Objemová hmotnost* [kg/m ³] |
|---|---|
| voda | 1000 |
| cement CEM I 42,5 R Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrý | 3130 [187] |
| kamenivo přírodní (NA) – frakce 0/4 – pískovna Dobříň | 2605 [188] |
| kamenivo přírodní (NA) – frakce 4/8 – lom Zbraslav | 2682 [189] |
| kamenivo přírodní (NA) – frakce 8/16 – lom Zbraslav | 2677 [190] |
| kamenivo recyklované betonové (RA-C) – frakce 8/16 – KARE Praha | 2380 |
| kamenivo recyklované směsné (RA-M) – frakce 8/16 – KARE Praha | 2325 |
| plastifikátor STACHEMENT MM | 1250 [191] |

* U kameniva se jedná o objemovou hmotnost bez mezer mezi zrn, pouze se vzduchem v uzavřených pórech jednotlivých zrn.

Hodnota vodního součinitele byla odečtena z nomogramu Walzovy závislosti [185], [192] mezi pevností betonu v tlaku a vodním součinitelem pro dané 28-denní pevnosti cementu.



Obr. č.37 Nomogram závislosti pevnosti betonu na vodním součiniteli a pevnosti cementu podle Walze – převzato z [185]

Vodní součinitel byl upraven dle mezí v normě ČSN EN 206+A2 a ČSN P 73 2404, kde je zároveň uvedeno i minimální množství cementu pro dané třídy betonu.

Tab. 20 – Vybraná data z tabulky F.1.1 normy ČSN P 73 2404 – Mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu platné v České republice (s předpokládanou životností stavby 50 let)

| Stupně vlivu prostředí | | |
|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| | Bez nebezpečí koroze nebo narušení | Koroze způsobená karbonatací |
| | X0 | XC1 |
| Maximální vodní součinitel w/c | – | 0,65 |
| Minimální pevnostní třída | C12/15 | C16/20 |
| Minimální obsah cementu | – | 260 |
| Minimální obsah vzduchu | – | – |

Hmotnost vody je určena následující rovnicí:

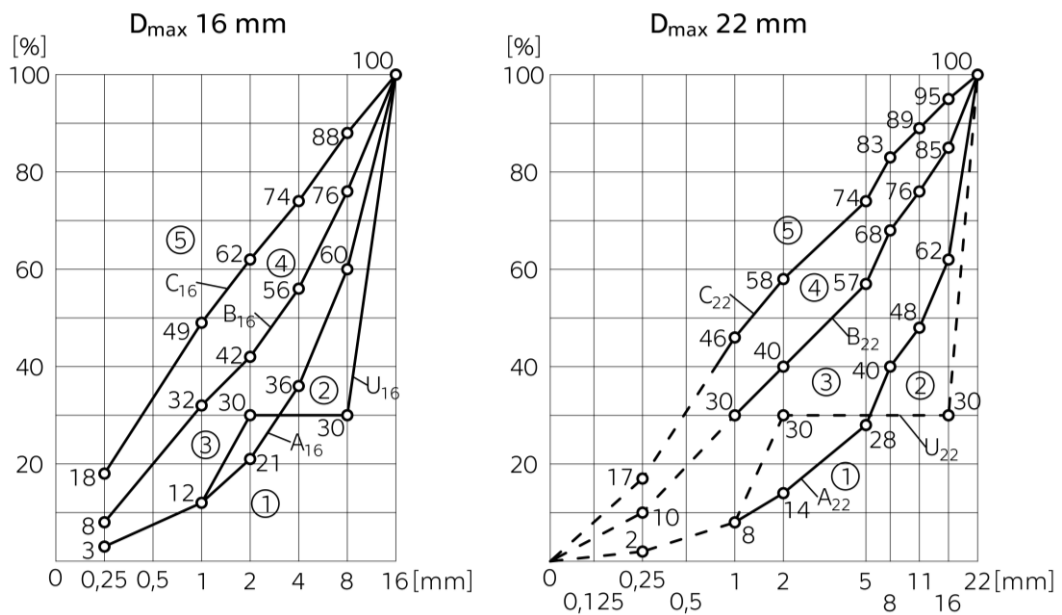
$$m_v = w \cdot m_c \quad (2)$$

kde:

m_v je množství vody [kg]
 w je vodní součinitel [–]
 m_c je množství cementu [kg]

Pro návrh množství vody a poměrů jednotlivých frakcí kameniva bylo využito doporučení z Příručky technologa [186] od společnosti Českomoravský beton, a.s. viz Obr. č.38 a Tab. 21.

Ideální křivky zrnitosti pro maximální zrno kameniva:



Obr. č.38 – Ideální křivky zrnitosti kameniva – převzato z [186].

Popis oblastí a křivek v grafech:

- 1 a 5 – oblast nevhodné zrnitosti
- 2 – oblast přerušené zrnitosti – křivka U je křivka přerušené zrnitosti
- 3 – oblast dobré zrnitosti – mezi křivkami A a B
- 4 – oblast méně vhodné, avšak použitelné zrnitosti – mezi křivkami B a C

Popis os:

- vodorovná osa = velikost otvoru síta v mm
- svislá osa = propad sítím v % hmotnosti

Tab. 21 – Doporučené hodnoty pro množství vody.

| konzistence | Křivka zrnitosti | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | A8 | B8 | C8 | A16 | B16 | C16 | A32 | B32 | C32 | A63 | B63 | C63 |
| C0 | 160 | 178 | 197 | 139 | 160 | 183 | 133 | 152 | 171 | 123 | 139 | 163 |
| S1 | 166 | 184 | 205 | 145 | 166 | 189 | 137 | 158 | 177 | 127 | 145 | 169 |
| S2 | 176 | 194 | 217 | 155 | 176 | 200 | 145 | 167 | 188 | 135 | 155 | 180 |
| S3 | 192 | 212 | 235 | 170 | 192 | 217 | 159 | 181 | 207 | 148 | 170 | 197 |
| S4 | 204 | 227 | 250 | 181 | 204 | 232 | 171 | 197 | 223 | 159 | 181 | 211 |

V Tab. 21 je uvedeno doporučené množství vody pro křivky zrnitosti ohraničující jednotlivé oblasti v grafech na Obr. č.38. Číslo u indexu A, B, C značí maximální velikost zrn kameniva D_{max} .

4.2.2. Úpravy receptur při betonáži

Pro zjištění správných poměrů vstupních materiálů byla před betonáží vzorků provedena výroba čtyř zkušebních betonových směsí s přírodním kamenivem. Měnil se poměr dávkování vody a plastifikátoru, ostatní materiály se dávkovaly vždy ve stejném množství.

Množství plastifikátoru bylo navrženo dle doporučení výrobce (rozmezí 0,4–1,4 % hmotnosti cementu), kdy dle očekávání dosahovaly nejlepší konzistence zkušební směsi s množstvím plastifikátoru na horní hranici dávkování, tj. 1,4 % hmotnosti cementu.

Při výrobě betonových směsí určených pro betonáž vzorků bylo nutné zvýšit původně navržené množství vody u směsí s recyklovaným kamenivem kvůli vyšší nasákavosti kameniva.

4.2.3. Výsledné receptury na 1 m³ betonové směsi

4.2.3.1. C25/30 XC1

Tab. 22 – Navržené receptury ve variantách pro C25/30 XC1.

| Materiál | Jednotka | Beton s přírodním kamenivem (NAC) | Beton s recykl. betonovým kamenivem (RAC-C) | Beton s recykl. směsným kamenivem (RAC-M) |
|--|----------|-----------------------------------|---|---|
| Voda | kg | 176 | 182 | 185 |
| Cement CEM I 42,5 R | kg | 320 | 314 | 313 |
| Plastifikátor STACHEMENT MM | kg | 4,5 | 4,4 | 4,4 |
| Přírodní kamenivo frakce 0/4 (NA) | kg | 816 | 799 | 799 |
| Přírodní kamenivo frakce 4/8 (NA) | kg | 363 | 355 | 390 |
| Přírodní kamenivo frakce 8/16 (NA) | kg | 635 | 338 | 390 |
| Přírodní kamenivo frakce 11/22 (NA) | kg | 0 | 0 | 0 |
| Recyklované betonové kamenivo frakce 8/16 (RA-C) | kg | 0 | 285 | 0 |
| Recyklované směsné kamenivo frakce 8/16 (RA-M) | kg | 0 | 0 | 195 |
| | | | | |
| w/c | [-] | 0,55 | 0,58 | 0,59 |
| Max. % nahrazení hrubé frakce kameniva recykláty dle ČSN EN 206+A2 | % | 0 | 30 | 20 |
| Navržené % nahrazení hrubé frakce kameniva recykláty | % | 0 | 30 | 20 |
| Navržené % nahrazení celkového množství kameniva recykláty | % | 0 | 16 | 11 |

4.2.3.2. C16/20 X0

Tab. 23 – Navržené receptury ve variantách pro C16/20 X0.

| Materiál | Jednotka | Beton s přírodním kamenivem (NAC) | Beton s recykl. betonovým kamenivem (RAC-C) | Beton s recykl. směsným kamenivem (RAC-M) |
|--|----------|-----------------------------------|---|---|
| Voda | kg | 182 | 193 | 199 |
| Cement CEM I 42,5 R | kg | 280 | 280 | 280 |
| Plastifikátor STACHEMENT MM | kg | 3,9 | 3,9 | 3,9 |
| Přírodní kamenivo frakce 0/4 (NA) | kg | 825 | 791 | 780 |
| Přírodní kamenivo frakce 4/8 (NA) | kg | 238 | 229 | 225 |
| Přírodní kamenivo frakce 8/16 (NA) | kg | 495 | 0 | 0 |
| Přírodní kamenivo frakce 11/22 (NA) | kg | 275 | 264 | 260 |
| Recyklované betonové kamenivo frakce 8/16 (RA-C) | kg | 0 | 475 | 0 |
| Recyklované směsné kamenivo frakce 8/16 (RA-M) | kg | 0 | 0 | 468 |
| | | | | |
| w/c | [-] | 0,65 | 0,69 | 0,71 |
| Max. % nahrazení hrubé frakce kameniva recykláty dle ČSN EN 206+A2 | % | 0 | 50 | 50 |
| Navržené % nahrazení hrubé frakce kameniva recykláty | % | 0 | 50 | 50 |
| Navržené % nahrazení celkového množství kameniva recykláty | % | 0 | 27 | 27 |

4.2.3.3. C16/20 XC1

Tab. 24 – Navržené receptury ve variantách pro C16/20 XC1 (pokračování na další straně).

| Materiál | Jednotka | Beton s přírodním kamenivem (NAC) | Beton s recykl. betonovým kamenivem (RAC-C) | Beton s recykl. směsným kamenivem (RAC-M) |
|--|----------|-----------------------------------|---|---|
| Voda | kg | 182 | 193 | 196 |
| Cement CEM I 42,5 R | kg | 280 | 280 | 280 |
| Plastifikátor STACHEMENT MM | kg | 3,9 | 3,9 | 3,9 |
| Přírodní kamenivo frakce 0/4 (NA) | kg | 825 | 799 | 798 |
| Přírodní kamenivo frakce 4/8 (NA) | kg | 238 | 231 | 231 |
| Přírodní kamenivo frakce 8/16 (NA) | kg | 495 | 195 | 284 |
| Přírodní kamenivo frakce 11/22 (NA) | kg | 275 | 267 | 266 |
| Recyklované betonové kamenivo frakce 8/16 (RA-C) | kg | 0 | 285 | 0 |
| Recyklované směsné kamenivo frakce 8/16 (RA-M) | kg | 0 | 0 | 195 |

| w/c | [-] | 0,65 | 0,69 | 0,70 |
|--|-----|------|------|------|
| Max. % nahrazení hrubé frakce kameniva recykláty dle ČSN EN 206+A2 | % | 0 | 30 | 20 |
| Navržené % nahrazení hrubé frakce kameniva recykláty | % | 0 | 30 | 20 |
| Navržené % nahrazení celkového množství kameniva recykláty | % | 0 | 16 | 11 |

4.3. Výroba směsi C25/30 XC1

Výroba vzorků probíhala v laboratoři Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT v Praze.

4.3.1. Použité materiály

Cement CEM I 42,5 R byl vyroben v závodu Mokrá od dodavatele Českomoravský cement, a.s. [187] Jako plastifikátor byl využit produkt STACHEMENT MM od firmy STACHEMA CZ s.r.o. [191] Technické listy cementu a plastifikátoru jsou součástí Přílohy A.

Pro návrh směsi C25/30 XC1 bylo uvažováno kamenivo frakce D_{max} 16 mm. Přírodní těžené kamenivo frakce 0/4 mm pocházelo z pískovny Dobříň, jedná se o křemičitý písek. Přírodní drcené kamenivo frakce 4/8 mm a 8/16 mm pocházelo z lomu Zbraslav a jedná se o směs hornin – spilit, tufit, břidlice. Prohlášení o vlastnostech přírodních kameniv jsou součástí Přílohy A. Betonový i směsný recyklát frakce 8/16 mm byl získán z recyklačního střediska KARE Praha s.r.o.

Použitá kameniva frakce 8/16 mm lze vidět na Obr. č.40. a Obr. č.39.



Obr. č.39 – Betonový a směsný recyklát frakce 8/16 mm (foto autorky).



Obr. č.40 – Zleva: přírodní kamenivo frakce 8/16 mm; recyklované betonové kamenivo frakce 8/16 mm; recyklované směsné kamenivo frakce 8/16 mm (foto autorky).

Nečistoty v recyklátech

Před započítáním vážení jednotlivých materiálů byly z kameniva ručně vytříděny nežádoucí složky jako jsou plasty, dřevo, kabely, drátky, vlákna a podobně, viz Obr. č.41. Hmotnostní podíl nečistot v recyklátu vyjádřený v procentech je uveden v Tab. 25.

Tab. 25 – Obsah nečistot v recyklovaném kamenivu.

| | Betonový recyklát | Směsný recyklát |
|---------------------------|-------------------|------------------|
| Hmotnost nečistot | 25,6 g | 31,3 g |
| Hmotnost kameniva | 36 kg = 36 000 g | 39 kg = 39 000 g |
| Podíl nečistot v kamenivu | 0,07 % | 0,08 % |

Množství nečistot je vůči množství recyklovaného kameniva zanedbatelné, spočítané poměry nečistot v kamenivu splňují podmínky dané Tabulkou N.1 (Přípustný obsah hmot v jednotlivých typech recyklátu) uvedenou v normě ČSN P 73 2404 [74], tj. maximálně 0,2% ostatních příměsí z hmotnosti recyklovaného betonového kameniva a maximálně 0,5% ostatních příměsí z hmotnosti recyklovaného směsného kameniva.

Tab. 26 – Data převzatá z tabulky N.1 normy ČSN P 73 2404 [74].

| | Typ 1 | Typ 2 |
|--|---------------------------|---------------------------|
| Ostatní příměsí ^{b)} | ≤0,2 % hmotnosti kameniva | ≤0,5 % hmotnosti kameniva |
| ^{b)} Ostatní příměsí jsou například: sklo, keramika, struska z neželezných kovů, štuková sádra, guma, plasty, kovy, dřevo, rostlinné zbytky, papír. | | |



Obr. č.41 – Zleva: nečistoty ve směsném recyklátu; nečistoty v betonovém recyklátu (foto autorky).

4.3.2. Rozpis výroby vzorků

Vzorky byly vyrobeny v laboratoři Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT v Praze. Teplota vzduchu při výrobě byla 16 °C, čemuž odpovídala i teplota jednotlivých složek betonu.

Byly vytvořeny tři směsi (receptury) betonu, každá ve dvou záměsích. Z každé záměsi byly vybetonovány tři válce (Ø150 mm, výška 300 mm) a tři trámce (100x100x400 mm).

Kvůli počátečním problémům se zpracovatelností byla betonová směs s recyklovaným směsným kamenivem vyrobena ve třech záměsích v průběhu dvou dnů, vzorky z první záměsi byly posléze vyřazeny jako nevyhovující.

Tab. 27 – Rozpis vyrobených vzorků (pokračování na další straně).

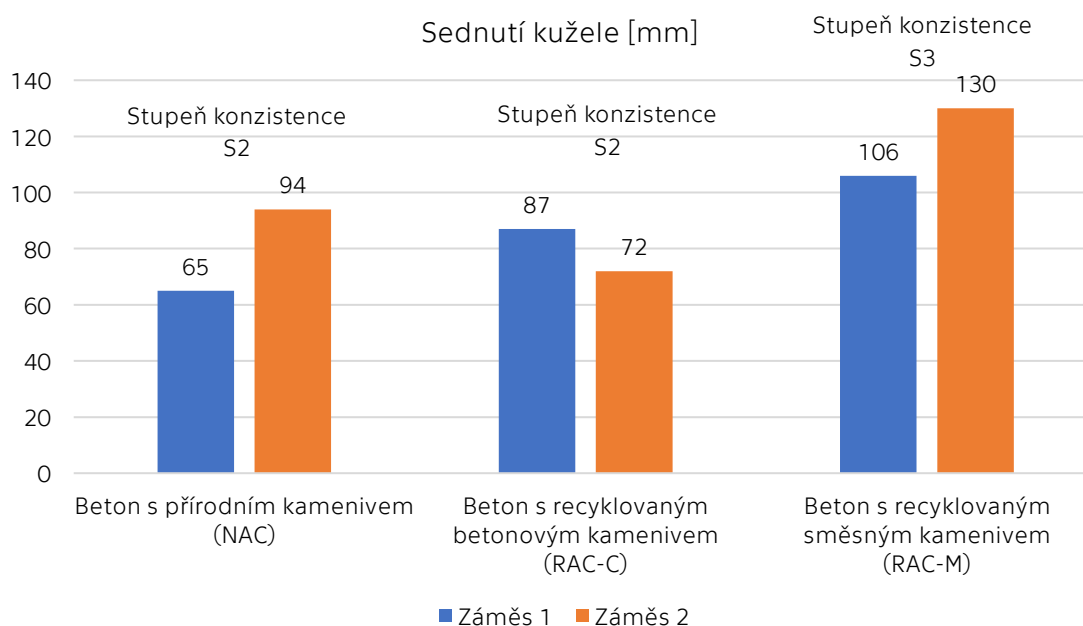
| Typ betonu (dle kameniva) | Číslo záměsi | Označení vzorku | Těleso |
|--|--------------|-----------------|--------|
| Beton s přírodním kamenivem (NA) | 1 | NA1-1 | válec |
| | 1 | NA1-2 | válec |
| | 1 | NA1-3 | válec |
| | 1 | NA1-1 | trámec |
| | 1 | NA1-2 | trámec |
| | 1 | NA1-3 | trámec |
| | 2 | NA2-1 | válec |
| | 2 | NA2-2 | válec |
| | 2 | NA2-3 | válec |
| | 2 | NA2-1 | trámec |
| | 2 | NA2-2 | trámec |
| | 2 | NA2-3 | trámec |
| Beton s recyklovaným betonovým kamenivem (RAC-C) | 1 | RA-C1-1 | válec |
| | 1 | RA-C1-2 | válec |
| | 1 | RA-C1-3 | válec |
| | 1 | RA-C1-1 | trámec |
| | 1 | RA-C1-2 | trámec |

| | | | |
|--|---------|---------|--------|
| | 1 | RA-C1-3 | trámec |
| | 2 | RA-C2-1 | válec |
| | 2 | RA-C2-2 | válec |
| | 2 | RA-C2-3 | válec |
| | 2 | RA-C2-1 | trámec |
| | 2 | RA-C2-2 | trámec |
| | 2 | RA-C2-3 | trámec |
| Beton s recyklovaným směsným kamenivem (RAC-M) | 2 | RA-M2-1 | válec |
| | 2 | RA-M2-2 | válec |
| | 2 | RA-M2-3 | válec |
| | 2 | RA-M2-1 | trámec |
| | 2 | RA-M2-2 | trámec |
| | 2 | RA-M2-3 | trámec |
| | 3 | RA-M3-1 | válec |
| | 3 | RA-M3-2 | válec |
| | 3 | RA-M3-3 | válec |
| | 3 | RA-M3-1 | trámec |
| | 3 | RA-M3-2 | trámec |
| 3 | RA-M3-3 | trámec | |

4.3.3. Zpracovatelnost čerstvé betonové směsi

Zpracovatelnost čerstvé betonové směsi byla zkoušena dle normy ČSN EN 12350-2 [193] (Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím). Zkouška byla provedena dle pokynů normy pomocí dutého kuželu (Abrams), propichovací tyče a hladké podkladní desky. Sednutí kužele bylo porovnáno s údaji z normy ČSN EN 206+A2 [66] (4.2.1 Klasifikace konzistence – Tabulka 3 – Klasifikace konzistence podle sednutí kužele).

Hodnoty sednutí kužele jsou zobrazeny v následujícím grafu na Obr. č.42.



Obr. č.42 – Výsledky zkoušky zpracovatelnosti jednotlivých záměsů – sednutí kužele.



Obr. č.43 – Ukázka zkoušky sednutí kužele – záměs RA-M2 – beton s recyklovaným směsným kamenivem (foto autorky).

Sednutí kužele vycházelo velmi variabilně i u stejných receptur betonu, tento jev může být způsoben nestejnorodostí použitého směsného recyklátu. Pro betonové směsi s přírodním kamenivem a recyklovaným betonovým kamenivem vychází konzistence S2, konzistence betonu s recyklovaným směsným kamenivem spadá do třídy S3.

4.3.4. Ukládání betonových směsí do forem

Po provedení zkoušky sednutí byly z každé záměsi naplněny tři formy pro válce a trávce ošetřené olejem. Formy byly uloženy na vibračním stole, vibrování proběhlo ve dvou cyklech po 30 sekundách při 100 Hz, plnění forem probíhalo postupně.



Obr. č.44 – Uložení betonové záměsi do forem (foto autorky).

Je třeba poznamenat, že při vibrování docházelo u části válcových kovových forem k vytékání cementového mléka kvůli netěsnostem ve spojích, jak je vidět na Obr. č.45.



Obr. č.45 – Cementové mléko vytékající z netěsnících forem (foto autorky).

Beton byl následně ošetřován kropením vodou až do odbednění forem následujícího dne.

4.3.5. Odbednění

Odbednění proběhlo přibližně 24 hodin po betonáži. Vzorky byly poté uloženy do kádě s vodou, kde byly ponechány až do doby zkoušení jejich mechanických vlastností.



Obr. č.46 – Vzorky po odbednění, uložené do vody (foto autorky).

4.4. Zkoušení vlastností ztvrdlého betonu

Zkoušky probíhaly vzhledem k časovým možnostem po 13 až 16 dnech od betonáže vzorků v laboratoři Katedry betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze. Teplota v laboratoři při zkoušení vzorků byla 25 °C, vlhkost 37 %.

Před zkouškami bylo provedeno broušení válcových těles při spodním a horním povrchu. Poté byly všechny vzorky změřeny a zváženy. Ze struktury zbroušeného povrchu válců z betonu s recyklovaným smíšeným kamenivem lze vyvodit, že došlo k segregaci kameniva, keramické části s menší objemovou hmotností vystoupaly k hornímu povrchu válce a velké frakce přírodního kameniva klesly ke spodnímu povrchu válce, viz Obr. č.47 a Obr. č.48.



Obr. č.47 – Těleso betonu s recyklovaným smíšeným kamenivem (RA-M2-1) – vlevo: spodní povrch po broušení, vpravo: horní povrch po broušení (foto autorky).



Obr. č.48 – Těleso betonu s recyklovaným smíšeným kamenivem (RA-M3-2) – vlevo: spodní povrch po broušení, vpravo: horní povrch po broušení (foto autorky).

Segregace hrubého kameniva nastala i přes to, že konzistence těchto záměsí byla zaříděna jako S3. Vyplavání lehčích částic v recyklovaném smíšeném kamenivu přitom obecně hrozí především u konzistencí tekutějších než S4.

4.4.1. Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla stanovena výpočtem ze změřených skutečných rozměrů dle normy ČSN EN 12390-7 [194].

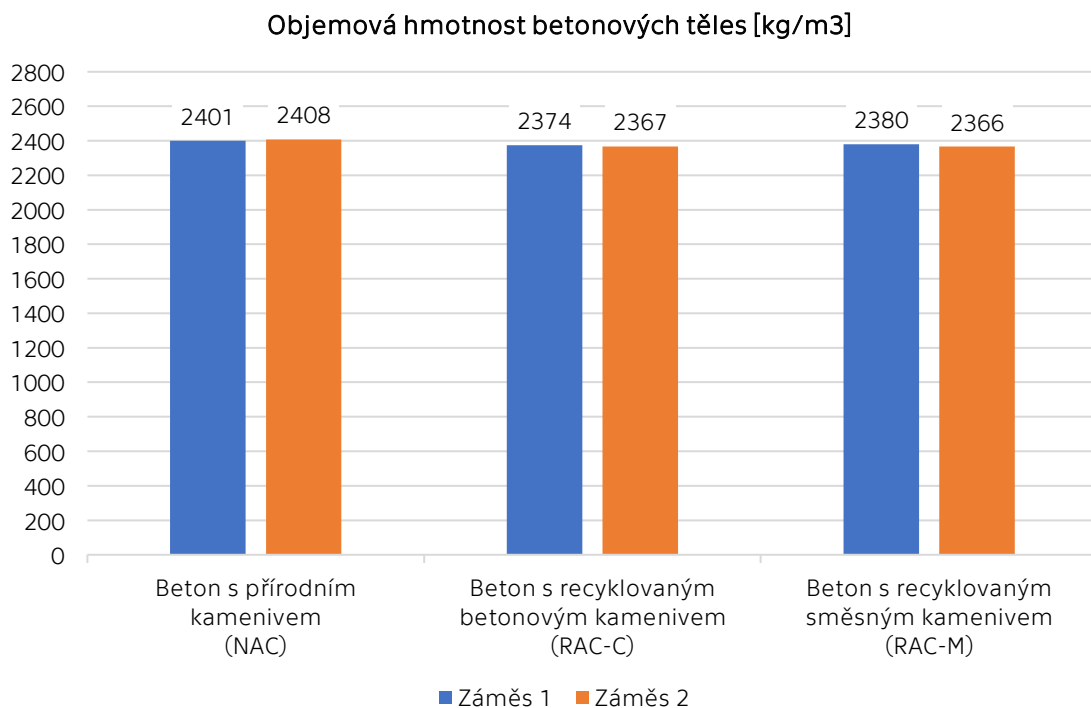
Níže jsou uvedeny průměrné objemové hmotnosti povrchově oschlých těles z jedné záměsi měřené po 9 až 10 dnech. Objemová hmotnost byla vypočtena ze vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

kde:

- ρ je objemová hmotnost betonového tělesa [kg/m³]
 m je hmotnost tělesa zvážená na laboratorní váze (u válců po zbrúšení) [kg]
 V je objem vypočítaný z naměřených rozměrů těles (u válců po zbrúšení) [m³]

Rozměry těles byly měřeny po 9 až 10 dnech od betonáže. Objemová hmotnost byla spočítána pro válce i trámce, hodnoty uvedené níže jsou průměrnými hodnotami objemových hmotností pro válcová tělesa, u kterých lze očekávat přesnější výsledky po zbrúšení horního a spodního povrchu.



Průměrná objemová hmotnost betonu s přírodním kamenivem vyšla (po zaokrouhlení na 10 kg/m³) 2400 kg/m³, s betonovým recyklátem 2370 kg/m³ a se směsným recyklátem 2370 kg/m³.

Z výsledků objemové hmotnosti betonových těles vyplývá, že beton s recyklovaným kamenivem má dle předpokladu nižší objemovou hmotnost než beton s přírodním kamenivem. Důvodem je nižší objemová hmotnost recyklovaného kameniva oproti přírodnímu vlivem vyššího obsahu vzduchových pórů v recyklovaném kamenivu a vlivem obsahu složek s nižší objemovou hmotností. Pokud by byla náhrada přírodního kameniva za recyklát stejná pro recyklované betonové i směsné kamenivo, lze předpokládat, že nejmenší objemovou hmotnost by měl beton s recyklovaným směsným kamenivem. Nicméně zkoušky byly prováděny pro receptury, kdy směsný recyklát nahrazuje 11 % a betonový recyklát 16 % z celkové hmotnosti kameniva.

4.4.2. Válcová pevnost betonu v tlaku

Válcová pevnost v tlaku byla zkoušena dle normy ČSN EN 12390-3 [195] po 13 až 16 dnech od betonáže vzorků na 18 válcích Ø150 mm, délky 300 mm. Jedná se o zkoušku destruktivní. Tělesa byla zatěžována centrickým tlakem, rychlostí 11 kN/s (přibližně 0,6 MPa/s). Před zkouškou byly styčné zbroušené plochy zbaveny nečistot, které mohou způsobit nerovnoměrné roznášení síly.

Při zkouškách byl pozorován podobný způsob porušení u všech vzorků, při dosažení meze pevnosti docházelo k prudkému puknutí a někdy i roztříštění vzorku na mnoho částí.



Obr. č.49 – Válcová tělesa po zkoušce pevnosti v tlaku (foto autorky).

Byla zaznamenána maximální zatěžovací síla a z ní vypočtena pevnost betonu v závislosti na geometrii vzorku dle normy ČSN EN 12390-3 [195].

$$f_c(t) = \frac{F_{max}}{A_{avg}} \quad (4)$$

kde:

- $f_c(t)$ je válcová pevnost v tlaku v čase t [MPa]
 F_{max} je maximální zatížení při porušení vzorku [N]
 A_{avg} je průměrná plocha průřezu válce [mm²]

Pro získání referenční pevnosti po 28 dnech byly výsledky přepočítány pomocí vzorců z normy ČSN EN 1992-1-1 [196]. Zde je uvedeno, že pevnost v tlaku betonu různého stáří může být stanovena dle vzorce (5) a (6).

Lze předpokládat, že vývoj pevnosti u betonů s recyklovaným kamenivem se může mírně lišit, nicméně v tomto případě byla náhrada přírodního kameniva za recykláty velmi malá.

$$f_c(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_c \quad (5)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (6)$$

kde:

- f_c je válcová pevnost v tlaku plně vyztuženého betonu (28 dní) [MPa]
 $\beta_{cc}(t)$ součinitel popisující vývoj vlastností betonu v čase [-]
 t je stáří betonu [dny]
 s je koeficient závislý na typu cementu [-]
 = 0,2 pro cement pevnostních tříd CEM 42,5 R, CEM 52,5 R a CEM 52,5 R (třída R)
 = 0,25 pro cement pevnostních tříd CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (třída N)
 = 0,38 pro cement pevnostních tříd CEM 32,5 N (třída S)

Do vzorců byl dosazen čas t dle stáří jednotlivých vzorků v době provádění zkoušek, pro použitý typ cementu je koeficient $s = 0,2$. Byly tak získány výsledky pro $\beta_{cc}(t)$ a následně byla vypočítána střední hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku f_{cm} . Pro získání charakteristické hodnoty válcové pevnosti v tlaku bylo postupováno dle normy ČSN EN 1990 [197]. Výpočet byl odvozen ze vzorce (D.1) této normy, viz vzorec (7).

$$f_{ck} = f_{cm} \cdot (1 - k_n \cdot V_{f-c}) \quad (7)$$

kde:

- f_{ck} je charakteristická hodnota pevnosti v tlaku [MPa]
 f_{cm} je střední hodnota pevnosti v tlaku [MPa]
 k_n je koeficientu kvantilu charakteristické hodnoty [-]
 V_{f-c} je korelační koeficient pro válcovou pevnost v tlaku [-]

Koeficient k_n je závislý na počtu provedených zkoušek, jeho hodnota se odečte z tabulky D.1 z ČSN EN 1990 [197]. Válcová pevnost v tlaku byla zkoušena na šesti tělesech pro každou betonovou směs (NAC, RAC-C, RAC-M), tedy počet zkoušek je $n = 6$ a $k_6 = 2,18$. Korelační koeficient V_{f-c} byl před zkouškami neznámý (tyto směsi byly zkoušeny poprvé).

Korelační koeficient se vypočte jako podíl směrodatné odchylky z válcových pevností v tlaku po 28 dnech a průměrné hodnoty pevnosti po 28 dnech (ČSN EN 1990 [197] – příloha D), viz vzorec (8). Čím větší tedy korelační koeficient je, tím byly naměřené hodnoty více rozptýlené.

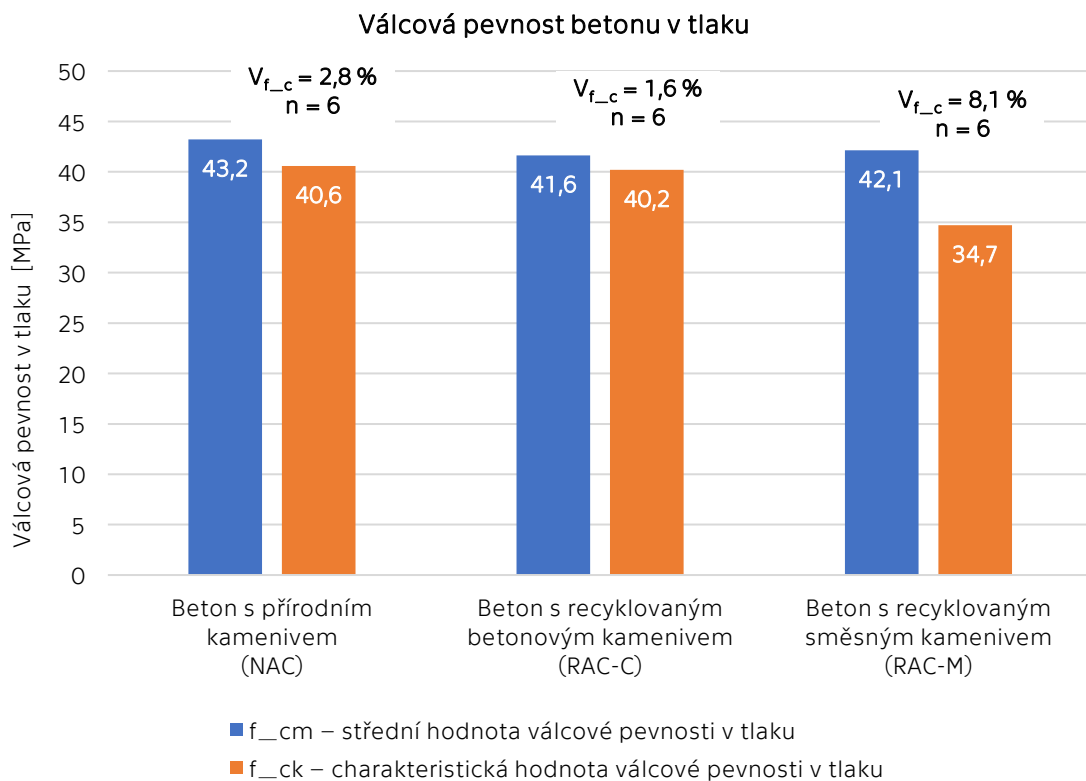
$$V_{f,c} = \frac{s_{f,c}}{m_{f,c}} \quad (8)$$

kde:

$s_{f,c}$ je směrodatná odchylka z válcových pevností v tlaku po 28 dnech

$m_{f,c}$ je průměrná hodnota válcových pevností v tlaku po 28 dnech

V grafu na Obr. č.50 jsou zobrazeny střední a charakteristické hodnoty válcové pevnosti betonu v tlaku pro tři zkoušené receptury betonových směsí. Výsledky zatřídění betonových směsí do pevnostních tříd jsou uvedeny dále v Tab. 28 v kapitole 4.4.5.



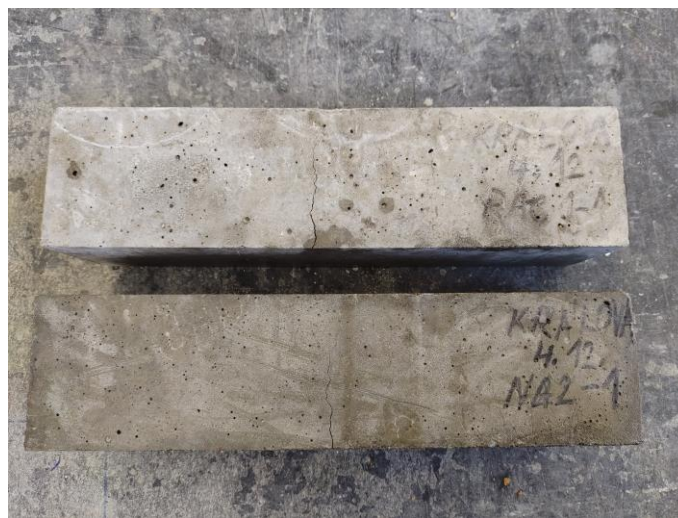
Obr. č.50 – Výsledky zkoušek válcové pevnosti v tlaku.

Hodnoty u betonu s recyklovaným směsným kamenivem měly vysoký rozptyl, z toho důvodu vychází u této směsi vyšší korelační koeficient a následně nižší charakteristická válcová pevnost v tlaku než u ostatních betonových směsí, přestože střední hodnota válcové pevnosti v tlaku je srovnatelná. Důvodem rozptýlených výsledků naměřených pevností může být variabilita kameniva, u těchto směsí (RAC-M) byla pozorována nejednotnost vlastností již při měření konzistence čerstvého betonu.

4.4.3. Pevnost betonu v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla testována dle normy ČSN EN 12390-5 [198] po 13 až 14 dnech na 18 trámčích o rozměrech 100 x 100 x 400 mm. Trámce byly zkoušeny jako prostý nosník

na hydraulickém lisu na čtyřbodový ohyb, rychlost zatěžování byla 0,2 mm/min. Jednalo se o zkoušky destruktivní.



Obr. č.51 – Trámce po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (foto autorky).

Z výsledných zatěžovacích sil byly vypočteny ohybové pevnosti betonů dle normy ČSN EN 12390-5 [198].

$$f_{ct,fl}(t) = 0,5 \cdot F_{max} \cdot 10^3 \cdot \frac{L_F}{W} \quad (9)$$

$$W = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 \quad (10)$$

$$L_F = \frac{L_{eff}}{3} \quad (11)$$

kde:

- $f_{ct,fl}(t)$ je hodnota tahové pevnosti v ohybu v čase t [MPa]
 F_{max} je maximální hodnota zatěžovací síly při zkoušce ohybem [kN]
 L_F je vodorovná vzdálenost zatěžovacího válce od podpory [mm]
 L_{eff} je rozpětí trámce mezi podporami [mm]
 b je šířka trámce [mm]
 h je výška trámce [mm]
 W je průřezový modul [mm³]

Hodnota průřezového modulu byla spočtena pomocí průměrných rozměrů naměřených na tělesech.

Pro získání referenční pevnosti v prostém tahu po 28 dnech bylo nejprve nutné převést tahovou pevnost v ohybu na pevnost v prostém tahu dle požadavků normy ČSN EN 1992-1-1 [196]. V kapitole 3.1.8 (Pevnost v tahu za ohybu) této normy je uveden vzorec (12) pro vztah mezi tahovou pevností v ohybu a pevností v prostém tahu.

$$f_{ct,fl} = \max \left\{ \left(1,6 - \frac{h}{1000} \right) \cdot f_{ct}; f_{ct} \right\} \quad (12)$$

kde:

$f_{ct,fl}$ je hodnota tahové pevnosti v ohybu [MPa]
 f_{ct} je hodnota pevnosti v prostém tahu [MPa]
 h je celková výška tělesa [mm]

Za hodnotu celkové výšky tělesa byla dosazena průměrná hodnota z naměřených výšek jednotlivých vzorků.

Dílčí hodnoty $f_{ct}(t)$ byly přepočítány na 28-denní pevnost pomocí vzorců z normy ČSN EN 1992-1-1 [196]. Zde je uvedeno, že pevnost v prostém tahu betonu různého stáří může být stanovena dle vzorce (13). Výpočet součinitele $\beta_{cc}(t)$ je uveden výše ve vzorci (6).

$$f_{ct}(t) = (\beta_{cc}(t))^\alpha \cdot f_{ct} \quad (13)$$

kde:

$f_{ct}(t)$ je hodnota pevnosti v prostém tahu v čase t [MPa]
 f_{ct} je hodnota pevnosti v prostém tahu po 28 dnech [MPa]
 α je koeficient vývoje tahové pevnosti betonu v čase [-]; $\alpha = 1$ pro $t < 28$ dní

Do vzorců byl dosazen čas t dle stáří jednotlivých vzorků v době provádění zkoušek, pro použitý typ cementu je koeficient $s = 0,2$. Byly tak získány výsledky pro $\beta_{cc}(t)$ a následně byla vypočítána střední hodnota pevnosti v prostém tahu f_{ctm} . Pro získání charakteristické hodnoty pevnosti v prostém tahu bylo postupováno dle obdobného vztahu jako v předchozí kapitole.

$$f_{ctk} = f_{ctm} \cdot (1 - k_n \cdot V_{f_{ct}}) \quad (14)$$

kde:

f_{ctk} je charakteristická hodnota pevnosti v prostém tahu [MPa]
 f_{ctm} je střední hodnota pevnosti v prostém tahu [MPa]
 k_n je charakteristická hodnota koeficientu kvantilu [-]
 $V_{f_{ct}}$ je korelační koeficient pro pevnost v prostém tahu [-]

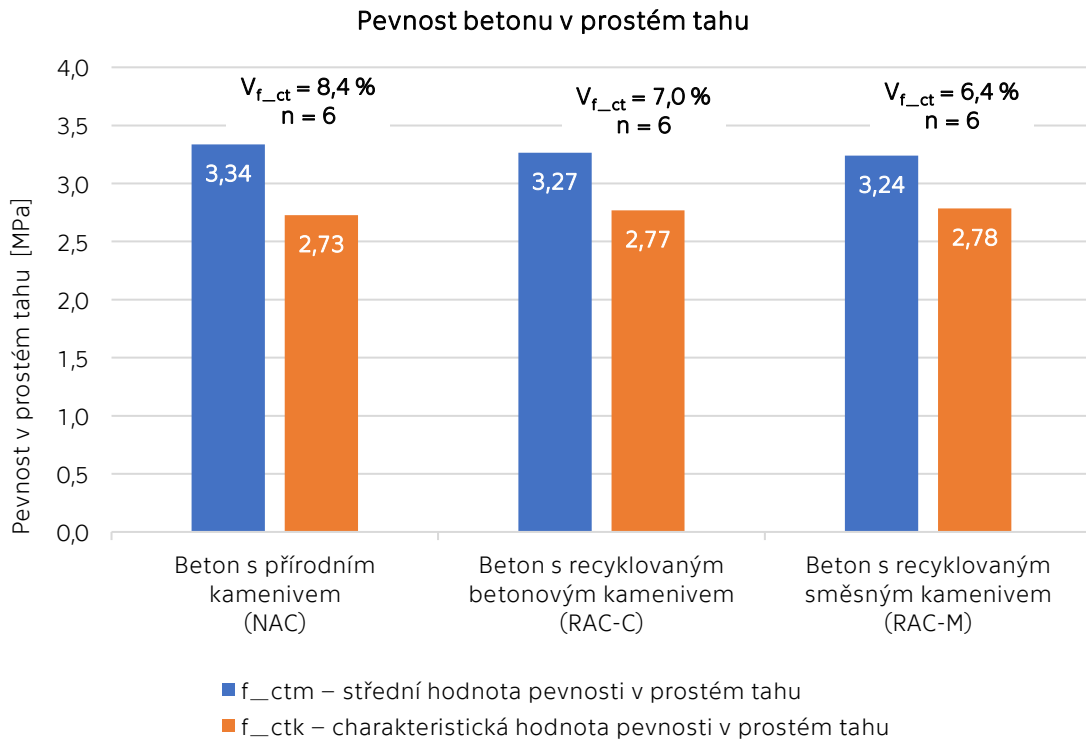
Koeficient k_n opět nabývá hodnoty 2,18. Popis výpočtu a význam korelačního koeficientu byl uveden v předchozí kapitole.

$$V_{f_{ct}} = \frac{s_{f_{ct}}}{m_{f_{ct}}} \quad (15)$$

kde:

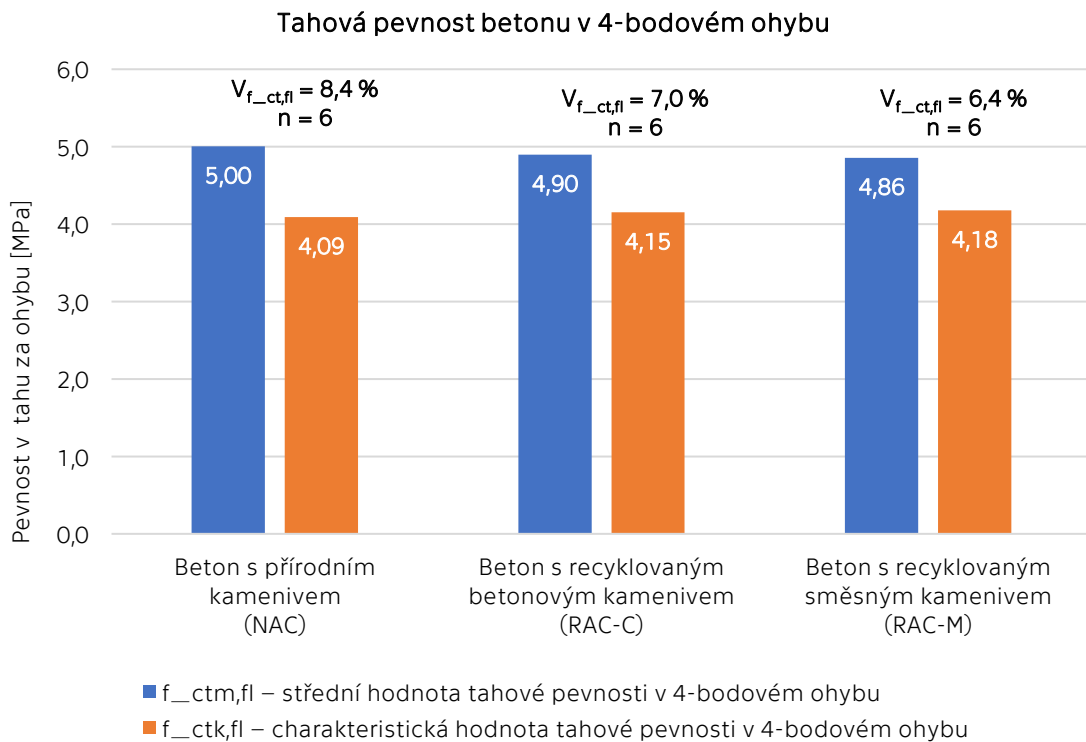
$s_{f_{ct}}$ je směrodatná odchylka z pevností v prostém tahu [MPa]
 $m_{f_{ct}}$ je střední hodnota pevností v prostém tahu [MPa]

V grafu na Obr. č.52 jsou zobrazeny střední a charakteristické hodnoty pevnosti betonu v prostém tahu pro tři receptury betonových směsí.



Obr. č.52 – Hodnoty pevnosti v prostém tahu přepočtené z výsledků ohybových zkoušek.

Pro porovnání je na Obr. č.53 uveden i graf tahových pevností v ohybu, přepočítaných stejným způsobem na střední a charakteristické hodnoty.



Obr. č.53 – Výsledky zkoušek pevnosti v tahu za ohybu.

Výsledky pevností v prostém tahu jsou podobné u všech betonových směsí pro střední i charakteristické hodnoty. Je překvapivé, že oproti zkoušce válcové pevnosti v tlaku, má v případě tahových zkoušek nejvyšší korelační koeficient beton s přírodním kamenivem, to znamená, že naměřené hodnoty měly největší rozptyl. Naopak u betonu s recyklovaným směsných kamenivem je korelační koeficient nejnižší ze všech tří směsí. I přes tuto skutečnost jsou rozdíly minimální.

4.4.4. Modul pružnosti

Statický sečnový modul pružnosti v tlaku byl zkoušen dle normy ČSN ISO 1920-10 [198] po 15 až 16 dnech na 12 válcích Ø150 mm, délky 300 mm. Jedná se o zkoušku nedestruktivní. Zkoušky modulu pružnosti byly provedeny po vyzkoušení dvou tlakových pevností od každé receptury. Na zkoušených válcích (na modul pružnosti) byly poté provedeny i zkoušky pevnosti v tlaku. Před zkouškou byly styčné zbroušené plochy zbaveny nečistot, které mohou způsobit nerovnoměrné roznášení síly.



Obr. č.54 – Válcové těleso při zkoušce statického modulu pružnosti (foto autorky).

Naměřené hodnoty statického modulu pružnosti byly přepočítány dle reálných rozměrů jednotlivých těles, čímž byly získány hodnoty modulu pružnosti $E_c(t)$ v okamžiku zkoušky. Následně byl proveden výpočet pro stanovení hodnoty statického modulu pružnosti po 28 dnech dle normy ČSN EN 1992-1-1 [196], vzorce (16). Výpočet součinitele $\beta_{cc}(t)$ je uveden ve vzorci (6).

$$E_c(t) = \left(\frac{f_c(t)}{f_c} \right)^{0,3} \cdot E_{cm} = (\beta_{cc}(t))^{0,3} \cdot E_c \quad (16)$$

kde:

$E_c(t)$ je hodnota statického modulu pružnosti v čase t [GPa]

Byly vypočteny hodnoty $\beta_{cc}(t)$ a následně byla vypočítána střední hodnota statického modulu pružnosti v tlaku E_{cm} . Pro získání charakteristické hodnoty bylo postupováno obdobně jako v přechozích kapitolách, viz vzorec (17).

$$E_{ck} = E_{cm} \cdot (1 - k_n \cdot V_{E_c}) \quad (17)$$

kde:

- E_{ck} charakteristická hodnota statického modulu pružnosti v tlaku [MPa]
 E_{cm} střední hodnota statického modulu pružnosti v tlaku [MPa]
 V_{E_c} korelační koeficient pro hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku [-]

Statický modul pružnosti v tlaku byl zkoušen na čtyřech tělesech pro každou betonovou směs (NAC, RAC-C, RAC-M), tedy počet zkoušek je $n = 4$ a $k_4 = 2,63$.

Výpočet korelačního koeficientu byl opět obdobný jako v předchozích kapitolách.

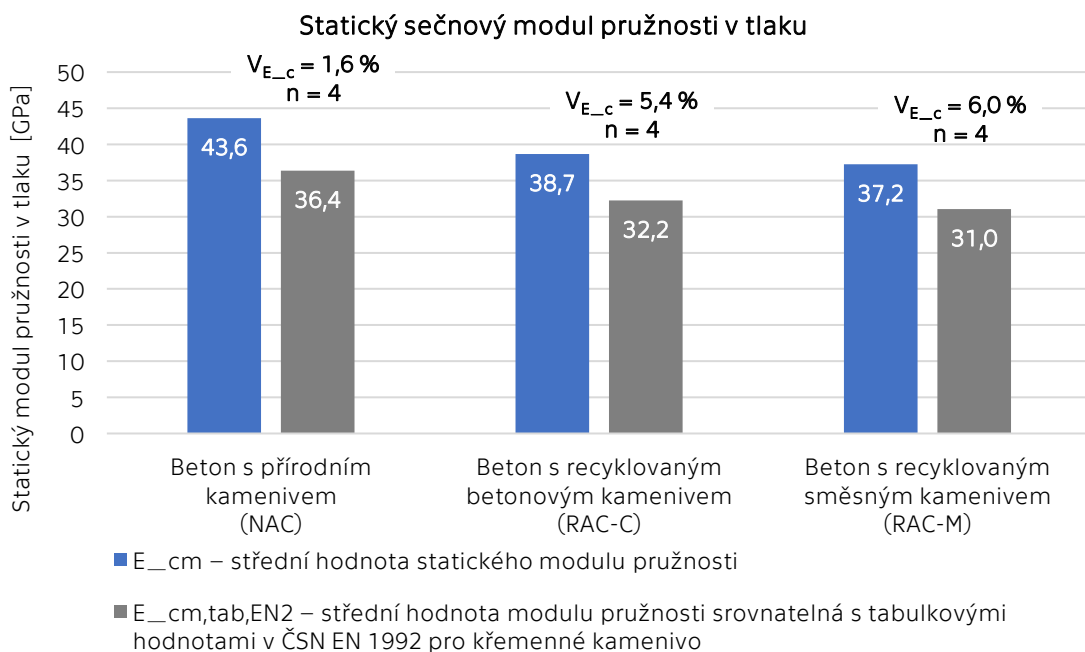
$$V_{E_c} = \frac{s_{E_c}}{m_{E_c}} \quad (18)$$

kde:

- s_{E_c} je směrodatná odchylka z jednotlivých statických modulů pružnosti
 m_{E_c} je průměrná hodnota statického modulu pružnosti

Modul pružnosti betonu dále závisí na modulu pružnosti jeho složek. Dle normy ČSN EN 1992-1-1 [196] má být hodnota modulu pružnosti upravena dle použitého druhu kameniva. Kamenivo použité v experimentech se skládalo z různých druhů hornin, viz kapitola 4.3.1, které jsou podobné kamenivu čedičovému. Norma ČSN EN 1992-1-1 [196] uvádí v kapitole 3.1.3 bod (2), že pro tento druh kameniva má být hodnota modulu pružnosti při návrhu zvětšena o 20 %. Proto, aby bylo možné porovnat naměřené hodnoty s hodnotami v normě, bylo třeba modul pružnosti naopak snížit (tedy v tom případě vydělit koeficientem 1,2), jelikož hodnoty uvedené v normě ($E_{cm,tab,EN2}$) odpovídají křemennému kamenivu s nižším modulem pružnosti.

V grafu na Obr. č.55 jsou zobrazeny střední hodnoty statických modulů pevnosti v tlaku a hodnoty po úpravě dle použitého typu kameniva.



Obr. č.55 – Výsledky zkoušek statického sečnového modulu pružnosti v tlaku.

Z výsledků je patrný vliv používání recyklovaného kameniva do betonu na hodnoty statického modulu pružnosti. Podobné závěry se objevují téměř ve všech výzkumech zaměřených na betony s recyklovaným kamenivem a aktuálně tento jev představuje hlavní úskalí pro používání RAC do ohýbaných konstrukcí (nebo jiných konstrukcí obecně náchylných na deformace), především v případě většího zastoupení recyklátů v kamenivu.

4.4.5. Zatřídění vyrobeného betonu

Výsledky experimentů byly v závěru zatříděny dle normy ČSN EN 1992-1-1 [195] pro získání pevnostní třídy betonů. V Tab. 28 jsou kromě stanoveného zatřídění dle válcové pevnosti v tlaku uvedeny i informativní (odpovídající) třídy betonu dle dalších prováděných zkoušek, tj. statického modulu pružnosti v tlaku a pevnosti v prostém tahu, které ovšem obecně nejsou rozhodující pro zatřídění betonu, nejsou-li přímo předepsány projektantem v dokumentaci.

Tab. 28 – Zatřídění zkoušených betonových směsí do pevnostních tříd.

| Zatřídění dle ČSN EN 1992-1-1 | Beton s přírodním kamenivem (NAC) | Beton s recykl. betonovým kamenivem (RAC-C) | Beton s recykl. směsným kamenivem (RAC-M) |
|--|-----------------------------------|---|---|
| Pevnostní třída betonu dle charakteristické válcové pevnosti v tlaku | C40/50 | C40/50 | C30/37 |
| Informativní třída betonu dle průměrného statického modulu pružnosti | C45/55 | C25/30 | C20/25 |
| Informativní třída betonu dle průměrné pevnosti v prostém tahu | C35/45 | C35/45 | C35/45 |

Díky výsledkům experimentů a následnému zatřídění betonových směsí dle válcové pevnosti v tlaku bylo prokázáno, že všechny navržené betonové směsi C25/30 XC1 jsou vhodné pro použití do konstrukcí ve vybraném projektu (požadavek na pevnostní třídu C25/30 byl bezpečně splněn, dokonce výrazně překonán) a jejich receptury je možné použít pro hodnocení životního cyklu těchto betonů v projektu.

Betony pro podkladní a výplňové konstrukce dále řešeného projektu (C16/20 X0, C16/20 XC1) nebyly podrobeny experimentům z důvodu časové náročnosti, nicméně i na základě výsledků dosažených v této kapitole lze předpokládat, že receptury jsou rovněž vyhovující.

5. Vícekriteriální porovnání použití betonů s přírodním a recyklovaným kamenivem a LCA analýza pro konkrétní projekt

5.1. Cíle kapitoly

V následující části diplomové práce je na konkrétním projektu pomocí metody hodnocení životního cyklu (LCA) porovnán dopad použití betonů s recyklovaným kamenivem a použití betonů s přírodním kamenivem. Vyhodnoceno je také finanční hledisko těchto variant.

Pro tyto účely byl vybrán projekt obsahující betonové konstrukce vhodné pro využití betonu s recyklovaným kamenivem. Pro možnost porovnání dopadů na životní prostředí vybraných betonových konstrukcí bylo nutné znát jednotlivé složky betonových směsí, byly tak navrženy receptury pro beton třídy C16/20 X0, C16/20 XC1 a C25/30 XC1 (na základě požadavků projektu). Každá směs byla navržena ve třech variantách – s přírodním kamenivem, s částečnou náhradou hrubé frakce přírodního kameniva za betonový recyklát a s částečnou náhradou hrubé frakce přírodního kameniva za směsný recyklát. Procento nahrazení hrubé frakce přírodního kameniva za recykláty bylo provedeno dle doporučení normy ČSN EN 206+A2 [66] – tabulka E.2. Návrh betonových směsí je popsán v kapitole č. 4.2.3.

Dále byla provedena kalkulace finančních nákladů pro navržené betonové směsi pomocí dat z cenové soustavy ÚRS [199]. Finanční porovnání bylo provedeno i pomocí nabídkových cen dodavatelů betonu uveřejněných na jejich webových stránkách.

5.2. Představení objektu základní a mateřské školy v Praze 9

Projekt byl vyhledán ve věstníku veřejných zakázek [200], jedná se o novostavbu Základní a mateřské školy Elektra v Praze 9–Vysočanech. Objekt tvoří tři hlavní části, které na sebe navzájem navazují, s proměnlivým počtem nadzemních a podzemních podlaží. Nosné konstrukce jsou tvořeny převážně ze železobetonu.

Založení objektu je v celém rozsahu navrženo jako kombinované na velkopřůměrových vrtaných železobetonových pilotách a základové desce. Z hlediska ochrany proti spodní vodě je základová deska i celá konstrukce suterénu koncipována jako tzv. bílá vana. Nosnou konstrukcí v suterénu je železobetonový monolitický skelet, tvořený železobetonovými stropními deskami a sloupy, doplněný o obvodové stěny a stěny komunikačních jader. Konstrukčním systémem nadzemních podlaží je železobetonový monolitický sloupový skelet s nosnými obvodovými fasádními stěnami, doplněný o nosné stěny komunikačních jader. Stropní desky nadzemních podlaží i atiky jsou z monolitického železobetonu. Střecha je jednoplášťová plochá s klasickým pořadím vrstev. Vnější fasáda objektu základní a mateřské školy je částečně řešena jako provětrávaná fasáda, převážně však pomocí kontaktního zateplovacího systému. Další informace lze najít v technické zprávě statické části projektu a přiložených výkresech, které jsou součástí Přílohy B této práce.

5.2.1. Možnost využití betonu s recyklovaným kamenivem

V Tab. 29 jsou sepsány všechny betonové konstrukce ve vybraném projektu, které byly uvedeny ve výkazu výměr. V tabulce jsou zvýrazněny konstrukce, které jsou vhodné pro využití betonu s recyklovaným kamenivem. Celková výměra těchto konstrukcí je 1690 m³, jedná se

o nenosné, výplňové i nosné konstrukce. Náhrada hrubé frakce přírodního kameniva za recyklát byla provedena u betonů tříd C16/20 X0, C16/20 XC1 a C25/30 XC1.

Tab. 29 – Výkaz výměr monolitických betonových konstrukcí v projektu základní a mateřské školy.

| PČ | Typ | Kód | Popis | MJ | Množství | Použití RAC |
|---------------|-----|------------|---|----------------|-----------|-------------|
| 12 | K | 2311-12113 | Zřízení výplně pilot bez vytažení pažnic nezapažených nebo zapažených bentonitovou suspenzí svislých z betonu železového, v hl od 0 do 10 m, při průměru piloty přes 650 do 1250 mm | m | 1 260,000 | |
| 13 | M | 5893-3328 | beton C30/37 XF1 kamenivo frakce 0/8 | m ³ | 612,006 | NE |
| 14 | K | 2733-13611 | Základy z betonu prostého desky z betonu kamenem neprokládaného tř. C16/20 | m ³ | 171,550 | ANO |
| 15 | K | 2733-21311 | Základy z betonu železového (bez výztuže) desky z betonu bez zvláštních nároků na prostředí tř. C16/20 | m ³ | 466,560 | ANO |
| 16 | K | 2733-23511 | Základy z betonu železového (bez výztuže) desky z betonu pro konstrukce bílých van tř. C25/30 | m ³ | 0,700 | NE |
| 17 | K | 2733-23611 | Základy z betonu železového (bez výztuže) desky z betonu pro konstrukce bílých van tř. C30/37 | m ³ | 1 414,600 | NE |
| 24 | K | 2743-23611 | Základy z betonu železového (bez výztuže) pasy z betonu pro konstrukce bílých van tř. C30/37 | m ³ | 27,900 | NE |
| 23 | K | 2743-13611 | Základy z betonu prostého pasy betonu kamenem neprokládaného tř. C16/20 | m ³ | 16,640 | ANO |
| 28 | K | 2791-13131 | Základové zdi z tvárnice ztraceného bednění včetně výplně z betonu bez zvláštních nároků na vliv prostředí třídy C16/20, tloušťky zdiva 150 mm | m ² | 210,252 | |
| součást PČ 28 | | | Výplň z betonu tř. C16/20 | m ³ | 15,285 | ANO |
| 29 | K | 2793-23112 | Základové zdi z betonu železového (bez výztuže) pro konstrukce bílých van tř. C30/37 | m ³ | 595,800 | NE |
| 43 | K | 3113-21411 | Nadzákladové zdi z betonu železového (bez výztuže) nosné bez zvláštních nároků na vliv prostředí tř. C25/30 | m ³ | 890,500 | ANO |
| 44 | K | 3113-21814 | Nadzákladové zdi z betonu železového (bez výztuže) nosné pohledového (v přírodní barvě drtí a přísad) tř. C25/30 | m ³ | 24,500 | NE |
| 51 | K | 3123-21411 | Nadzákladové zdi z betonu železového (bez výztuže) výplňové bez zvláštních nároků na vliv prostředí tř. C25/30 | m ³ | 60,800 | ANO |
| 68 | K | 3173-21311 | Překlady z betonu železového (bez výztuže) tř. C16/20 | m ³ | 0,980 | ANO |
| 76 | K | 3303-21810 | Sloupy, pilíře, táhla, rámové stojky, vzpěry z betonu železového (bez výztuže) bez zvláštních nároků na vliv prostředí tř. C40/50 | m ³ | 61,000 | NE |
| 77 | K | 3303-21812 | Sloupy, pilíře, táhla, rámové stojky, vzpěry z betonu železového (bez výztuže) odolného proti agresivnímu prostředí tř. C40/50 | m ³ | 23,400 | NE |
| 78 | K | 3303-21813 | Sloupy, pilíře, táhla, rámové stojky, vzpěry z betonu železového (bez výztuže) pohledového odolného proti agresivnímu prostředí tř. C40/50 | m ³ | 22,900 | NE |
| 96 | K | 3453-21515 | Zídky atikové, poprsní, schodiškové a zábradelní z betonu železového bez výztuže tř. C25/30 | m ³ | 55,800 | ANO |

| | | | | | | |
|-----|---|------------|---|----------------|-----------|-----|
| 101 | K | 4113-21414 | Stropy z betonu železového (bez výztuže) stropů deskových, plochých střech, desek balkonových, desek hříbových stropů včetně hlavic hříbových sloupů tř. C25/30 | m ³ | 1 225,200 | NE |
| 102 | K | 4113-21616 | Stropy z betonu železového (bez výztuže) stropů deskových, plochých střech, desek balkonových, desek hříbových stropů včetně hlavic hříbových sloupů tř. C30/37 | m ³ | 558,292 | NE |
| 103 | K | 4113-24646 | Stropy z betonu železového (bez výztuže) pohledového stropů deskových, plochých střech, desek balkonových, desek hříbových stropů včetně hlavic hříbových sloupů tř. C30/37 | m ³ | 614,700 | NE |
| 118 | K | 4133-21414 | Nosníky z betonu železového (bez výztuže) včetně stěnových i jeřábových drah, volných trámů, průvlaků, rámových příčlů, ztužidel, konzol, vodorovných táhel apod., tyčových konstrukcí tř. C25/30 | m ³ | 4,500 | NE |
| 124 | K | 4303-21414 | Schodištvé konstrukce a rampy z betonu železového (bez výztuže) stupně, schodnice, ramena, podesty s nosníky tř. C25/30 | m ³ | 8,100 | NE |
| 125 | K | 4303-21616 | Schodištvé konstrukce a rampy z betonu železového (bez výztuže) stupně, schodnice, ramena, podesty s nosníky tř. C30/37 | m ³ | 1,000 | NE |
| 177 | K | 6313-11114 | Mazanina z betonu prostého bez zvýšených nároků na prostředí tl. přes 50 do 80 mm tř. C16/20 | m ³ | 57,347 | NE |
| 198 | K | 9169-91121 | Lože pod obrubníky, krajníky nebo obruby z dlažebních kostek z betonu prostého tř. C16/20 | m ³ | 11,520 | ANO |

V Tab. 30 jsou vybrané konstrukce doplněny o specifikace požadavků pro použití betonu s recyklovaným kamenivem. Maximální doporučené procento nahrazení přírodního kameniva v betonu recyklátem je určeno dle doporučení normy ČSN EN 206+A2 [66], viz kapitola 1.4.1.3.

Tab. 30 – Tabulka vybraných konstrukcí pro použití betonu s recyklovaným kamenivem.

| Popis | MJ | Množství | Stupeň vlivu prostředí | Doporučené % náhrady hrubé frakce kameniva za recyklát | |
|---|----------------|----------|------------------------|--|-------|
| | | | | Typ A | Typ B |
| Základy z betonu prostého desky z betonu kamenem neprokládaného tř. C16/20 | m ³ | 171,550 | X0 | 50 % | 50 % |
| Základy z betonu železového (bez výztuže) desky z betonu bez zvláštních nároků na prostředí tř. C16/20 | m ³ | 466,560 | XC1 | 30 % | 20 % |
| Základy z betonu prostého pasy betonu kamenem neprokládaného tř. C16/20 | m ³ | 16,640 | X0 | 50 % | 50 % |
| Výplň z betonu do základových zdí z tvárnic ztraceného bednění tř. C16/20 | m ³ | 15,285 | XC1 | 30 % | 20 % |
| Nadzákladové zdi z betonu železového (bez výztuže) nosné bez zvláštních nároků na vliv prostředí tř. C25/30 | m ³ | 890,500 | XC1 | 30 % | 20 % |

| | | | | | |
|--|----------------|--------|-----|------|------|
| Nadzákladové zdi z betonu železového (bez výztuže) výplňové bez zvláštních nároků na vliv prostředí tř. C25/30 | m ³ | 60,800 | XC1 | 30 % | 20 % |
| Překlady z betonu železového (bez výztuže) tř. C16/20 | m ³ | 0,980 | XC1 | 30 % | 20 % |
| Zídky atikové, poprsní, schodišťové a zábradelní z betonu železového bez výztuže tř. C25/30 | m ³ | 55,800 | XC1 | 30 % | 20 % |
| Lože pod obrubníky, krajníky nebo obruby z dlažebních kostek z betonu prostého tř. C16/20 | m ³ | 11,520 | X0 | 50 % | 50 % |

Metoda hodnocení životního cyklu LCA bude tedy použita pro porovnání různých variant betonových směsí C16/20 X0 o celkovém objemu 199,710 m³, C16/20 XC1 o celkovém objemu 482,825 m³ a C25/30 XC1 o celkovém objemu 1 007,100 m³.

5.3. LCA analýza – teoretická část

5.3.1. Úvod

Metodika hodnocení životního cyklu výrobků a služeb je nejčastěji známá pod zkratkou LCA z anglického Life-Cycle Assessment. Jedná se o systematický přístup, jímž se hodnotí dopady produktu či služby na životní prostředí. Za produkt se zde považuje definovaný výrobní systém zahrnující všechny vstupy materiálů, energií a dopravy potřebné pro výrobu produktu, jeho vlastní výrobu a užití až po fázi likvidace. Metodika tak zahrnuje celý životní cyklus daného produktu a posuzují se všechny environmentální dopady, které jsou s tímto životním cyklem spojené. [201]

V kontextu udržitelné výstavby by výrobky měly být koncipovány tak, aby na začátku svého životního cyklu obsahovaly recyklovaný odpad jako surovinu a na konci životního cyklu je bylo možné recyklovat a znovu použít, aby se staly surovinou v jiných výrobních systémech.

Zlepšování ukazatelů udržitelného rozvoje je pro stavebnictví stále aktuálnější, protože je toto odvětví odpovědné za vysokou spotřebu energie a poškozování životního prostředí, zejména se to týká spotřeby surovin, nesprávného skladování nebo odstraňování odpadů a emisí skleníkových plynů. [202]

Je možno rozlišit tři koncepty pojetí udržitelného rozvoje [203]:

1. Definice dle komise Brundtlandové z roku 1987

Obecně formulovaný koncept udržitelného rozvoje, který je definován jako takový rozvoj, který zajistí potřeby současných generací, aniž by bylo ohroženo splnění potřeb generací příštích, a aniž by se to dělalo na úkor jiných národů. Tuto definici je možno vykládat obecně eticky, naráží však na problém definice potřeb budoucích generací.

2. Definice ze Světového summitu k udržitelnému rozvoji v Johannesburgu v roce 2002

Udržitelný rozvoj je založen na rovnováze tří pilířů – ekonomického, sociálního a environmentálního. Udržitelnost je chápána jako vyváženost vývoje mezi těmito pilíři, tzn. mezi vývojem ekonomiky, životní úrovní obyvatel a zátěží životního prostředí. Cílem je, aby se vývoj v některém pilíři nevyvíjel na úkor ostatních.

3. Kapitálový přístup k udržitelnému rozvoji

Udržitelný rozvoj vychází z ekonomických principů, resp. z potenciálu kapitálových aktiv. Uvažuje se o kapitálu lidském, sociálním, přírodním, produkčním a finančním. Pokud úhrnný kapitál dlouhodobě roste, vývoj se pokládá za udržitelný.

Jednou z klíčových výzev udržitelnosti pro nadcházející desetiletí je zlepšení hospodaření s přírodními zdroji. Studie proto jako navrhované řešení ekologických hrozeb z řetězce spojeného s občanskou výstavbou naznačují potřebu analyzovat jednotlivé stavební materiály a zaměřit se na lepší využití recyklovatelných materiálů, porovnávat dopravní alternativy a zavést stavební technologie s nízkou spotřebou energie. [202]

Přestože se použití odpadního materiálu v betonu může zdát jako udržitelnější varianta, nelze k takovým závěrům dospět bez metodologicky správné analýzy. Vzhledem k tomu, že dopady betonu na životní prostředí se vyskytují během celého životního cyklu od těžby suroviny až po konečnou likvidaci, je LCA analýza preferovanou metodou pro hodnocení dopadů betonu během různých fází životního cyklu.

Je to jedna z nejčastěji používaných metod posuzování vlivů na životní prostředí a také jedna z nejpodrobnějších ve srovnání s jinými nástroji posuzování vlivů na životní prostředí. [7]

5.3.2. Normy

Podrobná metodologie LCA analýzy je dnes obsažena zejména v následujících mezinárodních normách [201]:

- ČSN EN ISO 14040:2006 Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Zásady a osnova [204]
- ČSN EN ISO 14044:2006 Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Požadavky a směrnice [205]
- ČSN P ISO TS 14048:2003 Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Formát dokumentace údajů [206]
- ČSN EN 15804+A2 Udržitelnost staveb – Environmentální prohlášení o produktu – Základní pravidla pro produktovou kategorii stavebních produktů [207]

Soubor evropských norem poskytuje jednotný systém pro posuzování udržitelnosti budov a stavebních produktů (výrobků i služeb), který je založený na přístupu zohledňujícím jejich životní cyklus a jehož hlavním cílem je umožnit porovnatelnost výsledků. Posouzení udržitelnosti kvantifikuje dopady a aspekty environmentálních, sociálních a ekonomických vlastností budov pomocí kvantitativních i kvalitativních indikátorů (např. potenciál globálního oteplování, množství obnovitelné energie aj.). [201]

Výsledná analýza LCA může být mimo jiné podkladem k Environmentálnímu prohlášení o produktu (EPD – Environmental Product Declaration), který je souborem informací o vlivu produktu na životní prostředí v průběhu celého životního cyklu. Smyslem EPD je poskytnout informace o potenciálních environmentálních dopadech výroby, distribuce, eventuálně používání či odstranění daného výrobku. Legislativa České republiky zatím EPD k výrobkům nepožaduje, nicméně lze předpokládat, že v budoucích letech bude vyžadován. [208] Postupnou tvorbu EPD předpokládá i nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 [31]. [201]

V České republice jsou momentálně využívány certifikační systémy LEED, BREEAM, DGNB a SBToolCZ. Všechny tyto metodiky vycházejí ze základů postavených na metodě LCA. Hodnotí dopady stavebních projektů na udržitelnost, sledují vyváženost návrhu a provedení stavby. Hlavní předpokladem je včasná implementace do procesu přípravy projektu. [208]



Obr. č.56 – Životní cyklus ve stavebnictví, jednotlivé fáze [209].

5.3.3. Historický přehled vzniku metodiky LCA

S hodnocením životního cyklu produktů se začalo mezi 60. a 80. lety 20. století, kdy se velké průmyslové organizace rozhodly inventarizovat spotřebu energie při výrobě svých produktů, aby zlepšily využívání přírodních zdrojů a hledaly lepší energetické alternativy během první ropné krize. Metoda byla v té době známá jako REPA, je považovaná za předchůdce dnešní LCA.

V roce 1979 vznikla Společnost pro environmentální toxikologii a chemii (SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry), první instituce, která začala pracovat na systematizaci a standardizaci termínů a kritérií pro LCA. v roce 1993 vytvořila ISO Technickou komisi TC-207 pro tvorbu norem týkajících se environmentálního managementu a jeho nástrojů. v letech 1997 a 2006 pak byly vytvořeny série ISO 14040 a série ISO 14044, v současnosti tyto řady zahrnují hlavní a nejdůležitější standardy pro LCA, které jsou použitelné pro různé průmyslové, těžební, zemědělské, obchodní a vládní činnosti. [202]

5.3.4. Princip metodiky LCA

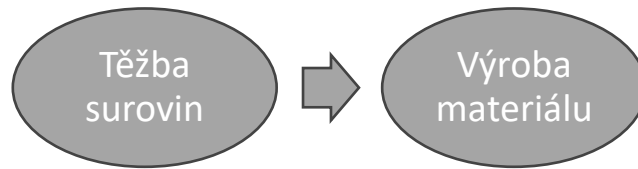
Metoda se skládá ze čtyř odlišných fází analýzy: definice cíle a rozsahu, inventarizační analýza životního cyklu (LCI), hodnocení dopadů na životní prostředí (LCIA) a interpretace výsledků. [210]

5.3.4.1. Definice cíle a rozsahu

První fází metodiky LCA je definice cíle a rozsahu, která se zaměřuje na určení konkrétních hranic s ohledem na nekonečné množství parametrů, které by mohly být analyzovány ve výrobním řetězci. Cílem LCA by měla být identifikace účelu studie a zamýšleného použití. Je třeba znát cílovou skupinu, tj. komu budou výsledky studie sdělovány, aby bylo jasné, jaké údaje a jednotky je třeba vzít v úvahu. v definici rozsahu by měla být zvažena a jasně popsána funkce a funkční jednotka, hranice systému, požadavky na kvalitu dat, srovnání mezi systémy a úvahy týkající se kritických analýz. [202]

Funkční jednotka může být jeden prvek či měrná jednotka daného materiálu. [109] Obecně se pro LCA na betonu používají čtyři typy funkčních jednotek: objem, objem a pevnost, objem, pevnost a trvanlivost a spolehlivost pevnosti. [7]

Ve stavebnictví lze LCA studie provádět na čtyř různých úrovních systémových hranic. První úroveň zahrnuje přístup „od kolébky k bráně“ („cradle to gate“), který zvažuje dopady těžby surovin a výroby materiálu až do okamžiku, kdy produkt opouští bránu výrobního podniku. [202], [211]



Obr. č.57 – Schéma hranic „od kolébky k bráně“ – převzato z [211].

Vliv dopravy materiálů z výrobního podniku na stavenišťe může výrazně ovlivnit výsledky hodnocení. Tento vliv je nutné spočítat individuálně pro konkrétní případy. Pokud je doprava součástí studie LCA, hodnotí se pomocí průměrných vzdáleností, a jedná se o posouzení se systémovými hranicemi „cradle to site“, tj. „od kolébky na místo užití“. [202], [211]



Obr. č.58 – Schéma hranic „od kolébky na stavenišťe“ – převzato z [211].

Přístup „od kolébky ke hrobu“ („cradle to grave“) zvažuje dopady všech fází životního cyklu výrobku od těžby primárních surovin, přes výrobu, dopravu, zabudování, až po odstranění stavby. [202], [211]



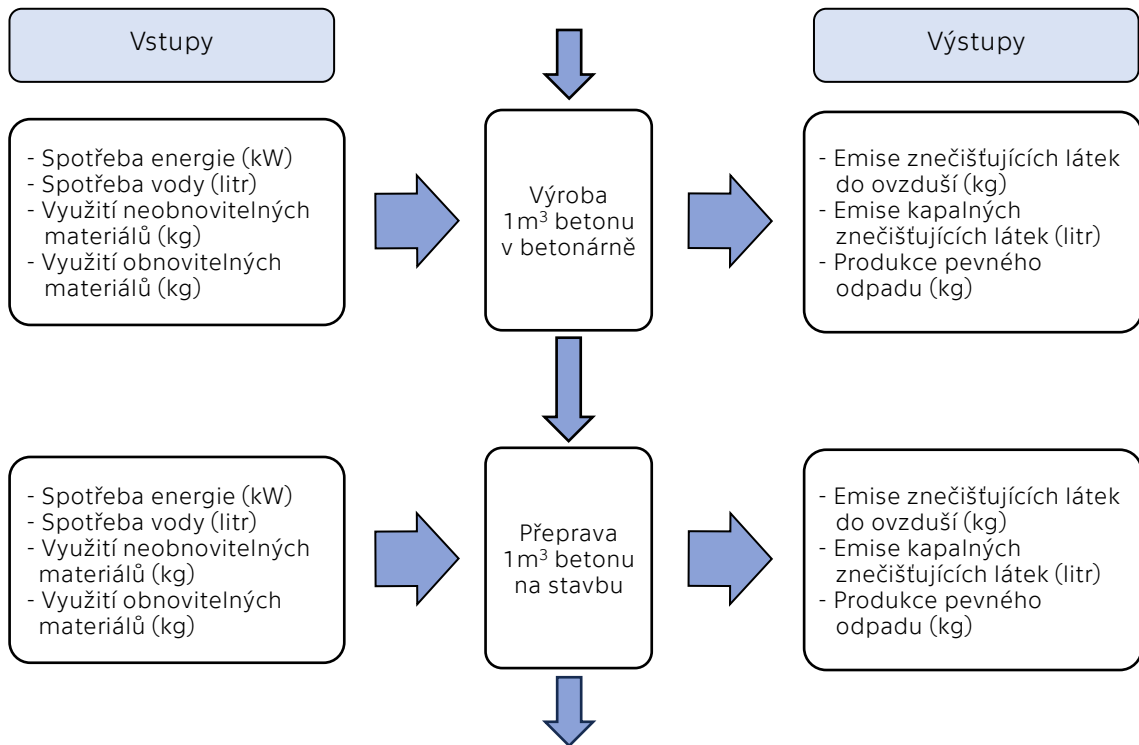
Obr. č.59 – Schéma hranic „od kolébky ke hrobu“ – převzato z [211].

Poslední úroveň, zaměřující se spíše na udržitelnost, zahrnuje přístup „od kolébky ke kolébce“ („cradle to cradle“), který zvažuje dopady těžby surovin, výroby materiálu, výstupu finálního produktu z továrny a fáze používání, dále je v něm zahrnuta demolice, odpad, recyklace a opětovné použití odpadu. [202], [211]

V praxi je velmi složité analyzovat pro materiály všechny fáze životního cyklu, proto se do hodnocení stavebních materiálů zahrnují především první dvě fáze – „cradle to cradle“ a „cradle to site“. [211]

5.3.4.2. Inventarizační analýza životního cyklu (LCI)

Inventarizační analýza životního cyklu (LCI – life cycle inventory) zahrnuje sběr a analýzu dat, tato fáze je časově nejnáročnější. LCI by měla obsahovat údaje o všech vstupech a výstupech každého jednotlivého procesu v řešeném systému, včetně toků znečišťujících látek, materiálů a zdrojů v jejich různých fázích – získávání surovin, přeprava vstupních materiálů, výroba produktů, přeprava produktů a fáze použití, likvidace, recyklace a opětovného použití. pro možnost porovnání se použije funkční jednotka.



Obr. č.60 – Schéma vstupů na výstupů pro hranice „cradle to site“ – převzato z [202].

Životní cyklus produktu se skládá z tisíců jednotlivých procesů a sběr těchto dat by zabral příliš mnoho času a zdrojů, proto je výhodnější alternativou použití databází pro analýzu životního cyklu, které obsahují data různých výrobních procesů specifických pro zemi původu. v případě potřeby informací, které nejsou součástí žádné databáze, lze provést odhad za předpokladu, že je tento předpoklad založen na existujících údajích. [202]

Data mohou pocházet z průmyslu, od institucí nebo státních organizací. Kvalita dat může ovlivnit konečné výsledky, proto by měla být vždy posouzena před zahájením zpracování dat. [7]

V současné době existuje mnoho softwarových nástrojů LCA zaměřených na stavebnictví, které umožňují studie s různou úrovní podrobnosti. Mezi nejpoužívanější v České republice lze zařadit GaBi, Envimat, SimaPro či Ecoinvent. [202], [212]

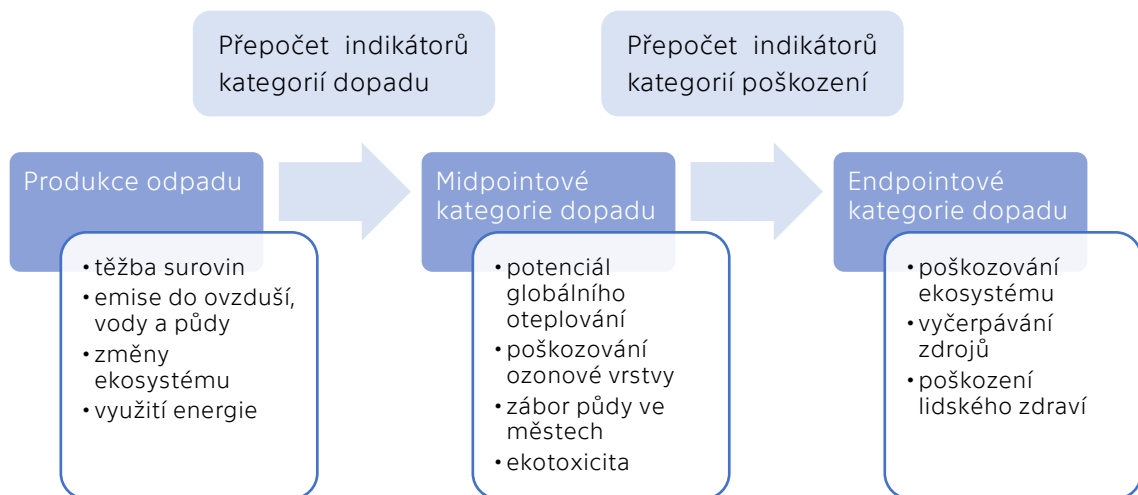
5.3.4.3. Hodnocení dopadů na životní prostředí (LCIA)

Cílem fáze LCIA (life cycle impact assessment) je posoudit dopady na životní prostředí na základě inventarizační analýzy, přičemž tuto fázi lze považovat za nejdůležitější a nejkritičtější fázi studie, jelikož normy řady ISO 14.040 nestanovují pevné hodnotící kritérium pro její provedení. [202]

Součástí této fáze je výběr kategorií dopadů, klasifikace vybraných kategorií dopadů a výpočet výsledků ukazatelů těchto kategorií. Cílem této fáze je kvantifikovat dopady na životní prostředí ve formě, která bude pro cílovou skupinu srozumitelná a přehledná. v LCIA se používají dvě kategorie dopadu, první je orientovaná na problém (midpointový indikátor kategorie dopadu), druhá je orientovaná na poškození životního prostředí (endpointový indikátor kategorie dopadu). [213]

Metoda midpointového indikátoru kategorie dopadu analyzuje oblasti životního prostředí, jako je změna klimatu, ničení ozonové vrstvy, toxicita člověka, acidifikace, vyčerpání neobnovitelných zdrojů a eutrofizace. [7], [214]

Metoda endpointového indikátoru kategorie dopadu se zase zabývá škodami způsobenými změnami klimatu, které jsou spojeny s midpointovými indikátory kategorií dopadu a popisuje závažnost škod na životním prostředí. Endpointové indikátory kategorií dopadu jsou obecně považovány za srozumitelnější pro osoby s rozhodovací pravomocí. Jedná se například o dopady na lidské zdraví a podobně. Metoda je však vysoce subjektivní oproti metodě midpointovým indikátorům kategorií dopadu.



Obr. č.61 – Schéma midpointových a endpointových indikátorů kategorií dopadu – převzato z [202].

5.3.4.4. Interpretace výsledků

Výstupem LCA studie je zpravidla velké množství různých hodnot, ať již z inventární analýzy či z hodnocení dopadů životního cyklu. Fáze interpretace je tak nesmírně důležitá, protože je klíčem k tomu, aby byly výsledky posouzení dopadů srovnatelné a srozumitelné. Interpretace výsledků má jistá pravidla, forma prezentace dat totiž může ovlivnit jejich význam. Interpretace se tak skládá především ze:

- strukturalizace dat s ohledem na nejvýznamnější procesy či skupiny procesů a na nejvýznamnější látky;
- provedení analýz citlivosti a zhodnocení nejistot studie;
- diskuse nad smysluplností dat ve vztahu k úplnosti studie a kvalitě vstupních dat;
- závěrečné shrnutí a formulace realistických doporučení, shrnutých do následujících kroků:

Tyto části by měly vyústit v identifikaci významných zjištění (significant issue), hodnocení (evaluation) a formulaci závěrů a doporučení.

Interpretace je poslední fází LCA, nicméně ovlivňuje i fáze předchozí, dochází totiž ke vzniku nových upřesňujících požadavků, které by měly být implementovány do předchozích fází studie. [213]

Kategorie dopadu

Níže jsou uvedeny kategorie dopadu dle doporučení komise EU 2021/2279 ze dne 15.12.2021 o používání metod stanovení environmentální stopy pro měření a sdělování environmentálního profilu životního cyklu produktů a organizací [215].

Tab. 31 – Kategorie dopadu – převzato z Tabulky 2 z [215].

| Kategorie dopadu environmentální stopy | Indikátor kategorie dopadu | Jednotka | Popis jednotky |
|--|---|--------------------------|--|
| Acidifikace | Akumulované překročení (AE) | mol H ⁺ eq. | Emise NO _x , NH ₃ a SO _x vedou k únikům vodíkových iontů (H ⁺), protony přispívají k acidifikaci půd a vody. |
| Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku | Potenciál globálního oteplování (GWP100) | kg CO ₂ eq. | Vliv emisí způsobených lidskou činností na radiační působení atmosféry. Poměr časově integrovaného radiačního působení k okamžitému uvolnění 1 kg stopové látky ku 1 kg referenčního plynu (CO ₂). |
| Ekotoxicita, sladkovodní | Srovnávací toxická jednotka pro ekosystémy | CTUe | Je důsledkem řady různých toxikologických mechanismů způsobených uvolňováním látek s přímým účinkem na zdraví ekosystému. |
| Eutrofizace, pevninská | Akumulované překročení (AE) | mol N eq | |
| Eutrofizace, sladkovodní | Zlomek živin, které doputují dokoncové sladkovodní složky (P) | kg P eq. | [kg Phosphate-Equiv] = kg PO ₄ ³⁻ - eq. |
| Eutrofizace, mořská | Zlomek živin, které doputují do koncové mořské složky (N) | kg N eq. | Jedná se o množství dusíkatých látek. |
| Toxicita pro člověka, nekarcinogenní | Srovnávací toxická jednotka pro člověka | CTUh | |
| Toxicita pro člověka, karcinogenní | Srovnávací toxická jednotka pro člověka | CTUh | |
| Ionizující záření, lidské zdraví | Účinnost expozice člověka vzhledem k U ²³⁵ | kBq U ²³⁵ eq. | Zohledňuje nepříznivé účinky na zdraví člověka způsobené úniky radioaktivity. |
| Využívání půdy | Index kvality půdy – odkazuje se na využívání a přeměnu | pt – bezrozměrné | |

| | | | |
|--|---|--|--|
| Poškozování ozonové vrstvy | Potenciál poškozování ozonové vrstvy (ODP) | kg CFC-11 eq. | Jedná se o ekvivalentní množství CFC-11 (trichlorfluormethan / freon-11 / chlorfluorovaný uhlovdík). Celkové množství uvolněných plynů, které poškozují ozonovou vrstvu. |
| Tvorba drobných částic | Dopad na lidské zdraví | Incidence nemoci | Kategorie dopadu zohledňuje nepříznivé účinky na zdraví člověka způsobené emisemi částic a jejich prekurzorů (NO _x , SO _x , NH ₃). |
| Fotochemická tvorba ozonu, lidské zdraví | Nárůst koncentrace troposférického ozónu | kg NMVOC eq. | Zohledňuje tvorbu ozonu v přízemní části troposféry způsobenou fotochemickou oxidací těkavých organických látek (VOC) a oxidu uhelnatého (CO) v přítomnosti oxidů dusíku (NO _x) a slunečního záření. |
| Využívání zdrojů, fosilní | Vyčerpávání abiotických zdrojů – fosilní paliva (ADP – fosilní) | MJ | |
| Využívání zdrojů, nerosty a kovy | Vyčerpávání abiotických zdrojů (konečné zásoby ADP) | kg Sb eq | |
| Spotřeba čisté vody | Potenciál nedostatku pro uživatele (spotřeba vody vážená nedostatkem) | m ³ eq množství nedostatkové vody | Jedná se o objem vody ekvivalentní k množství nedostatkové vody. |

5.4. LCA analýza – praktická část

5.4.1. Definice cíle a rozsahu

Pro LCA analýzu byly určeny hranice systému „cradle to site“, které zahrnují proces získávání surovin pro výrobek, jeho výroba a následně doprava na stavenišť. Metodika byla použita pro konstrukce uvedené v Tab. 30 v kapitole 5.2.1.

Byl stanoven předpoklad, že při výrobě betonu s recyklovaným kamenivem nedojde k vyšší spotřebě energie, než je tomu u betonu s přírodním kamenivem. Tento aspekt by musel být posouzen individuálně konkrétními výrobci betonu.

Jako funkční jednotka byl zvolen 1 m³, který byl následně přenásoben množstvím materiálu v betonových konstrukcích daného objektu. Návrh betonových směsí byl koncipován tak, aby nedošlo k výraznému zhoršení důležitých mechanických vlastností a nebylo nutné provádět statické úpravy konstrukcí, například zvětšení tlouštěk konstrukcí či zvýšení procenta vyztužení. Ověření vlastností betonů proběhlo v rámci experimentální části (kapitola 4), výsledky laboratorních zkoušek potvrdily vhodnost použití navržených směsí pro požadovanou pevnostní třídu betonu.

5.4.2. Inventarizace životního cyklu (LCI) tvorba a analýza

Pro inventarizaci životního cyklu byla využita data z databáze Envimat 3.1. Tato databáze obsahuje údaje o environmentální stopě materiálů vztažených na 1 kg materiálů.

5.4.3. Hodnocení dopadů životního cyklu (LCIA)

Ekologická stopa pro 1 m³ betonu byla spočítána pomocí vynásobení množství jednotlivých složek v recepturách betonových směsí s příslušnými hodnotami z databáze Envimat 3.1.

Výsledky jednotlivých složek pro 1 m³ betonu byly následně sečteny, čímž byla získána hodnota ekologické stopy pro 1 m³ dané betonové směsi v řešené kategorii dopadu. Tyto výsledky jsou uvedeny v Tab. 32 pro třídu C25/30 XC1, v Tab. 33 pro třídu C16/20 X0 a v Tab. 34 pro C16/20 XC1.

Vysvětlení zkratk:

- NAC – beton s přírodním kamenivem
- RAC-C – beton s recyklovaným betonovým kamenivem
- RAC-C s rec. výztuže – beton s recyklovaným betonovým kamenivem, data uvažují s recyklací oceli z výztuže
(Při recyklaci betonu se získává ocelová výztuž ze zdrojového betonu, kterou lze recyklovat a znovu použít. Tato skutečnost pozitivně ovlivňuje výsledky LCA analýzy.)
- RAC-M – beton s recyklovaným směsným kamenivem

Tab. 32 – Výsledky LCIA pro 1 m³ betonu C25/30 XC1, pro varianty navržených betonových směsí.

| Varianty směsi C25/30 XC1 – dopady pro 1 m ³ | | | | | |
|---|--------------------------|-------------------|----------------------|--|----------------------|
| Midpointový indikátor kategorie dopadu | Jednotka | C25/30XC1 _NAC | C25/30 XC1 _RAC-C | C25/30 XC1 _RAC-C s rec. výztuže | C25/30 XC1 _RAC-M |
| Acidifikace | mol H+ eq. | 0,5476 | 0,5404 | 0,5161 | 0,5357 |
| Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku | kg CO ₂ eq. | 308,7056 | 302,4372 | 291,1163 | 300,5429 |
| Ekotoxická, sladkovodní | CTUe | 2 183,0017 | 2 142,9057 | 2 136,5003 | 2 126,1550 |
| Eutrofizace, sladkovodní | kg P eq. | 0,0018 | 0,0018 | 0,0018 | 0,0018 |
| Eutrofizace, mořská | kg N eq. | 0,1855 | 0,1848 | 0,1805 | 0,1829 |
| Eutrofizace, pevninská | mol N eq. | 2,0282 | 2,0206 | 1,9831 | 2,0000 |
| Toxicita pro člověka, karcinogenní | CTUh | 4,02E-08 | 3,85E-08 | 3,39E-08 | 3,79E-08 |
| Toxicita pro člověka, nekarciogenní | CTUh | 420,51E-08 | 404,50E-08 | 389,23E-08 | 397,05E-08 |
| Ionizující záření, lidské zdraví | kBq U ²³⁵ eq. | 9,3096 | 8,8846 | 9,1394 | 8,8727 |
| Využívání půdy | pt – bezrozměrné | 178,0117 | 172,8717 | 174,1270 | 169,0110 |
| Poškození ozonové vrstvy | kg CFC-11 eq. | 32,91E-08 | 32,23E-08 | 32,23E-08 | 32,15E-08 |
| Tvorba drobných částic | Incidence nemoci | 731,74E-08 | 672,49E-08 | 638,09E-08 | 635,71E-08 |
| Fotochemická tvorba ozonu, lidské zdraví | kg NMVOC eq. | 0,5371 | 0,5356 | 0,5183 | 0,5317 |
| Využívání zdrojů, fosilní | MJ | 1 533,3947 | 1 500,1257 | 1 396,1260 | 1 481,3459 |

| | | | | | |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| Využívání zdrojů, nerosty a kovy | kg Sb eq. | 3213,12E-08 | 3073,42E-08 | 252,52E-08 | 3060,96E-08 |
| Spotřeba čisté vody | m ³ world equiv. | 571,0410 | 559,3123 | 557,2087 | 557,9469 |

Tab. 33 – Výsledky LCIA pro 1 m³ betonu C16/20 X0, pro varianty navržených betonových směsí.

| Varianty směsi C16/20 X0 – dopady pro 1 m ³ | | | | | |
|--|--------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
| Midpointový indikátor kategorie dopadu | Jednotka | C16/20 X0 _NAC | C16/20 X0 _RAC-C | C16/20 X0 _RAC-C s rec. výztuže | C16/20 X0 _RAC-M |
| Acidifikace | mol H+ eq. | 0,4853 | 0,4901 | 0,4494 | 0,4840 |
| Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku | kg CO ₂ eq. | 274,4447 | 273,1427 | 254,2429 | 269,8527 |
| Ekotoxicita, sladkovodní | CTUe | 1 919,1640 | 1 923,7556 | 1 913,0619 | 1 898,2311 |
| Eutrofizace, sladkovodní | kg P eq. | 0,0016 | 0,0016 | 0,0016 | 0,0016 |
| Eutrofizace, mořská | kg N eq. | 0,1650 | 0,1693 | 0,1621 | 0,1677 |
| Eutrofizace, pevninská | mol N eq. | 1,8043 | 1,8515 | 1,7888 | 1,8345 |
| Toxicita pro člověka, karcinogenní | CTUh | 3,59E-08 | 3,43E-08 | 2,66E-08 | 3,23E-08 |
| Toxicita pro člověka, nekarcinogenní | CTUh | 372,43E-08 | 358,61E-08 | 333,12E-08 | 337,20E-08 |
| Ionizující záření, lidské zdraví | kBq U ²³⁵ eq. | 8,2530 | 7,8271 | 8,2525 | 7,6678 |
| Využívání půdy | pt – bezrozměrné | 162,9983 | 158,2584 | 160,3539 | 148,0331 |
| Poškozování ozonové vrstvy | kg CFC-11 eq. | 28,79E-08 | 28,79E-08 | 28,79E-08 | 28,78E-08 |
| Tvorba drobných částic | Incidence nemoci | 659,40E-08 | 579,50E-08 | 522,07E-08 | 460,98E-08 |
| Fotochemická tvorba ozonu, lidské zdraví | kg NMVOC eq. | 0,4773 | 0,4908 | 0,4618 | 0,4904 |
| Využívání zdrojů, fosilní | MJ | 1 413,0175 | 1 387,8405 | 1 214,2171 | 1 341,3440 |
| Využívání zdrojů, nerosty a kovy | kg Sb eq. | 2829,63E-08 | 2700,19E-08 | -2009,19E-08 | 2632,66E-08 |
| Spotřeba čisté vody | m ³ world equiv. | 503,5785 | 502,2476 | 498,7357 | 501,7061 |

Tab. 34 – Výsledky LCIA pro 1 m³ betonu C16/20 XC1, pro varianty navržených betonových směsí.

| Varianty směsi C16/20 XC1 – dopady pro 1 m ³ | | | | | |
|---|--------------------------------|--------------------|----------------------|--|----------------------|
| Midpointový indikátor kategorie dopadu | Jednotka | C16/20 XC1 _NAC | C16/20 XC1 _RAC-C | C16/20 XC1 _RAC-C s rec. výztuže | C16/20 XC1 _RAC-M |
| Acidifikace | mol H+ eq. | 0,4853 | 0,4879 | 0,4635 | 0,4843 |
| Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku | kg CO ₂ eq. | 274,4447 | 273,4622 | 262,1406 | 272,2116 |
| Ekotoxicita, sladkovodní | CTUe | 1 919,1640 | 1 921,5032 | 1 915,0973 | 1 909,7873 |
| Eutrofizace, sladkovodní | kg P eq. | 0,0016 | 0,0016 | 0,0016 | 0,0016 |
| Eutrofizace, mořská | kg N eq. | 0,1650 | 0,1675 | 0,1632 | 0,1659 |
| Eutrofizace, pevninská | mol N eq. | 1,8043 | 1,8312 | 1,7937 | 1,8147 |
| Toxicita pro člověka, karcinogenní | CTUh | 3,59E-08 | 3,49E-08 | 3,03E-08 | 3,43E-08 |
| Toxicita pro člověka, nekarinogenní | CTUh | 372,43E-08 | 363,94E-08 | 348,67E-08 | 357,40E-08 |
| Ionizující záření, lidské zdraví | kBq U ²³⁵ eq. | 8,2530 | 7,9929 | 8,2477 | 8,0010 |
| Využívání půdy | pt – bezrozměrné | 162,9983 | 159,8286 | 161,0839 | 156,2380 |
| Poškození ozonové vrstvy | kg CFC-11 eq. | 28,79E-08 | 28,79E-08 | 28,79E-08 | 28,78E-08 |
| Tvorba drobných částic | Incidence nemoci | 659,40E-08 | 610,65E-08 | 576,26E-08 | 575,25E-08 |
| Fotochemická tvorba ozonu, lidské zdraví | kg NMVOC eq. | 0,4773 | 0,4850 | 0,4677 | 0,4822 |
| Využívání zdrojů, fosilní | MJ | 1 413,0175 | 1 394,6851 | 1 290,6792 | 1 378,0227 |
| Využívání zdrojů, nerosty a kovy | kg Sb eq. | 2829,63E-08 | 2751,23E-08 | -69,84E-08 | 2746,12E-08 |
| Spotřeba čisté vody | m ³ world equiv. | 503,5785 | 502,6080 | 500,5043 | 502,5257 |

5.4.4. Interpretace výsledků

V této části bylo provedeno přenásobení dat normalizačním a váhovým faktorem získanými z databáze Envimat 3.1.

Normalizace slouží k možnosti porovnávání různých systémů mezi sebou, což nelze jednoduše provést, pokud má každá kategorie dopadu jinou jednotku a zároveň různou důležitost dopadu na životní prostředí. V rámci normalizace dochází k přepočtu jednotlivých kategorií dopadů stanovenými faktory, výsledkem je poté bezrozměrná hodnota, která umožňuje vzájemné porovnání různých kategorií a systémů. Účelem normalizace je tak posoudit, která kategorie dopadu je v daném případě výrazněji zasažena. [213]

Dále bylo provedeno vážení neboli oceňování, což je vyjadřování významnosti kategorií dopadu s ohledem na ekonomicko-sociální hlediska. I v případě, kdy jsou dva různé výsledky

indikátoru kategorie dopadu po normalizaci stejné, nemusí být stejně závažný jejich společenský význam. Vážení se provádí násobením normalizovaného výsledku indikátoru kategorie dopadu váhovým faktorem odpovídající kategorie dopadu. Váhový faktor pro jednotlivé kategorie dopadu musí vzájemně odrážet jejich závažnost, a to včetně jejich následných environmentálních účinků. Určení hodnot váhových faktorů je dle normy ČSN EN ISO 14044 založeno na hodnotové volbě, nikoliv na přírodních zákonitostech. [213]

5.4.4.1. Výsledky pro 1 m³ betonové směsi po normalizaci dat a jejich vážení

Níže jsou uvedeny výsledky kategorií dopadů po normalizaci a vážení pro 1 m³ betonových směsí. V posledním řádku jsou hodnoty sečteny pro možnost porovnání variant betonových směsí mezi sebou, graficky jsou tyto výsledky znázorněny na obrázku Obr. č.62.

Tab. 35 – Normalizované kategorie dopadů pro C25/30 XC1 pro 1 m³ betonové směsi.

| Midpointový indikátor kategorie dopadu | Jednotka | C25/30XC1 _NAC | C25/30 XC1 _RAC-C | C25/30 XC1 _RAC-C s rec. výztuže | C25/30 XC1 _RAC-M |
|--|----------|-------------------|----------------------|--|----------------------|
| Acidifikace | – | 611,0E-06 | 603,0E-06 | 575,9E-06 | 597,7E-06 |
| Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku | – | 8030,8E-06 | 7867,7E-06 | 7573,2E-06 | 7818,4E-06 |
| Ekotoxicita, sladkovodní | – | 982,0E-06 | 963,9E-06 | 961,1E-06 | 956,4E-06 |
| Eutrofizace, sladkovodní | – | 32,0E-06 | 31,2E-06 | 31,2E-06 | 31,2E-06 |
| Eutrofizace, mořská | – | 281,0E-06 | 279,9E-06 | 273,4E-06 | 277,0E-06 |
| Eutrofizace, pevninská | – | 425,7E-06 | 424,1E-06 | 416,2E-06 | 419,8E-06 |
| Toxicita pro člověka, karcinogenní | – | 50,6E-06 | 48,6E-06 | 42,7E-06 | 47,7E-06 |
| Toxicita pro člověka, nekarcinogenní | – | 336,9E-06 | 324,1E-06 | 311,8E-06 | 318,1E-06 |
| Ionizující záření, lidské zdraví | – | 110,5E-06 | 105,5E-06 | 108,5E-06 | 105,3E-06 |
| Využívání půdy | – | 17,2E-06 | 16,7E-06 | 16,9E-06 | 16,4E-06 |
| Poškození ozonové vrstvy | – | 0,4E-06 | 0,4E-06 | 0,4E-06 | 0,4E-06 |
| Tvorba drobných částic | – | 1101,2E-06 | 1012,0E-06 | 960,3E-06 | 956,7E-06 |
| Fotochemická tvorba ozonu, lidské zdraví | – | 632,4E-06 | 630,6E-06 | 610,2E-06 | 626,0E-06 |
| Využívání zdrojů, fosilní | – | 1962,6E-06 | 1920,0E-06 | 1786,9E-06 | 1896,0E-06 |
| Využívání zdrojů, nerosty a kovy | – | 38,1E-06 | 36,5E-06 | 3,0E-06 | 36,3E-06 |
| Spotřeba čisté vody | – | 4237,2E-06 | 4150,2E-06 | 4134,6E-06 | 4140,1E-06 |
| SUMA | – | 18849,7E-06 | 18414,4E-06 | 17806,2E-06 | 18243,5E-06 |

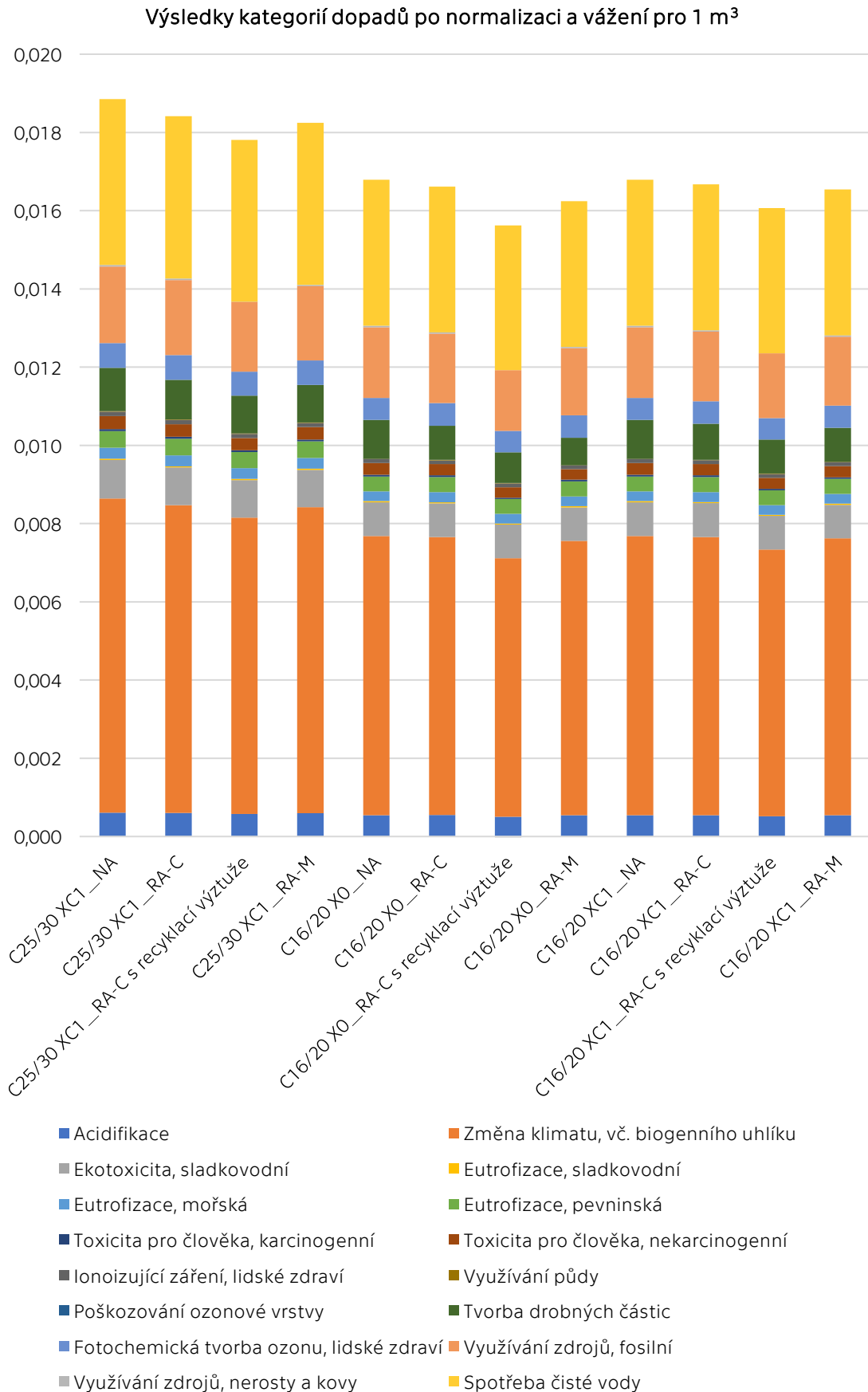
Tab. 36 – Normalizované kategorie dopadů pro C16/20 XO pro 1 m³ betonové směsi.

| Midpointový indikátor kategorie dopadu | Jednotka | C16/20 XO _NAC | C16/20 XO _RAC-C | C16/20 XO _RAC-C s rec. výztuže | C16/20 XO _RAC-M |
|--|----------|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
| Acidifikace | – | 541,5E-06 | 546,8E-06 | 501,5E-06 | 540,0E-06 |
| Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku | – | 7139,5E-06 | 7105,6E-06 | 6614,0E-06 | 7020,0E-06 |
| Ekotoxicita, sladkovodní | – | 863,3E-06 | 865,4E-06 | 860,6E-06 | 853,9E-06 |
| Eutrofizace, sladkovodní | – | 28,1E-06 | 27,8E-06 | 27,8E-06 | 27,9E-06 |

| | | | | | |
|--|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Eutrofizace, mořská | - | 250,0E-06 | 256,4E-06 | 245,5E-06 | 253,9E-06 |
| Eutrofizace, pevninská | - | 378,7E-06 | 388,6E-06 | 375,5E-06 | 385,1E-06 |
| Toxicita pro člověka, karcinogenní | - | 45,3E-06 | 43,3E-06 | 33,5E-06 | 40,7E-06 |
| Toxicita pro člověka, nekarcinogenní | - | 298,4E-06 | 287,3E-06 | 266,9E-06 | 270,2E-06 |
| Ionizující záření, lidské zdraví | - | 98,0E-06 | 92,9E-06 | 98,0E-06 | 91,0E-06 |
| Využívání půdy | - | 15,8E-06 | 15,3E-06 | 15,5E-06 | 14,3E-06 |
| Poškození ozonové vrstvy | - | 0,3E-06 | 0,3E-06 | 0,3E-06 | 0,3E-06 |
| Tvorba drobných částic | - | 992,3E-06 | 872,1E-06 | 785,7E-06 | 693,7E-06 |
| Fotochemická tvorba ozonu, lidské zdraví | - | 561,9E-06 | 577,8E-06 | 543,7E-06 | 577,4E-06 |
| Využívání zdrojů, fosilní | - | 1808,5E-06 | 1776,3E-06 | 1554,1E-06 | 1716,8E-06 |
| Využívání zdrojů, nerosty a kovy | - | 33,6E-06 | 32,0E-06 | -23,8E-06 | 31,2E-06 |
| Spotřeba čisté vody | - | 3736,6E-06 | 3726,8E-06 | 3700,7E-06 | 3722,8E-06 |
| SUMA | - | 16791,7E-06 | 16614,8E-06 | 15599,3E-06 | 16239,3E-06 |

Tab. 37 – Normalizované kategorie dopadů pro C16/20 XC1 pro 1 m³ betonové směsi.

| Midpointový indikátor kategorie dopadu | Jednotka | C16/20 XC1 _NAC | C16/20 XC1 _RAC-C | C16/20 XC1 _RAC-C s rec. výztuže | C16/20 XC1 _RAC-M |
|--|----------|--------------------|----------------------|--|----------------------|
| Acidifikace | - | 541,5E-06 | 544,3E-06 | 517,2E-06 | 540,4E-06 |
| Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku | - | 7139,5E-06 | 7113,9E-06 | 6819,4E-06 | 7081,4E-06 |
| Ekotoxicita, sladkovodní | - | 863,3E-06 | 864,3E-06 | 861,5E-06 | 859,1E-06 |
| Eutrofizace, sladkovodní | - | 28,1E-06 | 27,9E-06 | 27,9E-06 | 28,0E-06 |
| Eutrofizace, mořská | - | 250,0E-06 | 253,6E-06 | 247,1E-06 | 251,3E-06 |
| Eutrofizace, pevninská | - | 378,7E-06 | 384,4E-06 | 376,5E-06 | 380,9E-06 |
| Toxicita pro člověka, karcinogenní | - | 45,3E-06 | 44,0E-06 | 38,2E-06 | 43,3E-06 |
| Toxicita pro člověka, nekarcinogenní | - | 298,4E-06 | 291,6E-06 | 279,4E-06 | 286,4E-06 |
| Ionizující záření, lidské zdraví | - | 98,0E-06 | 94,9E-06 | 97,9E-06 | 95,0E-06 |
| Využívání půdy | - | 15,8E-06 | 15,5E-06 | 15,6E-06 | 15,1E-06 |
| Poškození ozonové vrstvy | - | 0,3E-06 | 0,3E-06 | 0,3E-06 | 0,3E-06 |
| Tvorba drobných částic | - | 992,3E-06 | 919,0E-06 | 867,2E-06 | 865,7E-06 |
| Fotochemická tvorba ozonu, lidské zdraví | - | 561,9E-06 | 571,0E-06 | 550,6E-06 | 567,7E-06 |
| Využívání zdrojů, fosilní | - | 1808,5E-06 | 1785,1E-06 | 1652,0E-06 | 1763,8E-06 |
| Využívání zdrojů, nerosty a kovy | - | 33,6E-06 | 32,6E-06 | -0,8E-06 | 32,6E-06 |
| Spotřeba čisté vody | - | 3736,6E-06 | 3729,4E-06 | 3713,8E-06 | 3728,8E-06 |
| SUMA | - | 16791,7E-06 | 16672,0E-06 | 16063,7E-06 | 16539,8E-06 |

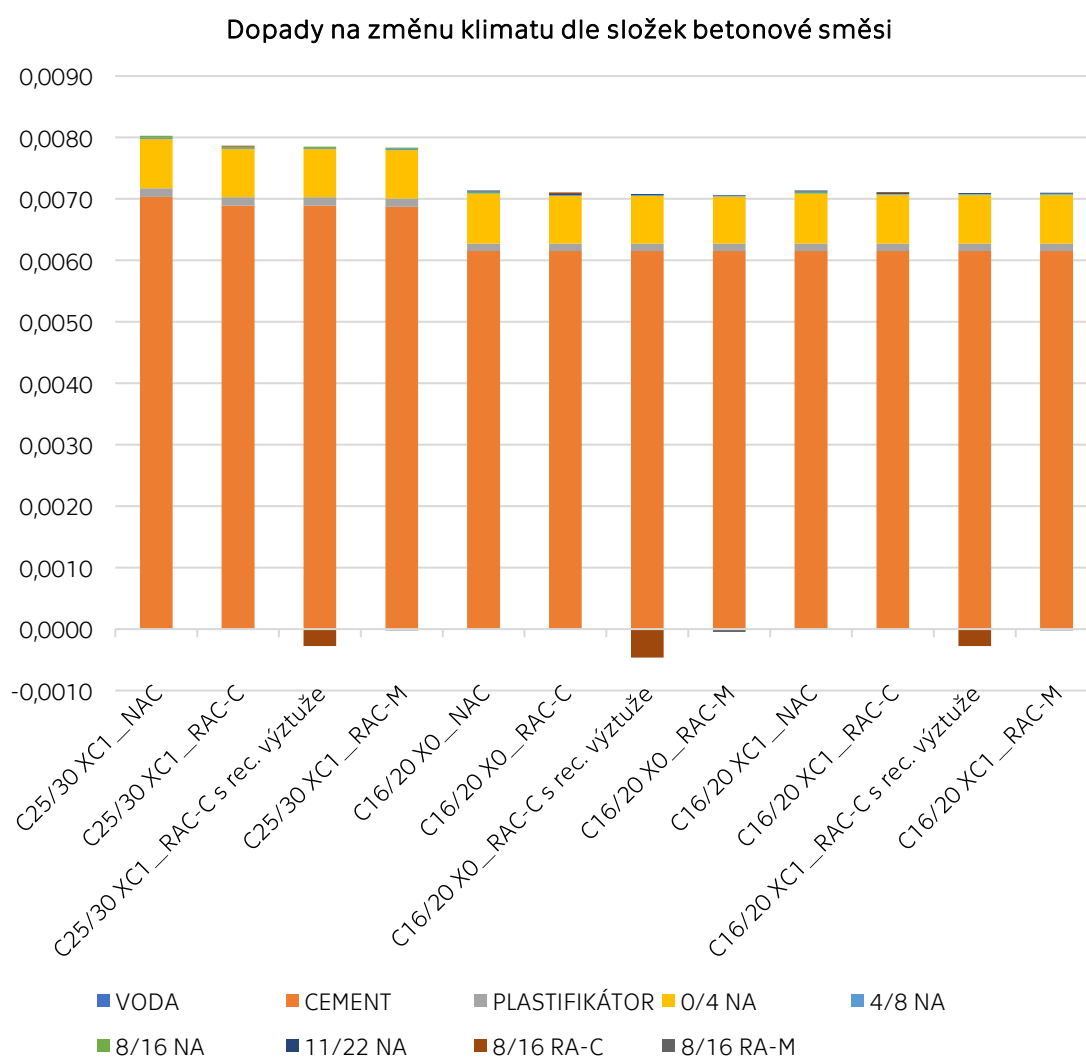


Výsledky ukazují, že nejmenší dopad na životní prostředí má u všech typů betonu směs s recyklovaným betonovým kamenivem v případě započítání recyklace výztuže ze zdrojového betonu. Vzhledem k nedostatečným informacím z recyklačních středisek o původu recyklovaného kameniva nebude tato varianta do posouzení zahrnuta. Druhý nejlepší výsledek měla u všech typů betonu směs s recyklovaným směsným kamenivem i přes skutečnost, že podíl směsného recyklátu v betonové směsi RAC-M byl menší než podíl betonového recyklátu v betonové směsi RAC-C.

V grafu na Obr. č.62 je též přehledně vidět, které kategorie dopadů jsou při výrobě betonu nejvíce zasaženy, jedná se o změnu klimatu, spotřebu čisté vody, využívání fosilních zdrojů, tvorbu drobných částic a ekotoxicitu sladké vody.

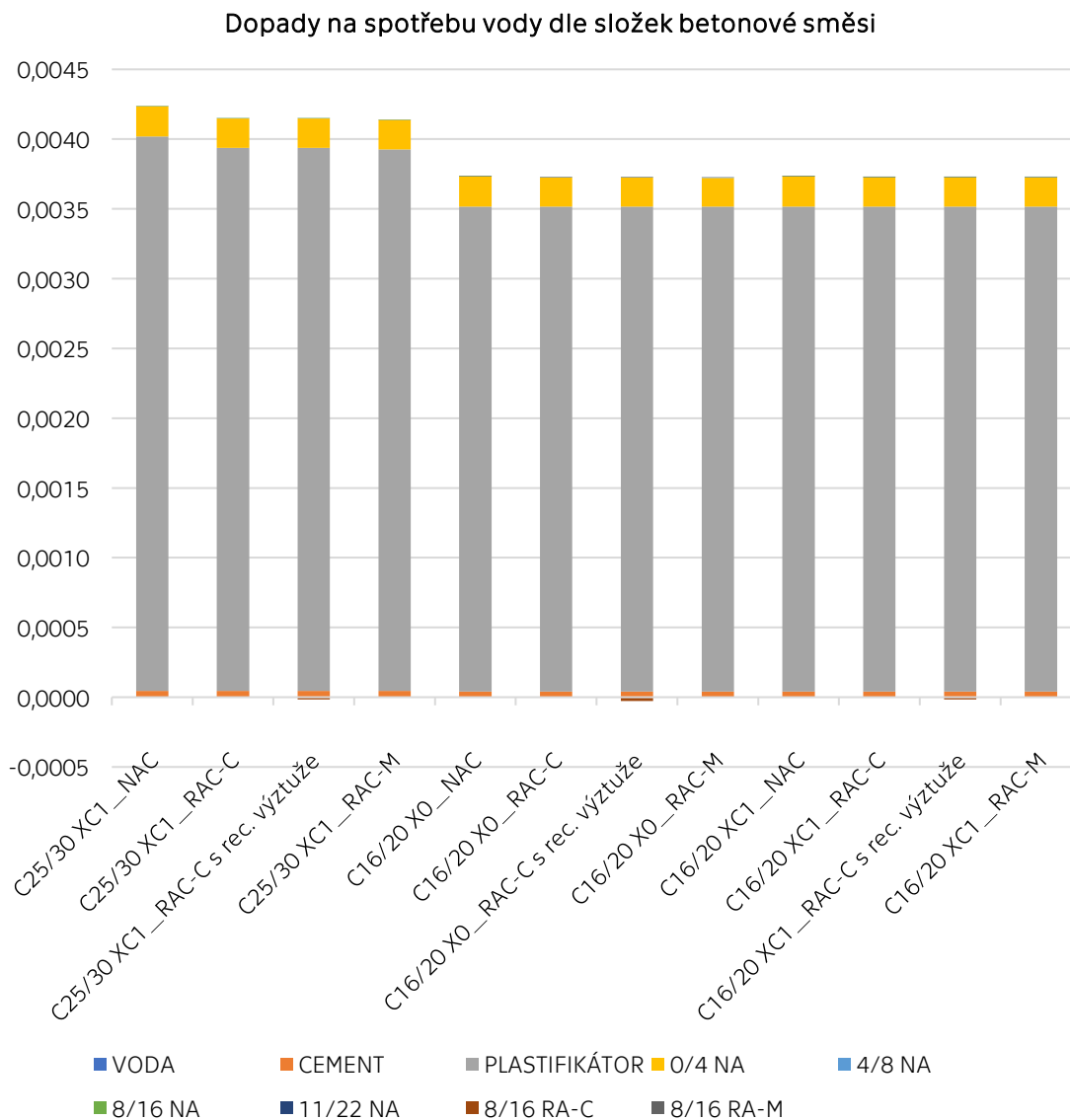
5.4.4.2. Dopady jednotlivých složek betonových směsí na životní prostředí

Pro nejvíce zasažené kategorie dopadů byl analyzován vliv jednotlivých složek betonu pro 1 m³ betonových směsí na vybrané kategorie dopadu. V následujících grafech jsou znázorněny dopady jednotlivých složek betonových směsí na klimatickou změnu (Obr. č.63), spotřebu čisté vody (Obr. č.64) a využívání fosilních paliv (Obr. č.65). Jedná se o hodnoty po normalizaci a vážení.



Obr. č.63 – Příspěvky jednotlivých složek betonu v kategorii dopadu „změna klimatu“ – po normalizaci a vážení.

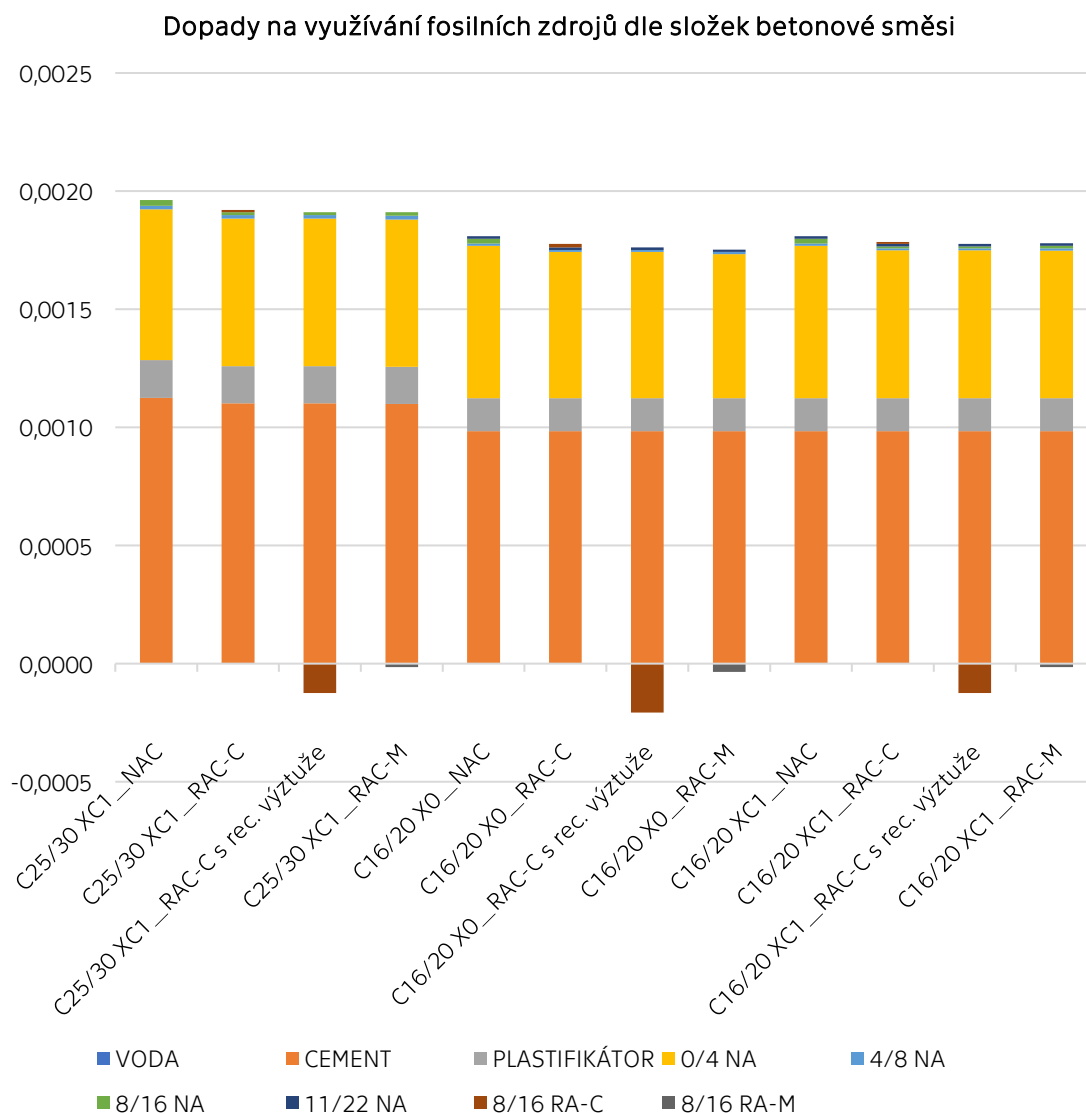
Graf z Obr. č.63 ukazuje, že největší dopad na změnu klimatu má v betonové směsi cement. Přitom tvoří pouze 12 až 14 % hmotnosti navržených betonových směsí. Tyto výsledky potvrzují informace v teoretické části diplomové práce, že výroba cementu má značný vliv na produkci emisí skleníkových plynů a další faktory změny klimatu.



Obr. č.64 – Příspěvky jednotlivých složek betonu v kategorii dopadu „spotřeba čisté vody“ – po normalizaci a vážení.

Z jednotlivých složek navržených betonových směsí se na spotřebě čisté vody nejvíce podílí plastifikátor, jedná se o více než 90procentní podíl na výsledcích této kategorie dopadu viz Obr. č.64.

Na využívání fosilních zdrojů má v betonové směsi největší podíl cement a písek (kamenivo frakce 0/4 mm), oproti tomu jiné frakce kameniva mají zanedbatelný podíl na výsledných hodnotách. Směsný recyklát dokonce přispívá k šetření fosilních zdrojů, jak lze vidět na Obr. č.65.



Obr. č.65 – Příspěvky jednotlivých složek betonu v kategorii dopadu „využívání fosilních zdrojů“ – po normalizaci a vážení.

5.4.5. Vyhodnocení pro konkrétní projekt

V této kapitole budou spočítány environmentální dopady pro vybrané konstrukce objektu základní a mateřské školy v Praze 9. V Tab. 38 jsou uvedeny celkové objemy betonů tříd C25/30 XC1, C16/20 X0 a C16/20 XC1, pro které byly navrženy tři varianty směsí s různým podílem přírodního a recyklovaného kameniva.

Tab. 38 – Výměry betonových konstrukcí pro použití betonu s recyklovaným kamenivem.

| Třída betonu | Celkové množství [m ³] | Procento náhrady hrubé frakce NA | |
|--------------|------------------------------------|----------------------------------|-------|
| | | Typ A | Typ B |
| C25/30 XC1 | 1007,100 | 30 % | 20 % |
| C16/20 X0 | 199,710 | 50 % | 50 % |
| C16/20 XC1 | 482,825 | 30 % | 20 % |

Celkové výměry vychází z Tab. 30, kde jsou podrobně rozepsány všechny konstrukce vybraného projektu, pro které je vhodné použít beton s recyklovaným kamenivem.

Tab. 39 – Celkové výsledky kategorií dopadů pro posuzované konstrukce dle variant betonových směsí.

| Midpointový indikátor kategorie dopadu | Jednotka | Konstrukce z NAC | Konstrukce z RAC-C | Konstrukce z RAC-C s rec. výzt. | Konstrukce z RAC-M |
|---|--------------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Acidifikace | mol H+ eq. | 882,76 | 877,71 | 833,36 | 870,01 |
| Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku | kg CO ₂ eq. | 498 215,56 | 491 168,28 | 470 526,12 | 487 999,62 |
| Ekotoxicita, sladkovodní | CTUe | 3 508 397,63 | 3 470 063,36 | 3 458 383,90 | 3 442 439,49 |
| Eutrofizace, sladkovodní | kg P eq. | 2,95 | 2,90 | 2,89 | 2,90 |
| Eutrofizace, mořská | kg N eq. | 299,51 | 300,76 | 292,93 | 297,81 |
| Eutrofizace, pevninská | mol N eq. | 3 274,16 | 3 288,92 | 3 220,45 | 3 256,75 |
| Toxicita pro člověka, karcinogenní | CTUh | 65,0E-06 | 62,5E-06 | 54,1E-06 | 61,2E-06 |
| Toxicita pro člověka, nekarcinogenní | CTUh | 6 776,9E-06 | 6 547,1E-06 | 6 268,7E-06 | 6397,8E-06 |
| Ionoizující záření, lidské zdraví | kBq U ²³⁵ eq. | 15 008,63 | 14 370,02 | 14 834,61 | 14 330,15 |
| Využívání půdy | pt – bezrozměrné | 290 527,62 | 282 874,18 | 285 162,88 | 275 210,26 |
| Poškozování ozonové vrstvy | kg CFC-11 eq. | 527,9E-06 | 521,1E-06 | 521,1E-06 | 520,2E-06 |
| Tvorba drobných částic | Incidence nemoci | 11 870,0E-06 | 10 878,3E-06 | 10 251,1E-06 | 10100,3E-06 |
| Fotochemická tvorba ozonu, lidské zdraví | kg NMVOC eq. | 866,70 | 871,64 | 839,99 | 866,26 |
| Využívání zdrojů, fosilní | MJ | 2 508 715,66 | 2 461 331,12 | 2 271 701,97 | 2 425 087,04 |
| Využívání zdrojů, nerosty a kovy | kg Sb eq. | 51 672,5E-06 | 49 628,5E-06 | -1 806,6E-06 | 49343,6E-06 |
| Spotřeba čisté vody | m ³ world equiv. | 918 805,39 | 906 259,01 | 902 423,38 | 904 736,01 |

Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, nejšetrnější k životnímu prostředí je beton s recyklovaným směsným kamenivem (případně beton s recyklovaným betonovým kamenivem při započítání recyklace výztuže). Pro tento konkrétní projekt by se dalo ušetřit přes 14 milionů litrů vody a přes 10 tun CO₂, i přesto, že množství cementu v betonových směsích je v podstatě totožné.

Spotřeba přírodního kameniva by byla nižší o více než 500 tun v případě použití betonu s recyklovaným betonovým kamenivem a o necelých 385 tun nižší v případě použití betonu s recyklovaným směsným kamenivem.

5.4.5.1. Dopady přepravy betonových směsí na místo stavby

Vedle dopadů souvisejících s výrobou materiálů je v rámci hranic systému „cradle to site“ analyzována i doprava betonových směsí na stavbu. Přeprava materiálů do výroby betonu nebyla v této diplomové práci zahrnuta vzhledem k nedostatečným zdrojům informací. Objekt Základní a mateřské školy Elektra se nachází v ulici Sousedíkova, nejbližší betonárna v okolí je CEMEX Malešice s.r.o., vzdálená 3 kilometry od místa stavby. CEMEX Czech Republic, s.r.o. však v současné době nenabízí technologii pro výrobu betonu s recyklovaným kamenivem. Nejbližší betonárnou s nabídkou produktů z betonu s recyklovaným kamenivem je TBG Metrostav s.r.o. – Rohanský Ostrov, vzdálená 6 kilometrů od místa stavby. (Případně TBG Metrostav s.r.o. – Praha Libeň, vzdálená 8 kilometrů či Skanska Transbeton, s.r.o. – betonárna Uhřetěves, vzdálená 11 kilometrů od místa stavby.)

Hodnocení dopadů na životní prostředí z přepravy bude provedeno pouze s orientačními údaji, jelikož nebyla k dispozici environmentální data pro autodomíchávač betonu. Z databáze Envimat 3.1 byly získány údaje pro přepravu 1000 kg nákladu na vzdálenost 1 km nákladním automobilem (EURO 3) s celkovou kapacitou do 14 t a užitečným zatížením 9,3 t v externím provozu s mírou využití 85 %. V hodnotách z databáze je zahrnuta těžba a zpracování paliva. Průměrná spotřeba paliva je 2,6 l/100 tkm.

Hodnoty celkové hmotnosti čerstvých betonových směsí s recyklovaným kamenivem jsou uvedeny v Tab. 40.

Tab. 40 – Celková hmotnost betonových směsí s recyklovaným kamenivem pro projekt základní a mateřské školy.

| Veličina | Jednotka | C25/30 XC1 | C16/20 X0 | C16/20 XC1 |
|-------------------------|-------------------|------------|-----------|------------|
| Celkový objem NAC | m ³ | 1007,100 | 199,710 | 482,825 |
| Celkový objem RAC-C | m ³ | 1007,100 | 199,710 | 482,825 |
| Celkový objem RAC-M | m ³ | 1007,100 | 199,710 | 482,825 |
| Objemová hmotnost NAC | kg/m ³ | 2315 | 2299 | 2299 |
| Objemová hmotnost RAC-C | kg/m ³ | 2276 | 2234 | 2254 |
| Objemová hmotnost RAC-M | kg/m ³ | 2276 | 2215 | 2253 |
| Celková hmotnost NAC | t | 2331,4 | 459,1 | 1110,0 |
| Celková hmotnost RAC-C | t | 2292,2 | 446,2 | 1088,3 |
| Celková hmotnost RAC-M | t | 2292,2 | 442,4 | 1087,8 |

V Tab. 41 lze vidět výsledky jednotlivých kategorií dopadů pro přepravu betonových směsí. V případě dodávky betonu z betonárny Rohanský ostrov je jeden obrat autodomíchávače dlouhý 12 kilometrů, v případě betonárny Malešice je tato vzdálenost 6 kilometrů.

Tab. 41 – Celkové výsledky kategorií dopadů pro přepravu betonových směsí z betonárny na stavbu.

| Betonárny | | CEMEX Malešice | TBG Metrostav Rohanský Ostrov | TBG Metrostav Rohanský Ostrov | TBG Metrostav Rohanský Ostrov |
|--|-----------------------------|-------------------|--|--|--|
| Midpointový indikátor kategorie dopadu | Jednotka | SUMA NAC | SUMA NAC | SUMA RAC-C | SUMA RAC-M |
| Acidifikace | mol H+ eq. | 10,37 | 20,73 | 20,34 | 20,32 |
| Změna klimatu, vč. biogenního uhlíku | kg CO ₂ eq. | 1897,50 | 3795,00 | 3723,02 | 3718,86 |
| Ekotoxicita, sladkovodní | CTUe | 18127,45 | 36254,90 | 35567,23 | 35527,47 |
| Eutrofizace, sladkovodní | kg P eq. | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Eutrofizace, mořská | kg N eq. | 4,95 | 9,90 | 9,71 | 9,70 |
| Eutrofizace, pevninská | mol N eq. | 54,77 | 109,53 | 107,46 | 107,34 |
| Toxicita pro člověka, karcinogenní | CTUh | 35,6E-08 | 71,2E-08 | 69,8E-08 | 69,7E-08 |
| Toxicita pro člověka, nekarcinogenní | CTUh | 1505,0E-08 | 3010,0E-08 | 2952,9E-08 | 2949,6E-08 |
| Ionoizující záření, lidské zdraví | kBq U ²³⁵ eq. | 7,65 | 15,31 | 15,02 | 15,00 |
| Využívání půdy | pt – bez-rozměrné | 11258,04 | 22516,08 | 22089,00 | 22064,31 |
| Poškození ozonové vrstvy | kg CFC-11 eq. | 34,5E-14 | 68,9E-14 | 67,6E-14 | 67,5E-14 |
| Tvorba drobných částic | Incidence nemoci | 3944,4E-08 | 7888,8E-08 | 7739,2E-08 | 7730,5E-08 |
| Fotochemická tvorba ozonu, lidské zdraví | kg NMVOC eq. | 9,58 | 19,16 | 18,80 | 18,77 |
| Využívání zdrojů, fosilní | MJ | 24949,82 | 49899,64 | 48953,16 | 48898,44 |
| Využívání zdrojů, nerosty a kovy | kg Sb eq. | 1,5E-04 | 3,0E-04 | 2,9E-04 | 2,9E-04 |
| Spotřeba čisté vody | m ³ world equiv. | 41,72 | 83,43 | 81,85 | 81,76 |

Analýza výsledků ukazuje, že doprava betonu na stavbu představuje maximálně 5–10 % dopadů z celkové vypočítané environmentální stopy daného betonu. Toto zjištění je v souladu s literaturou [214], [216], [217]. Pro komplexní a přesnější výsledky by bylo třeba zjistit i vzdálenosti mezi místem původu složek do betonu (lom, demolice, výroba cementu apod.) a betonárnou a zahrnout tento transport do posouzení dopadů na životní cyklus betonu. Taktéž by bylo třeba znát environmentální parametry pro konkrétní autodomíchač, pro získání přesnějších výsledků.

5.5. Finanční porovnání

Finanční posouzení betonů s recyklovaným a přírodním kamenivem na daném projektu bylo provedeno dvěma způsoby. První spočíval ve výpočtu cen navržených betonů pomocí jednotkových cen materiálů z cenové soustavy ÚRS, viz Tab. 42. V druhé variantě byla porovnána komplexní dodávka betonů na stavbu od tří betonáren, zmíněných již v kapitole 5.4.5.1.

5.5.1. Posouzení cen betonových směsí dle cenové soustavy ÚRS

V rámci prvního způsobu posouzení cen betonů byly uvažovány pouze ceny vstupních materiálů. Výpočet jednotkových cen pro navržené betonové směsi (NAC, RAC-C, RAC-M) byl proveden pomocí kalkulace nákladů pro jednotlivé složky betonových směsí potřebných na výrobu 1 m³ betonové směsi. Množství těchto složek bylo přenásobeno příslušnou jednotkovou cenou dle dat z cenové soustavy ÚRS. Součet cen jednotlivých složek dává výslednou cenu za betonovou směs. Kalkulace nepočítá s mnoha aspekty, které cenu betonu ovlivňují v praxi, jako jsou režijní náklady, náklady na logistiku, energie, změnu technologie a podobně, nelze ji tedy porovnávat s cenami od výrobců betonu.

Tab. 42 – Kalkulace nákladů pro jednotlivé složky betonových směsí (pro 1 m³ betonové směsi).

| Kalkulace nákladů pro 1 m ³ betonu | C25/30 XC1 NAC | C25/30 XC1 RAC-C | C25/30 XC1 RAC-M | C16/20 XO NAC | C16/20 XO RAC-C | C16/20 XO RAC-M | C16/20 XC1 NAC | C16/20 XC1 RAC-C | C16/20 XC1 RAC-M |
|--|-------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| Složky betonové směsi | Cena bez DPH [Kč] | | | | | | | | |
| Voda | 10,4 | 10,7 | 10,9 | 10,7 | 11,3 | 11,7 | 10,7 | 11,3 | 11,5 |
| Cement | 1741,9 | 1706,3 | 1702,1 | 1523,2 | 1523,2 | 1523,2 | 1523,2 | 1523,2 | 1523,2 |
| Plastifikátor | 492,9 | 482,9 | 481,7 | 431,2 | 431,2 | 431,2 | 431,2 | 431,2 | 431,2 |
| Přírodní kamenivo frakce 0/4 (NA) | 371,4 | 363,7 | 363,3 | 375,3 | 359,9 | 354,7 | 375,3 | 363,8 | 363,1 |
| Přírodní kamenivo frakce 4/8 (NA) | 280,0 | 274,3 | 301,4 | 184,0 | 176,4 | 173,8 | 184,0 | 178,3 | 178,0 |
| Přírodní kamenivo frakce 8/16 (NA) | 428,5 | 227,8 | 263,5 | 334,1 | | | 334,1 | 131,9 | 191,5 |
| Přírodní kamenivo frakce 11/22 (NA) | | | | 180,9 | 173,5 | 171,0 | 180,9 | 175,4 | 175,0 |
| Recyklované betonové kamenivo fr. 8/16 (RA-C) | | 110,3 | | | 184,1 | | | 110,3 | |
| Recyklované směsné kamenivo fr. 8/16 (RA-M) | | | 54,7 | | | 130,9 | | | 54,6 |
| Celková cena pro 1 m³ | 3325,1 | 3176,0 | 3177,4 | 3039,3 | 2859,6 | 2796,5 | 3039,3 | 2925,4 | 2928,2 |

Po získání jednotkových cen pro navržené betonové směsi byl proveden výpočet celkových nákladů pro vybrané konstrukce (Tab. 30) z projektu základní a mateřské školy, popsaném v kapitole 5.2.

Tab. 43 – Kalkulace celkových nákladů betonů pro vybrané konstrukce řešeného projektu.

| Kalkulace cen betonů pro vybraný projekt | Celkové množství betonu | Cena NAC bez DPH | Cena RAC-C bez DPH | Cena RAC-M bez DPH |
|--|-------------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| Třída betonu | [m ³] | [Kč] | [Kč] | [Kč] |
| C25/30 XC1 | 1 007,100 | 3 348 687,3 | 3 198 563,9 | 3 200 003,6 |
| C16/20 X0 | 199,710 | 606 988,6 | 571 087,3 | 558 489,9 |
| C16/20 XC1 | 482,825 | 1 467 474,1 | 1 412 448,1 | 1 413 809,5 |
| Celková cena betonů pro vybrané konstrukce na projektu | | 5 423 150,0 | 5 182 099,2 | 5 172 302,9 |

Úspora za materiál by byla dle cenové soustavy ÚRS více než 240 tisíc Kč v případě použití betonu s recyklovaným betonovým kamenivem místo betonu s přírodním kamenivem, jednalo by se o úsporu 4,44 % z cen betonů na řešených konstrukcích. V případě využití betonu s recyklovaným směsným kamenivem by byla úspora ještě vyšší, přes 250 tisíc Kč pro celkový objem betonu na řešených konstrukcích, tj. úspora 4,63 %.

5.5.2. Posouzení cen betonových směsí dle nabídky výrobců betonu

Jako druhý způsob posouzení cen betonů na daném projektu byl zvolen přístup srovnání veřejných ceníků betonáren v okolí stavby, včetně ceny dopravy. Betony uvedené v této kapitole nemají žádnou spojitost s betonovými směsmi navrženými autorkou, není známo jejich přesné složení, je pravděpodobné, že receptury se výrazně odlišují od receptur navržených v diplomové práci. Nicméně pro orientační srovnání cen betonů s přírodním a recyklovaným kamenivem v praxi může být tato kapitola vhodným příspěvkem.

Použité veřejné ceníky byly platné pro rok 2023, všechny jsou součástí Přílohy C. Pro informaci jsou uvedeny ceny betonů s přírodním kamenivem z betonárny CEMEX Malešice s.r.o. vzhledem k tomu, že se jedná o nejbližší betonárnu, vzdálenou 3 kilometry od místa stavby. Výběr dalších betonáren byl již zaměřen na výrobce betonu, kteří nabízejí beton s recyklovaným kamenivem. Jedná se o betonárnu TBG Metrostav s.r.o. – Rohanský ostrov, vzdálenou 6 kilometrů od místa stavby, a betonárku Skanska Transbeton, s.r.o. – Uhřetěves, vzdálenou 11 kilometrů od místa stavby.

V Tab. 44 je uveden rozpočet pro dodávky betonů ze tří zmíněných betonáren. Celkové množství betonů vychází z kapitoly 5.2.1., objem betonů byl přenásoben jednotkovými cenami dle ceníků betonáren. Ani jedna z betonáren nenabízí beton s recyklovaným kamenivem C16/20 XC1, proto byla pro tento materiál uvažována stejná cena jako pro beton s přírodním kamenivem stejné pevnostní třídy a odolnosti proti vlivům prostředí.

Při kalkulaci dopravy bylo nutné postupovat individuálně pro každou betonárnu dle daného ceníku. Do kalkulace nebyly zahrnuty prostoje na stavbě ani další příplatky.

V případě betonárny CEMEX Malešice s.r.o. se doprava betonu autodomíchačem vypočítá dle skutečně přepraveného množství betonu, sazba za dopravu 1 m³ je rozdělena dle tarifních pásem, která uvažují délku cesty autodomíchače jako vzdálenost od betonárny na stavbu a zpět. V případě základní a mateřské školy v ulici Sousedíkova v Praze 9, vzdálené

3 kilometry od betonárny v Malešicích, se jedná o celkovou vzdálenost 6 kilometrů, tj. tarifní pásmo 8.

Cena dodávky betonu z TBG Metrostav s.r.o. – Rohanský ostrov je součtem ceny za počet ujetých kilometrů autodomíchávačem a částek za každou jednu vykládku betonové směsi. Betonárna je od místa stavby vzdálena 6 kilometrů, bylo spočítáno, že pro objem cisterny 5 m³ je nutné provést 202 obrátů pro směs C25/30 XC1, 40 obrátů pro směs C16/20 X0 a 97 obrátů pro směs C16/20 XC1, celkem tedy 339 obrátů autodomíchávače. Tato hodnota se zároveň rovná počtu vykládek betonu na stavbě. Celkový počet najetých kilometrů je součinem počtu obrátů a délky trasy pro jeden obrát, tj. 12 kilometrů.

Ceník společnosti Skanska Transbeton, s.r.o. rozděluje ceny dopravy dle tarifních pásem, tarifní pásmo je dopravní vzdálenost mezi betonárnou a místem vykládky. Betonárna Uhříněves je od místa stavby vzdálená 11 kilometrů, jedná se tedy o tarifní pásmo 12. Dle tarifního pásma je poté stanovena cena za obrát autodomíchávače o objemu cisterny 5 m³, počet obrátů je 339, jak bylo vysvětleno v předchozím odstavci.

Tab. 44 – Porovnání cen dodávky betonů od betonárny CEMEX, SKANSKA, TBG METROSTAV.

| Betonárna | Třída betonu | Celkové množství | MJ | Beton s přírodním kamenivem | Beton s recykl. kamenivem | Beton s přírodním kamenivem | Beton s recykl. kamenivem |
|--|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | | | | jednotk.cena bez DPH [Kč] | | celková cena bez DPH [Kč] | |
| CEMEX Malešice (3 km od stavby) | C25/30 XC1 | 1007,1 | m ³ | 3290,0 | | 3 313 359,0 | |
| | C16/20 X0 | 199,7 | m ³ | 2910,0 | | 581 156,1 | |
| | C16/20 XC1 | 482,8 | m ³ | 2910,0 | | 1 405 020,8 | |
| | Doprava | 1691 | m ³ (pásmo 8) | 220,0 | | 372 020,0 | |
| | | | | SUMA | | 5 671 555,9 | |
| TBG Rohanský ostrov (6 km od stavby) | C25/30 XC1 | 1007,1 | m ³ | 3555,0 | 3240 | 3 580 240,5 | 3 263 004,0 |
| | C16/20 X0 | 199,7 | m ³ | 3195,0 | 2880 | 638 073,5 | 575 164,8 |
| | C16/20 XC1 | 482,8 | m ³ | 3195,0 | 3195 | 1 542 625,9 | 1 542 625,9 |
| | Doprava (5 m ³) | 4068 | km | 60,0 | 60 | 244 080,0 | 244 080,0 |
| | | 339 | počet vykládek | 370,0 | 370 | 125 430,0 | 125 430,0 |
| | | | | SUMA | | 6 130 449,9 | 5 750 304,7 |
| SKANSKA Uhříněves (11 km od stavby) | C25/30 XC1 | 1007,1 | m ³ | 3380,0 | 3330 | 3 403 998,0 | 3 353 643,0 |
| | C16/20 X0 | 199,7 | m ³ | 2990,0 | 2940 | 597 132,9 | 587 147,4 |
| | C16/20 XC1 | 482,8 | m ³ | 3065,0 | 3065 | 1 479 858,6 | 1 479 858,6 |
| | Doprava (5 m ³) | 339 | počet obratů (pásmo 12) | 1950,0 | 1950 | 661 050,0 | 661 050,0 |
| | | | | | | SUMA | 6 142 039,5 |

Z porovnání celkových cen dodávek betonu od betonáren TBG metrostav s.r.o. – Rohanský ostrov a Skanska Transbeton, s.ro. – Uhřetěves vychází pro projekt Základní a mateřské školy Elektra výhodněji ceny od TBG Metrostav s.r.o. pro beton s přírodním i recyklovaným kamenivem. Tento výsledek je ovšem ovlivněn finančními náklady na dopravu, kdy betonárna v Uhřetěvsi se nachází o 5 kilometrů dále od místa stavby než betonárna na Rohanském ostrově. Při porovnání nákladů za materiál bez dopravy vychází pro beton s přírodním kamenivem výhodněji cena od společnosti Skanska Transbeton, s.r.o., celkem o 280 tisíc Kč méně oproti TBG Metrostav s.r.o. Naopak beton s recyklovaným kamenivem je levnější od společnosti TBG Metrostav (produkt R-CRETE®), celková suma je o 40 tisíc Kč nižší než v případě odběru produktu Rebetong od Skansky Transbeton, s.r.o.

Závěr

Stavební průmysl má nezanedbatelný vliv na životní prostředí. Tento sektor hospodářství je celosvětově zodpovědný za produkci až 50 % skleníkových plynů, spotřebu 50 % přírodních zdrojů a vytváření 35 % všech odpadů. Beton je nejčastěji používaný stavební materiál, ve světě se jeho roční spotřeba odhaduje na 33 miliard tun ročně. Významně tedy přispívá k produkci CO₂, které je svázáno především s výrobou a přepravou cementu a kameniva, tedy dvou největších složek betonu.

Vedle snahy o dosažení uhlíkové neutrality je třeba začít intenzivně řešit ubývající zásoby přírodního kameniva a stagnující otevírání nových lomů. Použití recyklovaného kameniva ze stavebních a demoličních odpadů v betonářském průmyslu může šetřit přírodní zdroje kameniva, snížit potřebu prostoru na skládkách a podpořit cirkulární hospodářství ve stavebnictví.

Fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem jsou obvykle horší než u betonu s kamenivem přírodním, přičemž velmi záleží na míře náhrady přírodního kameniva. Obecně se doporučuje náhrada celkového množství přírodního kameniva v betonu za recykláty v míře 15–50 % s nutností provést příslušné zkoušky požadované technickými normami a související legislativou. Beton s recyklovaným kamenivem má kromě možných horších mechanických vlastností i menší odolnost proti vlivům prostředí, což omezuje možnosti jeho uplatnění v konstrukcích. I přesto existuje mnoho příležitostí pro jeho aplikaci, vhodné je jeho využití do podkladních betonů, výplňových konstrukcí či svislých nosných konstrukcí bez zvláštních požadavků na odolnost proti vlivům prostředí. Tento potenciál není v České republice momentálně ani zdaleka naplňován. Přitom s vyšší mírou používání betonu s recyklovaným kamenivem do zmíněných konstrukcí by bylo možné šetřit zdroje vysoce kvalitního přírodního kameniva, které je nenahraditelné pro exponované konstrukce jako jsou mosty, předpjaté konstrukce, vozovky či energetické a vodohospodářské stavby.

Dosažené výsledky a poznatky

Cílem diplomové práce bylo představit rozsáhlou problematiku využívání betonu s recyklovaným kamenivem a ověřit jeho konstrukční, environmentální a finanční dopady na konkrétním projektu.

Provedenými experimenty v praktické části bylo prokázáno, že při následování doporučení normy ČSN 206+A2 (ohledně míry náhrady hrubé frakce kameniva za recyklát) je změna základních mechanických vlastností betonu minimální. V navržených betonových směsích byla náhrada hrubé frakce přírodního kameniva 30 % v případě použití betonového recyklátu a 20 % v případě recyklátu směšného. Střední hodnota pevnosti v tlaku (ref. 43,2 MPa) i tahu (ref. 3,3 MPa) vykazovala stejné či zanedbatelně horší výsledky (o 2–4 %) pro betonový i směšný recyklát vůči referenčním vzorkům. U modulu pružnosti (ref. 43,6 GPa) byl pokles hodnot výraznější (o 12–15 %) oproti betonu s přírodním kamenivem. Pro ověření dalších materiálových charakteristik by bylo třeba provést rozsáhlejší výzkum.

Multikriteriální posouzení použití navržených betonových směsí v rámci projektu Základní a mateřské školy v Praze 9 přineslo pozitivní výsledky (objekt, u kterého lze realizovat celkem přes 1700 m³ betonu s recyklovaným kamenivem). Použití tohoto betonu v rámci zmíněného projektu by bylo finančně výhodnější (úspora 240 až 250 tisíc za materiál – dle ÚRS 2023)

i šetrnější k životnímu prostředí dle výsledků provedené LCA analýzy (úspora 14 milionů litrů vody a více než deseti tun CO₂).

Úspora přírodního kameniva by se pohybovala mezi 385–500 tunami, v závislosti na použitém typu recyklátu.

V rámci dotazníkového šetření byly zjištěny zkušenosti a názory odborné veřejnosti na tento materiál, z více než dvou set odpovědí od stavebních odborníků lze vyvodit, že majoritní většina respondentů souhlasí s vyšší mírou využívání betonu s recyklovaným kamenivem ve stavebnictví. Je však třeba dodat, že je na tento materiál stále pohlíženo s nedůvěrou. Mezi hlavní obavy respondentů patří variabilita kameniva a jeho nejistý původ, větší rozptyl hodnot mechanických vlastností, nedostatečně specifikované požadavky v legislativě a požadavky na testování recyklátů. V neposlední řadě pak také dotazník odhalil prozatím malé praktické zkušenosti respondentů s tímto materiálem. V diplomové práci jsou proto prezentována možná řešení, jak těmto výzvám a překážkám čelit. Důvodů a motivací pro vyšší míru používání betonu s recyklovaným kamenivem je totiž mnoho.

Použité zdroje

- [1] U. Nations, „The Paris Agreement“, United Nations. Viděno: 29. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>
- [2] European Council, „European Green Deal - Consilium“. Viděno: 29. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/>
- [3] „Emisní závazky států“, Fakta o klimatu. Viděno: 10. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/studie/2021-reserse-zavazky-statu>
- [4] International Energy Agency, „An energy sector roadmap to carbon neutrality in China – Analysis - IEA“. Viděno: 29. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>
- [5] „Emisní cíle USA, Číny, Japonska a Ruska – Jaké mají plány?“, E15.cz. Viděno: 10. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/zahranicni/eu-nacrtla-konkretni-kroky-k-prisnym-emisnim-cilum-snaha-nejvetsich-znecistovatelu-zustava-nejista-1382114>
- [6] B. Wang, L. Yan, Q. Fu, a B. Kasal, „A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete“, *Resources, Conservation and Recycling*, roč. 171, s. 105565, srp. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105565.
- [7] M. Saberian, J. Zhang, A. Gajanayake, J. Li, G. Zhang, a M. Boroujeni, „30 - Life cycle assessment (LCA) of concrete containing waste materials: comparative studies“, in *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management*, F. Colangelo, R. Cioffi, a I. Farina, Ed., in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering., Woodhead Publishing, 2022, s. 637–659. doi: 10.1016/B978-0-12-821730-6.00007-3.
- [8] M. Škopán, „Recyklace stavebních a demoličních odpadů v prostředí oběhového hospodářství“, *Sborník recycling*, roč. 2016, 2016.
- [9] „Recyklace Gabko“, Recyklace Gabko. Viděno: 10. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <http://www.recyklacegabko.cz/2016/06/15/recyklace/>
- [10] K. Kabirifar, M. Mojtahedi, C. Wang, a V. W. Y. Tam, „Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review“, *Journal of Cleaner Production*, roč. 263, s. 121265, srp. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121265.
- [11] M. Menegaki a D. Damigos, „A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management“, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, roč. 13, s. 8–15, říj. 2018, doi: 10.1016/j.cogsc.2018.02.010.
- [12] „European Commission, Guidelines for the waste audits before demolition and renovation works of buildings“. 2018.
- [13] J. Pacheco, J. Brito, a M. Lamperti Tornaghi, *Use of recycled aggregates in concrete: opportunities for upscaling in Europe*. 2023. doi: 10.2760/144802.
- [14] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008*. 2008.
- [15] Evropský parlament a Rada Evropské unie, *Směrnice Evropského Parlamentu a Rady (EU) 2018/851*, roč. 32018L0851. 2018. Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/pravo/eu/dokument?celex=32018L0851&date=0>
- [16] T. Pavlů, Ing. J. Pešta, Ing. M. Volf, PhD., a Ing. A. Lupíšek PhD., „Katalog výrobků a materiálů s obsahem druhotných surovin pro použití ve stavebnictví“, lis. 2018.
- [17] European Commission, „Construction and demolition waste – EU rules aim to ensure that this waste is managed in an environmentally sound way, and to contribute to the circular economy“. Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en
- [18] „Directive (EU) 2018/ of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste“, kvě. 2018.
- [19] „EU-27: construction & demolition waste recovery by country“, Statista. Viděno: 5. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/1316268/recovery-rate-of-construction-and-demolition-waste-eu-by-country/>
- [20] European Commission, „Protokol o nakládání se stavebním a demoličním odpadem“. Viděno: 4. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: https://single-market-economy.ec.europa.eu/news/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-2018-09-18_en
- [21] European Commission, *Pokyny pro audity odpadů před demolicí a renovací budov (Guidelines for the waste audits before demolition and renovation works of buildings)*. 2018.
- [22] Český statistický úřad, „Produkce, využití a odstranění odpadů (2022)“, Produkce, využití a odstranění odpadů - 2022. Viděno: 27. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2022>
- [23] Český statistický úřad, „Produkce odpadů za sekce CZ-NACE (2022)“. 2023.
- [24] CZ-NACE, „CZ-NACE Kódy“, CZ-NACE. Viděno: 27. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <http://www.nace.cz/>

- [25] „Graf nakládání s minerálními odpady 2022". Viděno: 27. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/190626997/28002023g9.jpg/b7d9cf2b-4e84-4f6c-b682-f194c12b08a8?version=1.1&t=1702035456730>
- [26] Český statistický úřad, „Produkce odpadů dle jednotlivých kódů katalogu odpadů (2021)". 2022.
- [27] Ministerstvo životního prostředí, „Plán odpadového hospodářství České republiky pro období 2015 – 2024 s výhledem do roku 2035". Ministerstvo životního prostředí, 2022.
- [28] European Commission, *Communication from the Commission to The European Parliament, The Council, The European and Social Committee of the regions – A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe*. 2020. Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>
- [29] Parlament ČR, *Zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech*. 2020. Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541>
- [30] Ministerstvo životního prostředí a Ministerstvo zdravotnictví, *Vyhláška č. 8/2021 Sb. o Katalogu odpadů*. 2021. Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-8/historie>
- [31] Evropský parlament a Rada Evropské unie, *Nářízení Evropského Parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011, roč. 32011R0305*. 2011. Viděno: 26. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/pravo/eu/dokument?celex=32011R0305&date=20210716>
- [32] Ministerstvo životního prostředí, „273/2021 Sb. Vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady", *Zákony pro lidi*. Viděno: 4. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-273>
- [33] Parlament České republiky, „102/2001 Sb. Zákon o obecné bezpečnosti výrobků", *Zákony pro lidi*. Viděno: 12. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-102>
- [34] M. Škopán, „Recyklace stavebních a demoličních odpadů ve světle nových právních předpisů", *Zprávy ČKAIT*. Viděno: 16. září 2023. [Online]. Dostupné z: <https://zpravy.ckait.cz/vydani/2022-01/recyklace-stavebnich-a-demolicnich-odpadu-ve-svetle-nove-legislativy/>
- [35] Ing. S. Zrza, „Posuzování stavebních výrobků", *Konstrukce*, roč. 04/2020, dub. 2020.
- [36] Daswell Machinery Co., Ltd, „Recycling And Reuse of Construction And Demolition Waste", *Daswell Machinery - Professional Supplier*. Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://dwconcretemachine.com/recycling-and-reuse-of-construction-and-demolition-waste/>
- [37] M. Škopán, „Šance a rizika recyklace stavebních a demoličních odpadů (systémy řízení kvality výstupních produktů)". Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10429656-Sance-a-rizika-recyklace-stavebnich-a-demolicnich-odpadu-systemy-rizeni-kvality-vystupnich-produktu.html>
- [38] AZ PARK s.r.o., „Betonový recyklát frakce 0/64". Viděno: 10. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.az-park.cz/sortiment-betonovy-recyklat-fracke-064/>
- [39] AZ PARK s.r.o., „Cihelný recyklát frakce 0/64". Viděno: 10. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.az-park.cz/cihelny-recyklat-fracke-064/>
- [40] „JAK SE RECYKLUJE STAVEBNÍ ODPAD | TŘÍDĚNÍ ODPADU.CZ", *trideniodpadu.cz*. Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluje-stavebni-odpad>
- [41] GEP ECOTECH, „Construction & Demolition Waste Disposal System, C&D Waste Recycling Plant", *GEP ECOTECH*. Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.gepecotech.com/solution/construction-demolition-waste-system.html>
- [42] DSMAC, „Mobile C&D Waste Recycling Plant". Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.dscrusher.com/v3/solutions/production-line/mobile-cdw-recycling.html>
- [43] Picson Construction Equipments Pvt. Ltd., „C&D Waste Recycling Plant", *Picson Construction Equipments Pvt.Ltd*. Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.picsinternational.com/>
- [44] „Velde Pukk - World's Largest C&D Waste Recycling Plant - CDE Projects". Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.cdegroupp.com/about/case-studies/velde-pukk-stavanger-norway>
- [45] Agg-Net a 2016, „The Sustainability Benefits of CDE's Processing Plant for Velde Pukk". Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.agg-net.com/resources/articles/recycling-waste/the-sustainability-benefits-of-cdes-processing-plant-for-velde-pukk>
- [46] BETON SERVER, „Recyklační centra". Viděno: 28. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.betonserver.cz/skladky-suti-recyklace/recyklacni-centra?listtype=rad&l=#fixheadlink>
- [47] T. Pavlů, J. Pazderka, K. Fořtová, J. Řepka, D. Mariaková, a V. Tomáš, „The Structural Use of Recycled Aggregate Concrete for Renovation of Massive External Walls of Czech Fortification", *Buildings*, roč. 12, s. 671, kvě. 2022, doi: 10.3390/buildings12050671.

- [48] Autodoprava Novák, „Betonový recyklát frakce 32/63". Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <http://www.novak-kontejnery.cz/recyklaty/item/56-betonove-32-63.html>
- [49] Morkus Morava s.r.o., „Prodej stavebního recyklátu". Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <http://www.demolice-likvidace.cz/prodej-recyklatu.html>
- [50] Cinderela, „End of Waste criteria protocol for waste used as aggregates", kvě. 2021.
- [51] Autodoprava Novák, „Cihelný recyklát 32/63". Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <http://www.novak-kontejnery.cz/recyklaty/item/59-cihlove-32-63.html>
- [52] „ENVISAN-GEM", Pronájem a přistavení kontejnerů na odpad, zeminu a sutě - České Budějovice - ENVISAN-GEM. Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.envisan.cz/prodej-recyklatu>
- [53] E. A. Ohemeng a S. O. Ekolu, „Comparative analysis on costs and benefits of producing natural and recycled concrete aggregates: A South African case study", *Case Studies in Construction Materials*, roč. 13, s. e00450, pro. 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00450.
- [54] V. W. Y. Tam, M. Soomro, a A. C. J. Evangelista, „A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)", *Construction and Building Materials*, roč. 172, s. 272–292, kvě. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240.
- [55] M. Škopán, „Kapacitní schopnost nahrazení části primárních nerostných surovin recyklovanými SDO", *Sborník recycling*, roč. 2022.
- [56] I. Z. Hlavsa, „Beton s recyklovaný kamenivem (Beton University)", *Beton university*, 2023.
- [57] J. Godány, „Současný stav disponibilních zásob u využívaných ložisek stavebního kamene a štěrkopísku v ČR", *BETON*, roč. 2021, č. 01/2021, led. 2021.
- [58] Ministerstvo financí ČR, „Ozdravný balíček", Ministerstvo financí ČR. Viděno: 28. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://app-mfcr1.azurewebsites.net/cs/ministerstvo/media/ozdravny-balicek>
- [59] D. Mrázek, „Konec kamenolomů a pískoven? Pro stavebnictví problém", Komora Plus. Viděno: 16. září 2023. [Online]. Dostupné z: <https://komoraplus.cz/2023/06/28/konec-kamenolomu-a-piskoven-pro-stavebnictvi-problem/>
- [60] J. Godány, „Zásadní problémy v procesu povolování těžebních záměrů zejména u stavebních surovin", *BETON*, roč. 2021, č. 02/2021, úno. 2021.
- [61] P. Vondráček a J. Godány, „Písek nad zlato: Všichni chtějí stavět, ale nebude z čeho, varuje geolog Godány", *info.cz*. Viděno: 29. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.info.cz/zpravodajstvi/cesko/pisek-nad-zlato-vsichni-chteji-stavet-ale-nejbude-z-ceho-varuje-geolog-godany>
- [62] Z. Hlavsa, R. Coufal, a J. L. Vítek, „Použití recyklovaného kameniva do betonu", *BETON*, roč. 2022, č. 01/2022, led. 2022.
- [63] ČSN EN 206-1 (česká verze evropské normy EN 206-1:2000), *Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 2001.
- [64] ČSN EN 206 (česká verze evropské normy EN 206:2013), *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 2014.
- [65] ČSN EN 206+A1 (česká verze evropské normy EN 206:2013+A1:2016), *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 2017.
- [66] ČSN EN 206+A2 (česká verze evropské normy EN 206:2013+A2:2021), *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*, roč. 732403. 2021.
- [67] Vláda České republiky, *Nařízení vlády č. 312/2005 Sb.* 2005.
- [68] Vláda České republiky, *Nařízení vlády č. 215/2016 Sb.* 2016.
- [69] R. Hela, „Výroba betonu z recyklovaného kameniva v České republice v roce 2022", *Sborník recycling 2022*, roč. 2022, 2022.
- [70] ČSN EN 12620+A1 (česká verze evropské normy EN 12620:2002+A1:2008), *Kamenivo do betonu*. 2008.
- [71] V. Hujer, „Využití jemné frakce recyklovaného kameniva v betonových prvcích", led. 2017, Viděno: 2. září 2023. [Online]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/68105>
- [72] ČSN EN 933-11 (česká verze evropské normy EN 933-11:2009), *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva*. 2009.
- [73] K. Hurtig, M. Rydval, a J. Kolísko, „Opětovné využití stavebního a demoličního odpadu jako recyklovaného kameniva do betonu", *BETON*, roč. 2023, č. 01/2023, led. 2023.
- [74] ČSN P 73 2404, *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace*. 2021.
- [75] C. Vintimilla a M. Etxeberria, „Limiting the maximum fine and coarse recycled aggregates-Type A used in structural concrete", *Construction and Building Materials*, roč. 380, s. 131273, kvě. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131273.
- [76] J. Xiao, Z. Cheng, Z. Zhou, a C. Wang, „Structural engineering applications of recycled aggregate concrete: Seismic performance, guidelines, projects and demonstrations", *Case Studies in Construction Materials*, roč. 17, s. e01520, pro. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01520.

- [77] EN 12620:2002+A1:2008, „Aggregates for concrete“, iTeh Standards. Viděno: 2. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/27c8e34e-993f-4b1a-989f-8a3263dbe9fb/en-12620-2002a1-2008>
- [78] NBN B 15-001:2022, „Concrete – Specification, performance, production and conformity – National supplement to NBN EN 206:2013+A2:2021“. Viděno: 2. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40__id=354020&p40__language__code=en&p40__detail__id=117608&session=0
- [79] Organisme Impartial de Contrôle de Produits pour la Construction, „PTV 406-2003“. 14. říjen 2003.
- [80] „DS/EN 206 DK NA:2023“. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://webshop.ds.dk/en/standard/M375862/ds-en-206-dk-na-2023>
- [81] NF EN 206+A2/CN, „Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206+A2“, Afnor EDITIONS. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-206-a2-cn/beton-specification-performance-production-et-conformite-complement-nationa/fa203976/336018>
- [82] „DIN 1045-2:2023-08, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton__ - Teil__2: Beton“, Beuth Verlag GmbH, srp. 2023. doi: 10.31030/3445766.
- [83] „DIN 4226-101:2017-08, Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN__EN__12620__ - Teil__101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen“, Beuth Verlag GmbH, srp. 2017. doi: 10.31030/2664038.
- [84] „DIN 4226-102:2017-08, Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN__EN__12620__ - Teil__102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle“, Beuth Verlag GmbH, srp. 2017. doi: 10.31030/2664532.
- [85] „NTC 2018 - Technické normy pro stavebnictví“. Viděno: 2. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.studiopetrillo.com/ntc2018.html>
- [86] NEN 8005:2022 nl, „Dutch supplement to NEN-EN 206: Concrete - Specification, performance, production and conformity“. Viděno: 2. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.nen.nl/en/nen-8005-2022-nl-302397>
- [87] J. Karlsen, G. Petkovic, a O. Lahus, „A Norwegian Certification Scheme for Recycled Aggregate (RCA)“, 2002.
- [88] „Platné specifikace LNEC - LNEC - National Civil Engineering Laboratory“. Viděno: 2. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.lnec.pt/pt/servicos/normalizacao-e-regulamentacao/especificacoes-lnec/especificacoes-lnec-em-vigor/>
- [89] „EHE 08 versión en inglés | Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana“. Viděno: 2. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.mitma.gob.es/organos-colegiados/mas-organos-colegiados/comision-permanente-del-hormigon/cph/instrucciones/ehe-08-version-en-ingles>
- [90] Swedish Institute for Standards, SIS, „Standard - Concrete - Application of SS-EN 206:2013+A2:2021 in Sweden SS 137003:2021“, Svenska institutet för standarder, SIS. Viděno: 2. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.sis.se/en/produkter/construction-materials-and-building/construction-materials/concrete-and-concrete-products/ss-1370032021/>
- [91] BS 8500-2:2015+A2:2019, „Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206 - Specification for constituent materials and concrete“. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://knowledge.bsigroup.com/products/concrete-complementary-british-standard-to-bs-en-206-specification-for-constituent-materials-and-concrete?version=standard&tab=history>
- [92] „GB/T 25176-2010 English PDF (GBT 25176-2010)“. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GBT25176-2010>
- [93] „GB/T 25177-2010 English PDF (GBT 25177-2010)“. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GBT25177-2010>
- [94] „GB/T 2573-2008 English Version, GB/T 2573-2008 Test method for aging properties of glass fiber reinforced plastics (English Version) - Code of China“. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.codeofchina.com/standard/GBT2573-2008.html>
- [95] „Works Bureau Technical Circular 12/2002 No. 12/2002 - Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates“, č. 12, bře. 2002.
- [96] „JSA - JIS A 5021 - Recycled aggregate for concrete-class H | GlobalSpec“. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://standards.globalspec.com/std/13137182/JIS%20A%205021>
- [97] „JSA - JIS A 5022 - Recycled aggregate concrete-Class M | GlobalSpec“. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://standards.globalspec.com/std/10385916/jis-a-5022>
- [98] „JSA - JIS A 5023 - Recycled aggregate concrete-Class L | GlobalSpec“. Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://standards.globalspec.com/std/10385917/jis-a-5023>

- [99] Standards Australia, „AS 1141.6.2-1996 (Methods for sampling and testing aggregates, Method 6.2: Particle density and water absorption of coarse aggregate - Pycnometer method)". Viděno: 26. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: https://www.techstreet.com/standards/as-1141-6-2-1996?product_id=2062978
- [100] Standards Australia, „HB 155-2002 Guide to the use of recycled concrete and masonry materials", pro. 2002.
- [101] T. E. e C. Ltda, „Target Normas: ABNT NBR 15116 NBR15116 Agregados reciclados uso". Viděno: 2. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/23795/nbr15116-agregados-reciclados-para-uso-em-argamassas-e-concretos-de-cimento-portland-requisitos-e-metodos-de-ensaios>
- [102] T. Pavlů a M. Šefflová, „Trvanlivost betonu s recyklovaným kamenivem", *Sborník recycling*, roč. 2016, 2016.
- [103] FprEN 1992-1-1:2023, „Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures", iTeh Standards. Viděno: 2. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://standards.itih.ai/catalog/standards/cen/22675aa4-413a-411c-95fc-d709513845de/en-1992-1-1-2023>
- [104] EN 206:2013+A2:2021, „Concrete - Specification, performance, production and conformity", iTeh Standards. Viděno: 2. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://standards.itih.ai/catalog/standards/cen/4f3d2008-978a-47ec-bc12-5660aa40e04d/en-206-2013a2-2021>
- [105] L. Bao a Q. B. Bui, „Recycled aggregate concretes – A state-of-the-art from the microstructure to the structural performance", *Construction and Building Materials*, roč. 257, s. 119522, říj. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119522.
- [106] S. M. S. Kazmi, M. J. Munir, a Y.-F. Wu, „10 - Recycled aggregate concrete: mechanical and durability performance", in *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management*, F. Colangelo, R. Cioffi, a I. Farina, Ed., in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. , Woodhead Publishing, 2022, s. 211–227. doi: 10.1016/B978-0-12-821730-6.00017-6.
- [107] T. Pavlů, K. Fořtová, J. Pešta, J. Řepka, a T. Vlach, „Možnosti náhrady přírodního drobného těžného kameniva v betonu recyklovaným kamenivem-experimentální a environmentální vyhodnocení", *BETON*, roč. 2023, č. 01/2023, led. 2023.
- [108] B. Santos, J. Brito, a S. Silva, „Effect of the source concrete with ASR degradation on the mechanical and physical properties of coarse recycled aggregate - ScienceDirect". Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095894652030113X>
- [109] T. Pavlů, M. Šefflová, a J. Otýs, „Porovnání environmentálních dopadů betonů z přírodního a recyklovaného kameniva", *Sborník recycling*, 2016.
- [110] S. Henková, R. Kantová, P. Liška, a M. Štěrba, „Projekt - Návrh technologických postupů při recyklaci a následném využití při výstavbě v oblastech brownfieldů. – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/22191>
- [111] S. Henková, D. Čech, R. Kantová, a V. Venkrbec, „Projekt - Využití jemných podílů stavební suti vzniklých při recyklaci k rekultivacím – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/22973>
- [112] V. Venkrbec, S. Henková, a I. Rotrekl, „Projekt - Komplexní rekonstrukce panelových domů za využití recyklovaných materiálů a informačního modelu budovy – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/24757>
- [113] R. Hela, M. Holák, a J. Prokeš, „Projekt - Využití recyklovatelných odpadů pro výrobu prefabrikovaných stavebních dílců – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/22895>
- [114] I. Nováková a L. Bodnárová, „Projekt - Využití odpadů z výroby prefabrikovaných betonových dílců jako recyklované kamenivo do betonu – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/25879>
- [115] K. Mikulica, R. Hela, a K. Sovová, „Projekt - Studium vlastností a možností využívání betonového recyklátu pro výrobu betonu – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/28637>
- [116] K. Mikulica a R. Hela, „Projekt - Možnosti využití betonového recyklátu pro opětovné použití ve stavebnictví – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/29639>
- [117] V. Venkrbec, A. Boháček, a M. Brandtner, „Projekt - Envi4BIM – Vývoj datové interoperability založené na aktivním BIM přístupu pro analýzu a posuzování environmentálních aspektů recyklovaných betonů – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/31730>

- [118] M. Lišovský, D. Kocáb, V. Sikorová, a T. Vymazal, „Projekt - Vliv náhrady těžného kameniva betonovým recyklátem na vlastnosti betonu – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/31789>
- [119] V. Sikorová, D. Kocáb, M. Lišovský, a T. Vymazal, „Projekt - Vliv vlastností recyklovaných kameniv na životnost a udržitelnost betonových konstrukcí – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/31791>
- [120] D. Stehlík, O. Dašek, P. Hýzl, a P. Straka, „Projekt - Recyklované stavební materiály pro stavby dopravní infrastruktury – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/29911>
- [121] Z. Keršner a H. Šimonová, „Projekt - Aspekty integrity a trvanlivosti kompozitů s recyklovaným plnivem (InDuRAC) – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/31103>
- [122] M. Brandtner, A. Boháček, a J. Šlanhof, „Projekt - Analýza a posuzování environmentálních aspektů recyklovaných betonů metodou LCA a její implementace do digitálního dvojčete budovy na základě aktivního BIM přístupu – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/32709>
- [123] M. Alexa, D. Kocáb, a M. Lišovský, „Projekt - Vliv mnohonásobného zatěžování na vybrané parametry betonu s náhradou přírodního kameniva betonovým recyklátem – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/32780>
- [124] R. Drochytka, „Projekt - Pokročilé materiály a technologie - ADMATEC – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/30655>
- [125] J. Gemrich, R. Hela, a B. Slánský, „Projekt - Vývoj nízkouhlíkových trvanlivých cementobetonových krytů vozovek – VUT". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/34281>
- [126] Fakulta stavební ČVUT v Praze, „Výzkumné projekty - Fakulta stavební". Viděno: 17. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.fsv.cvut.cz/veda-a-vyzkum/vyzkumne-projekty/>
- [127] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2023". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2023
- [128] J. Topič, „Kompozitní materiály na bázi cementu: Využití betonového recyklátu", dub. 2021, Viděno: 2. září 2023. [Online]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/94182>
- [129] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2014". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2014
- [130] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2015". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2015
- [131] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2016". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2016
- [132] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2017". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2017
- [133] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2018". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2018
- [134] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2019". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2019
- [135] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2020". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2020
- [136] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2021". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2021
- [137] Grantová agentura České republiky, „Možnosti využití mikromletého recyklovaného betonu jako mikroplniva s pojivovými vlastnostmi". Viděno: 19. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/cs/projekty/GA17-06771S>
- [138] Technologická agentura ČR, „Rozvoj mechanicky aktivovaných materiálů na bázi recyklovaného betonu pro progresivní stabilizované a za studena recyklované konstrukční vrstvy". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/cs/projekty/TA04031256>
- [139] Technologická agentura ČR, „Vývoj efektivních nástrojů pro minimalizaci vzniku stavebního a demoličního odpadu, jeho monitoring a opětovné využití". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/cs/projekty/SS03010302>
- [140] RECONMATIC Project | HORIZON, „Automated solutions for sustainable and circular construction and demolition waste management", CORDIS | European Commission. Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://cordis.europa.eu/project/id/101058580>
- [141] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2022". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2022
- [142] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2013". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2013

- [143] Grantová agentura České republiky, „Identifikace materiálových charakteristik cementovláknových kompozit s plným využitím recyklátů". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/cs/projekty/GAP104%2F10%2F1128>
- [144] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2011". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2011
- [145] ČVUT v Praze, „SGS ČVUT 2012". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: https://sgs.cvut.cz/index.php?action=seznam_grantu&rok=2012
- [146] Grantová agentura České republiky, „Analýza fyzikálních a chemických charakteristik cementových kompozitů s užitím recyklovaného kameniva a disperzní polymerové výztuže". Viděno: 23. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/cs/projekty/GA14-17636S>
- [147] P. Hájek, „UCEEB ČVUT - Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze - Recyklovaný environmentální beton pro stavební konstrukce". Viděno: 17. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.uceeb.cz/cz/recyklovany-environmentalni-beton-pro-stavebni-konstrukce/>
- [148] P. Hájek, „UCEEB ČVUT - Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze - Návrh a ověření vlastností betonů s recyklovaným pískem ze stavebních a demoličních odpadů". Viděno: 17. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.uceeb.cz/cz/navrh-a-overeni-vlastnosti-betonu-s-recyklovanym-piskem-ze-stavebnich-a-demolicnich-odpadu/>
- [149] „UCEEB ČVUT - Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze - Katalog a webové stránky recyklace ve stavebnictví". Viděno: 17. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.uceeb.cz/cz/katalog-a-webove-stranky-recyklace-ve-stavebnictvi/>
- [150] „Beton z recyklovaného kameniva R-CRETE® R | TBG Metrostav". Viděno: 5. leden 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.tbg-metrostav.cz/produkty/beton-z-recyklovaneho-kameniva-ecocrete/>
- [151] ESTAV.cz, „Betonový recyklát pro revitalizaci pražských brownfieldů", ESTAV.cz. Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/10688.betonovy-recyklat-pro-revitalizaci-prazskych-brownfieldu>
- [152] S. Group, „Sekyra Group | Developerské projekty Praha". Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://sekyragroup.cz/pages/ekologie-na-rohan-city-zacina-uz-u-betonu>
- [153] B. Slánský, P. Zelinka, a J. Čermák, „Beton z recyklovaného kameniva", *BETON*, roč. 2021, č. 01/2021, led. 2021.
- [154] Skanska a.s., „Technický list - Rebetong – Beton z recyklátu místo přírodního kameniva", č. 1, lis. 2022.
- [155] „Skanska - Rebetong - stavební technické osvědčení". Skanska Transbeton, s.r.o., 5. srpen 2019.
- [156] „Skanska - Rebetong - STO prodloužení". Skanska Transbeton, s.r.o., 10. březen 2022.
- [157] Skanska a.s., „Rebetong", www.skanska.cz. Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.skanska.cz/co-delame/specialni-cinnosti/vyroba-dodavka-a-cerpani-betonu/rebetong/>
- [158] „Skanska - certifikát SŘV - Olomouc". Skanska Transbeton, s.r.o., 31. leden 2017.
- [159] „Skanska - certifikát SŘV - Brno". Skanska Transbeton, s.r.o., 31. leden 2017.
- [160] „Skanska - certifikát SŘV - Řeporyje". Skanska Transbeton, s.r.o., 31. leden 2017.
- [161] „Skanska - certifikát SŘV - Uhřetěves". Skanska Transbeton, s.r.o., 31. leden 2017.
- [162] „Skanska - certifikát SŘV - Veltrusy". Skanska Transbeton, s.r.o., 31. leden 2017.
- [163] „Skanska spouští prodej druhé etapy Modřanského cukrovaru, standardem jsou FVE, recyklace vody a zelené střechy", www.skanska.cz. Viděno: 11. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.skanska.cz/kdo-jsme/media/archiv-tiskovych-zprav/273513/Skanska-spusti-prodej-druhe-etapy-Modranskeho-cukrovaru%2c-standardem-jsou-FVE%2c-recyklace-vody-a-zelene-strechy>
- [164] Materiály pro stavbu, „Rebetong: Beton s přírodním kamenivem stoprocentně nahrazeným stavebními recykláty". Viděno: 29. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/beton/rebetong-beton-s-prirodnim-kamenivem-stoprocentne-nahrazenym-stavebnimi-recyklaty_48251-html/
- [165] Designing Buildings, „Waldspirale". Viděno: 22. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Waldspirale>
- [166] P. Grübl, A. Nealen, a N. Schmidt, „Concrete made from recycled aggregate: Experiences from the building project ‚Waldspirale‘ ", 1999.
- [167] C.-S. Poon a D. Chan, „The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong", *Resources, Conservation and Recycling*, roč. 50, č. 3, s. 293–305, kvě. 2007, doi: 10.1016/j.resconrec.2006.06.005.
- [168] R. K. Dhir *et al.*, „Use of recycled and secondary aggregates in concrete: An overview", led. 2011.

- [169] K. Wang a Iowa State University, Ed., *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, May 20-21, 2004*. Ames: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, 2004.
- [170] Singapore Concrete Institute, „Samwoh Eco-Green Building - A key Milestone Towards Sustainable Development", *SCI CONCRETUS*, kvě. 2010.
- [171] Construction & Demolition Recycling, „Cemex showcases specialty concrete with recycled aggregate in Germany", Construction & Demolition Recycling. Viděno: 22. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.cdrecycler.com/news/cemex-specialty-recycled-aggregate-concrete-berlin/>
- [172] World Cement, „Cemex supplies recycled concrete to Berlin project", World Cement. Viděno: 22. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.worldcement.com/europe-cis/08122015/Cemex-supplies-recycled-concrete-to-Berlin-project-138/>
- [173] J. Xiao, C. Wang, T. Ding, a A. Akbarnezhad, „A recycled aggregate concrete high-rise building: Structural performance and embodied carbon footprint", *Journal of Cleaner Production*, roč. 199, s. 868–881, říj. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.210.
- [174] Holcim, „World's first fully recycled concrete building". Viděno: 19. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.holcim.com/who-we-are/our-stories/fully-recycled-concrete-building>
- [175] „ECOcycle: Enables the World's First Fully Recycled Concrete Building". Viděno: 19. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.lafarge.ae/ecocycle-enables-worlds-first-fully-recycled-concrete-building>
- [176] J. Seeley, „Concrete Recycling: Latest Research & Developments", Moreton Bay Recycling. Viděno: 12. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://moretonbayrecycling.com.au/concrete-recycling-developments/>
- [177] Talpa House, „Trnava". Viděno: 22. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.talpahouse.com/projekt/trnava>
- [178] I. Hollý, M. Pribila, M.-T. Palou, A. Ondák, a J. Prokop, „Talpa House - Prvá aplikácia betónu s recyklovaným kamenivom na Slovensku", *BETON*, roč. 2023, č. 4/2023.
- [179] ČSN EN 13670 (česká verze evropské normy EN 13670:2009), *Provádění betonových konstrukcí*. 2010.
- [180] I. M. Frančíková, „Životní cyklus výstavbového projektu".
- [181] „Stavárna - výstavbový projekt", 2015.
- [182] R. Schneiderová Heraldová, „Výstavbový projekt životní cyklus. Doc.Ing. Renáta Schneiderová Heraldová, Ph.D. - PDF Free Download". Viděno: 25. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/5014432-Vystavbovy-projekt-zivotni-cyklus-doc-ing-renata-schneiderova-heralova-ph-d-heralova-fsv-cvut-cz.html>
- [183] BusinessInfo.cz, „Proces přípravy a realizace projektů | Investiční fáze", BusinessInfo.cz. Viděno: 25. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.businessinfo.cz/navody/proces-pripravy-a-realizace-projektu/>
- [184] BusinessInfo.cz, „Proces přípravy a realizace projektů | Ukončení provozu a likvidace", BusinessInfo.cz. Viděno: 25. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.businessinfo.cz/navody/proces-pripravy-a-realizace-projektu/>
- [185] „Návrh složení cementového betonu - popis metod". Viděno: 20. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/5304028/>
- [186] Českomoravský beton, a.s., „Příručka technologa 2021 - Beton University". Českomoravský beton, 2021.
- [187] Českomoravský cement, a.s., „Technický list - CEM I 42,5 R - Mokrá". září 2023.
- [188] CEMEX Sand, k.s. Provozovna Dobříň, „Prohlášení o vlastnostech – písek frakce 0/4 – pískovna Dobříň". 20. červenec 2020.
- [189] KÁMEN Zbraslav, a.s., „Prohlášení o vlastnostech – přírodní drcené kamenivo frakce 4/8". 2. leden 2020.
- [190] KÁMEN Zbraslav, a.s., „Prohlášení o vlastnostech – přírodní drcené kamenivo frakce 8/16". 2. leden 2020.
- [191] STACHEMA CZ s.r.o., „Technický list - Stachement MM". 22. leden 2013.
- [192] J. Ščučka a P. Martinec, „FAST VŠB - Stavební hmoty".
- [193] ČSN EN 12350-2 (česká verze evropské normy EN 12350-2:2019), *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. 2020.
- [194] ČSN EN 12390-7 (česká verze evropské normy EN 12390 -7:2019), *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. 2020.
- [195] ČSN EN 12390-3 (česká verze evropské normy EN 12390 -3:2019), *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2020.
- [196] ČSN EN 1992-1-1 (česká verze evropské normy EN 1992-1-1:2004), *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 2006.

- [197] ČSN EN 1990 (česká verze evropské normy EN 1990:2002), *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. 2004.
- [198] ČSN EN 12390-5 (česká verze evropské normy EN 12390-5:2019), *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. 2020.
- [199] „ÚRS CZ a.s." Viděno: 6. leden 2024. [Online]. Dostupné z: <http://www.urs.cz>
- [200] E-ZAKAZKY.CZ, „Detail zakázky: Novostavba objektu základní a mateřské školy v lokalitě U Elektry - opakované řízení". Viděno: 6. leden 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.e-zakazky.cz/profil-zadavatele/481d7a41-8176-4a42-9f2d-23d1a76134f5/zakazka/P20V00000008>
- [201] TZÚS, „LCA analýza". Viděno: 22. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.tzus.cz/sluzby/certifikace-budov/prohlaseni-epd-lca-analyza/lca-analyza>
- [202] D. R. Vieira, J. L. Calmon, a F. Z. Coelho, „Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review", *Construction and Building Materials*, roč. 124, s. 656–666, říj. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125.
- [203] Ministerstvo pro místní rozvoj ČR, „Základní pojetí konceptu udržitelného rozvoje". Viděno: 9. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://mmr.gov.cz/cs/ministerstvo/regionalni-rozvoji/informace,-aktuality,-seminare,-pracovni-skupiny/psur/uvodni-informace-o-udrzitelnem-rozvoji/zakladni-pojeti-konceptu-udrzitelneho-rozvoje>
- [204] ČSN EN ISO 14040 (česká verze evropské normy EN ISO 14040:2006), *Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Zásady a osnova*. 2006.
- [205] ČSN EN ISO 14044 (česká verze evropské normy EN ISO 14044:2006), *Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Požadavky a směrnice*. 2006.
- [206] ČSN P ISO TS 14048 (česká verze technické specifikace ISO/TS 14048:2002), *Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Formát dokumentace údajů*. 2003.
- [207] ČSN EN 15804+A2 (česká verze evropské normy EN 15804:2012+A2:2019+AC:2021), *Udržitelnost staveb – Environmentální prohlášení o produktu – Základní pravidla pro produktovou kategorii stavebních produktů*. 2022.
- [208] Udržitelné materiály, „LCA a EPD". Viděno: 29. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <http://www.setrnematerialy.cz/cs/lca-a-epd>
- [209] Odpovědná spotřeba, „Životní cyklus výrobků a metoda jeho posuzování". Viděno: 29. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://odpovednaspotreba.cz/odborne-podklady/zivotni-cyklus-vyrobkuvyrobku/>
- [210] A. H. Hossein, H. AzariJafari, a R. Khoshnazar, „The role of performance metrics in comparative LCA of concrete mixtures incorporating solid wastes: A critical review and guideline proposal", *Waste Management*, roč. 140, s. 40–54, bře. 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2022.01.010.
- [211] „Envimat.cz - LCA". Viděno: 9. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <http://www.envimat.cz/metodika/lca/>
- [212] M. Nehasilová, „Zapojení environmentálních dat do cenové databáze pro stavební rozpočty: Metodika a případové studie". 2021.
- [213] V. Kočí, „Příručka základních informací o posuzování životního cyklu", 2010.
- [214] J. de Brito, H. Hafez, R. Kurda, a J. Silvestre, „26 - Calculation of the environmental impact of the integration of industrial waste in concrete using LCA", in *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management*, F. Colangelo, R. Cioffi, a I. Farina, Ed., in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. , Woodhead Publishing, 2022, s. 553–577. doi: 10.1016/B978-0-12-821730-6.00020-6.
- [215] EU 2021/2279, *Doporučení Komise (EU) o používání metod stanovení environmentální stopy pro měření a sdělování environmentálního profilu životního cyklu produktů a organizací*. 2021.
- [216] T. Kim, S. Lee, C. U. Chae, H. Jang, a K. Lee, „Development of the CO2 Emission Evaluation Tool for the Life Cycle Assessment of Concrete", *Sustainability*, roč. 9, č. 11, Art. č. 11, lis. 2017, doi: 10.3390/su9112116.
- [217] J. Wang a P. Chen, „Producing vaterite by CO2 sequestration in the waste solution of chemical treatment of recycled concrete aggregates", *Journal of Cleaner Production*, roč. 149, s. 735–742, dub. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.148.

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. č.1 – Vlevo: stavební a demoliční odpad [9]; vpravo: stavební a demoliční odpad [9]..... | 14 |
| Obr. č.2 – Země s největší produkcí stavebního a demoličního odpadu v roce 2018 – převzato z [6]. | 15 |
| Obr. č.3 – Množství vyprodukovaného stavebního a demoličního odpadu na obyvatele v roce 2018 – převzato z [6]. | 15 |
| Obr. č.4 – Schéma nakládání se stavebním a demoličním odpadem – převzato z [16]..... | 17 |
| Obr. č.5 – Míra využití stavebního a demoličního odpadu v EU v roce 2018 – data převzata z [19]. | 18 |
| Obr. č.6 – Graf produkce odpadů ve stavebnictví v ČR (2017–2022) [23]..... | 19 |
| Obr. č.7 – Graf nakládání s minerálními odpady v ČR (2022) [25]. | 20 |
| Obr. č.8 – Skládky stavebního odpadu [36]. | 22 |
| Obr. č.9 – Vývojový diagram recyklace stavebního a demoličního odpadu – převzato z [6]. | 24 |
| Obr. č.10 – Betonový recyklát [38]. | 25 |
| Obr. č.11 – Cihelný recyklát [39]. | 26 |
| Obr. č.12 – Mobilní recyklační linka [41]. | 27 |
| Obr. č.13 – Mobilní recyklační linka [36]. | 27 |
| Obr. č.14 – Vlevo: stacionární recyklační linka [43]; vpravo: stacionární recyklační linka [43]. | 28 |
| Obr. č.15 – Stacionární recyklační linka [41]. | 28 |
| Obr. č.16 – Závod na zpracování odpadů Velde Pukk [45]. | 28 |
| Obr. č.17 – Vlevo: ultra jemné recyklované betonové částice, velikost částic pod 0,063 mm [47]; vpravo: jemné recyklované kamenivo do betonu, velikosti částic mezi 0 a 4 mm [47]. | 29 |
| Obr. č.18 – Vlevo: betonový recyklát frakce 4/8 mm [47]; vpravo: betonový recyklát frakce 8/16 mm [47]. | 29 |
| Obr. č.19 – Vlevo: betonový recyklát frakce 32/63 mm [48]; vpravo: betonový recyklát frakce 0/63 mm [49]. | 29 |
| Obr. č.20 – Vlevo: ultra jemné recyklované keramické částice, velikost částic pod 0,063 mm [50]; vpravo: jemné recyklované keramické kamenivo, velikost zrn mezi 0 a 4 mm [47]. | 30 |
| Obr. č.21 – Vlevo: recyklované cihelné kamenivo frakce 4/8 mm [47]; vpravo: recyklované cihelné kamenivo frakce 8/16 mm [47]. | 30 |
| Obr. č.22 – Vlevo: recyklované cihelné kamenivo 32/63 mm [51]; vpravo: směsný recyklát 0/63 mm [52]. | 30 |
| Obr. č.23 – Stavební a demoliční odpady vhodné pro výrobu recyklovaného kameniva do betonu – převzato z [26]. | 32 |
| Obr. č.24 – Vlevo: současný stav provozu kamenolomů v ČR – převzato z [56]; vpravo: současný stav provozu pískoven v ČR – převzato z [56]. | 33 |
| Obr. č.25 – Konstrukce vhodné pro využití betonu s recyklovaným kamenivem (vlastní tvorba). | 38 |
| Obr. č.26 – Schéma tranzitních zón v betonu s recyklovaným kamenivem (vlastní tvorba). | 42 |
| Obr. č.27 – Stará a nová cementová pasta kolem kameniva (foto autorky). | 42 |
| Obr. č.28 – Cihelný a směsný recyklát [151]. | 49 |
| Obr. č.29 – Rebetong [157]. | 51 |
| Obr. č.30 – Waldspirale [165]. | 54 |
| Obr. č.31 – Wetland Park v Hong Kongu [167]. | 54 |

| | |
|---|-----|
| Obr. č.32 – Samwoh Eco-Green Building [168]..... | 55 |
| Obr. č.33 – Budova pro přírodní vědy na Humboldtově univerzitě [171]..... | 56 |
| Obr. č.34 – Twin-tower v Šanghaji [173]..... | 56 |
| Obr. č.35 – Komplex Recygénie. [174]..... | 57 |
| Obr. č.36 – Projekt Talpa House – Trnava [177]..... | 58 |
| Obr. č.37 Nomogram závislosti pevnosti betonu na vodním součiniteli a pevnosti cementu podle Walze – převzato z [185] | 77 |
| Obr. č.38 – Ideální křivky zrnitosti kameniva – převzato z [186]. | 78 |
| Obr. č.39 – Betonový a směsný recyklát frakce 8/16 mm (foto autorky)..... | 81 |
| Obr. č.40 – Zleva: přírodní kamenivo frakce 8/16 mm; recyklované betonové kamenivo frakce 8/16 mm; recyklované směsné kamenivo frakce 8/16 mm (foto autorky). | 82 |
| Obr. č.41 – Zleva: nečistoty ve směsném recyklátu; nečistoty v betonovém recyklátu (foto autorky)... | 83 |
| Obr. č.42 – Výsledky zkoušky zpracovatelnosti jednotlivých záměsí – sednutí kužele..... | 84 |
| Obr. č.43 – Ukázka zkoušky sednutí kužele – záměs RA-M2 – beton s recyklovaným směsným kamenivem (foto autorky). | 85 |
| Obr. č.44 – Uložení betonové záměsí do forem (foto autorky). | 85 |
| Obr. č.45 – Cementové mléko vytékající z netěsnících forem (foto autorky)..... | 86 |
| Obr. č.46 – Vzorky po odbednění, uložené do vody (foto autorky). | 86 |
| Obr. č.47 – Těleso betonu s recyklovaným směsným kamenivem (RA-M2-1) – vlevo: spodní povrch po broušení, vpravo: horní povrch po broušení (foto autorky). | 87 |
| Obr. č.48 – Těleso betonu s recyklovaným směsným kamenivem (RA-M3-2) – vlevo: spodní povrch po broušení, vpravo: horní povrch po broušení (foto autorky). | 87 |
| Obr. č.49 – Válcová tělesa po zkoušce pevnosti v tlaku (foto autorky)..... | 89 |
| Obr. č.50 – Výsledky zkoušek válcové pevnosti v tlaku. | 91 |
| Obr. č.51 – Trámce po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (foto autorky). | 92 |
| Obr. č.52 – Hodnoty pevnosti v prostém tahu přepočtené z výsledků ohybových zkoušek..... | 94 |
| Obr. č.53 – Výsledky zkoušek pevnosti v tahu za ohybu..... | 94 |
| Obr. č.54 – Válcové těleso při zkoušce statického modulu pružnosti (foto autorky). | 95 |
| Obr. č.55 – Výsledky zkoušek statického sečnového modulu pružnosti v tlaku. | 96 |
| Obr. č.56 – Životní cyklus ve stavebnictví, jednotlivé fáze [209]..... | 103 |
| Obr. č.57 – Schéma hranic „od kolébky k bráně“ – převzato z [211]. | 104 |
| Obr. č.58 – Schéma hranic „od kolébky na staveniště“ – převzato z [211]. | 104 |
| Obr. č.59 – Schéma hranic „od kolébky ke hrobu“ – převzato z [211]. | 104 |
| Obr. č.60 – Schéma vstupů na výstupů pro hranice „cradle to site“ – převzato z [202]. | 105 |
| Obr. č.61 – Schéma midpointových a endpointových indikátorů kategorií dopadu – převzato z [202]. | 106 |
| Obr. č.62 – Výsledky kategorií dopadu pro 1 m ³ betonu po normalizaci a vážení. | 114 |
| Obr. č.63 – Příspěvky jednotlivých složek betonu v kategorii dopadu „změna klimatu“ – po normalizaci a vážení. | 115 |
| Obr. č.64 – Příspěvky jednotlivých složek betonu v kategorii dopadu „spotřeba čisté vody“ – po normalizaci a vážení. | 116 |

Obr. č.65 – Příspěvky jednotlivých složek betonu v kategorii dopadu „využívání fosilních zdrojů“ – po normalizaci a vážení117

Seznam tabulek

| | |
|---|-----|
| Tab. 1 Vyprodukované množství odpadů ve stavebnictví mezi lety 2017–2022 v České republice [23]. | 19 |
| Tab. 2 – Množství odpadu skupiny 17 dle Katalogu odpadů za rok 2021 [26]..... | 20 |
| Tab. 3 – Rizika spojená s recyklací železobetonu – převzato z [16]..... | 25 |
| Tab. 4 – Rizika spojená s recyklací zdiva – převzato z [16]..... | 25 |
| Tab. 5 – Tabulka E.2 z ČSN EN 206+A2– Maximální procento nahrazení hrubého kameniva (% hmotnosti) – převzato z [66]..... | 35 |
| Tab. 6 - Význam zkratk – Složky hrubého recyklovaného kameniva podle EN 933–11 [72]..... | 35 |
| Tab. 7 – Tabulka E.3 z ČSN EN 206+A2 – Doporučení pro hrubé recyklované kamenivo dle ČSN EN 12620 – převzato z [66]..... | 36 |
| Tab. 8 – Tabulka N.1 – Přípustný obsah hmot v jednotlivých typech recyklátu [74, s. 24]. | 37 |
| Tab. 9 – Normy zahrnující použití betonu s recyklovaným kamenivem v různých státech..... | 38 |
| Tab. 10 – Přehled podaných grantů na českých vysokých školách mezi lety 2010–2023. | 46 |
| Tab. 11 – Nabídka betonů R-CRETE® [150]. | 49 |
| Tab. 12 Procento nahrazení přírodního kameniva v RAC konstrukcích projektu Waldspirale..... | 54 |
| Tab. 13 – Procento nahrazení přírodního kameniva v RAC konstrukcích projektu Wetland Park [76], [167]. | 55 |
| Tab. 14 – Procento nahrazení přírodního kameniva v RAC konstrukcích projektu Twin-tower. | 57 |
| Tab. 15 – Procento nahrazení přírodního kameniva v RAC konstrukcích projektu TALPA HOUSE [178].. | 58 |
| Tab. 16 – Hlavní činnosti v této fázi a popis příležitosti – využití RAC..... | 72 |
| Tab. 17 – Hlavní činnosti v této fázi a popis příležitosti – využití RAC (pokračování na další straně). | 72 |
| Tab. 18 – Postup navrhování betonu [186] (pokračování na další straně)..... | 75 |
| Tab. 19 – Objemové hmotnosti použitých materiálů..... | 76 |
| Tab. 20 – Vybraná data z tabulky F.1.1 normy ČSN P 73 2404 – Mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu platné v České republice (s předpokládanou životností stavby 50 let)..... | 77 |
| Tab. 21 – Doporučené hodnoty pro množství vody. | 78 |
| Tab. 22 – Navržené receptury ve variantách pro C25/30 XC1..... | 79 |
| Tab. 23 – Navržené receptury ve variantách pro C16/20 X0..... | 80 |
| Tab. 24 – Navržené receptury ve variantách pro C16/20 XC1 (pokračování na další straně). | 80 |
| Tab. 25 – Obsah nečistot v recyklovaném kamenivu..... | 82 |
| Tab. 26 – Data převzatá z tabulky N.1 normy ČSN P 73 2404 [74]..... | 82 |
| Tab. 27 – Rozpis vyrobených vzorků (pokračování na další straně)..... | 83 |
| Tab. 28 – Zatřídění zkoušených betonových směsí do pevnostních tříd..... | 97 |
| Tab. 29 – Výkaz výměr monolitických betonových konstrukcí v projektu základní a mateřské školy..... | 99 |
| Tab. 30 – Tabulka vybraných konstrukcí pro použití betonu s recyklovaným kamenivem..... | 100 |
| Tab. 31 – Kategorie dopadu – převzato z Tabulky 2 z [215]. | 107 |
| Tab. 32 – Výsledky LCIA pro 1 m ³ betonu C25/30 XC1, pro varianty navržených betonových směsí..... | 109 |
| Tab. 33 – Výsledky LCIA pro 1 m ³ betonu C16/20 X0, pro varianty navržených betonových směsí..... | 110 |
| Tab. 34 – Výsledky LCIA pro 1 m ³ betonu C16/20 XC1, pro varianty navržených betonových směsí..... | 111 |

| | |
|---|-----|
| Tab. 35 – Normalizované kategorie dopadů pro C25/30 XC1 pro 1 m ³ betonové směsi | 112 |
| Tab. 36 – Normalizované kategorie dopadů pro C16/20 X0 pro 1 m ³ betonové směsi..... | 112 |
| Tab. 37 – Normalizované kategorie dopadů pro C16/20 XC1 pro 1 m ³ betonové směsi. | 113 |
| Tab. 38 – Výměry betonových konstrukcí pro použití betonu s recyklovaným kamenivem. | 117 |
| Tab. 39 – Celkové výsledky kategorií dopadů pro posuzované konstrukce dle variant betonových směsí. | 118 |
| Tab. 40 – Celková hmotnost betonových směsí s recyklovaným kamenivem pro projekt základní a mateřské školy. | 119 |
| Tab. 41 – Celkové výsledky kategorií dopadů pro přepravu betonových směsí z betonárny na stavbu. | 120 |
| Tab. 42 – Kalkulace nákladů pro jednotlivé složky betonových směsí (pro 1 m ³ betonové směsí)..... | 121 |
| Tab. 43 – Kalkulace celkových nákladů betonů pro vybrané konstrukce řešeného projektu. | 122 |
| Tab. 44 – Porovnání cen dodávky betonů od betonárny CEMEX, SKANSKA, TBG METROSTAV..... | 123 |