WP 1.A.1.1 Využití odpadů z demolic cihelných a betonových objektů jako částečné či úplné náhrady přírodních plniv do cementových betonů

SOUHRNNÁ VÝZKUMNÁ ZPRÁVA

Zpracoval:

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Ing. Klára Křížová, Ph.D.

V Brně dne 12. 1. 2023

T A
Č R

Projekt SS02030008 **Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost (CEVOOH)** je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci **Programu Prostředí pro život**.

1. Řešení projektu v roce 2021

Činnosti na rok 201 byly rozděleny do čtyř základních etap:

1. Rešerše zahraničních norem a směrnice definující požadavky na jednotlivé typy recyklátů.

2. Definice a sumarizace technických požadavků na kameniva z recyklátů pro výrobu betonů.

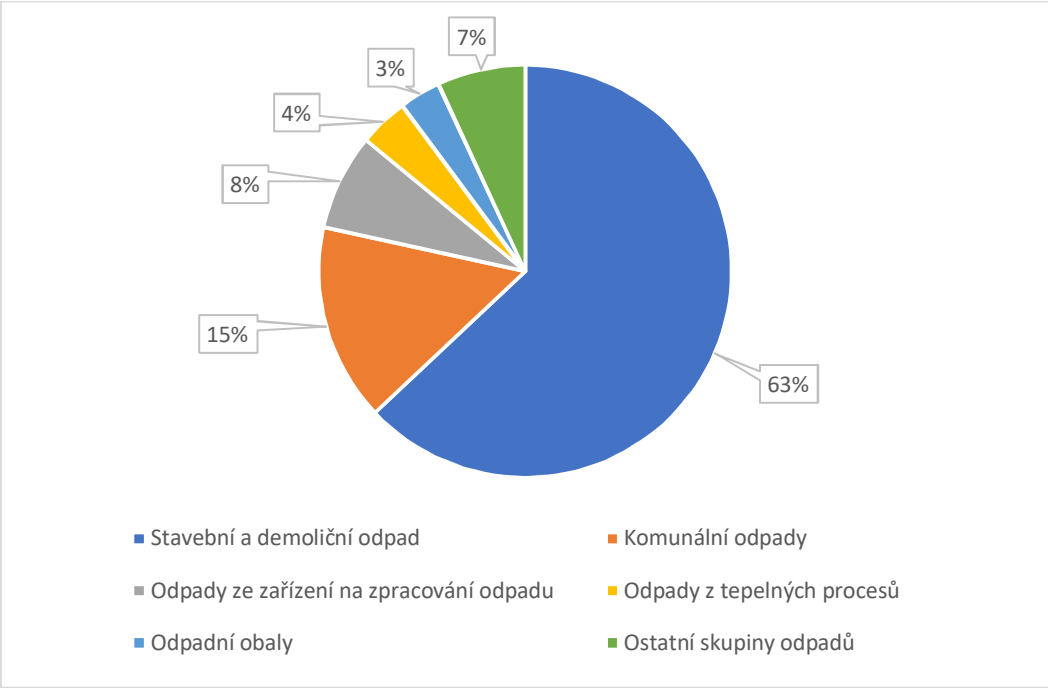
3. Příprava reprezentativních vzorků recyklátů ze zdrojů Jihomoravského kraje.

4. Výroba betonů s cihelným a betonovým recyklátem jako náhrady přírodních kameniv.

Provedené činnosti byly zaměřeny na výběr sledovaných materiálů, resp. vytipování vhodných zdrojů demoličních a stavebních odpadů. Na získaných vzorcích cihelných a betonových recyklátů, byly provedeny základní zkoušky ověřující jejich použitelnost k dalšímu zpracování, tj. pro výrobu betonů různých pevnostních tříd. Primárně jsou tyto materiály tříděny podle jejich původu, následně podle velikosti jednotlivých zrn a jsou stanoveny další sledované parametry jako nasákavost recyklovaného kameniva, která je zásadní vlastností v porovnání s přírodními kamenivy. Uvedené vlastnosti jsou klíčovými parametry, jejichž znalost je zásadní pro jejich další zpracování, zejména pokud se má jednat o částečnou či plnou náhradu za přírodní kameniva. Podstatou věci je také volba správných zkušebních postupů. Porovnány byly základní vlastnosti recyklovaných kameniv z demolic a stavebních odpadů. Významnou částí betonových recyklátů je taktéž otázka dodatečné aktivace. Jedná se o efekt, kdy zbytkový cement v matrici kameniva v betonovém recyklátu, může být vhodnou aktivací vybuzen k dodatečné hydrataci. Tento efekt může napomoci k vývinu pevností betonu, a také dochází ke snížení ekologické zátěže, tj. úspora přírodních zdrojů kameniv a zároveň snížení použité dávky ekonomicky a ekologicky náročného cementu. Sledován byl materiálový potenciál demoličních odpadů, který je zásadní pro další experimentální část. Na základě získaných dat bylo možné přistoupit k návrhu a ověření možnosti použití recyklovaného kameniva v recepturách betonu, v další řešené etapě.

1.1 Normy a směrnice definující požadavky na jednotlivé typy recyklátů

Stavební a demoliční odpady (SDO) vznikají při různých stavebních činnostech, ať už se jedná o výstavbu, rekonstrukci nebo demolici. V roce 2019 tvořil SDO 63 % z celkové produkce odpadů v České republice. SDO jsou také významným potencionálním zdrojem druhotných surovin, proto je upřednostňována recyklace oproti skládkování. Mezi technologické procesy recyklace patří zejména zdrobňování, třídění a separace stavebních sutí a odpadů. Dále to jsou také postupy, které vedou k opětovnému využití stavebních prvků či dílců. Jeden z hlavních faktorů, který je zodpovědný za efektivitu a kvalitu celého procesu recyklace, je třídění demoličního materiálu přímo na místě jejich vzniku.



Obr.1 Celková produkce odpadů v roce 2019 (CENIA)

Od 1. 1. 2021 vstoupil v platnost zákon o odpadech (zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech), který např. uvádí, že od 1. ledna 2030 bude zakázáno skládkovat recyklovatelné odpady. Charakter druhu odpadu přímo souvisí se stavebními technikami, které byly za vzniku konstrukcí, jež jsou nyní demolovány, použity. Dále závisí na druhu a stáří stavby. Kvalita SDO je dále ovlivněna vlastnostmi surovin použitých při výstavbě, způsobem zpracování SDO, skladováním a čistotou.

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

Mezi hlavní recykláty získané z této směsi patří cihelná a betonová drť, které lze využít jako kamenivo do betonu. Pro svou nízkou pevnost v tlaku se cihelná drť používá zejména pro méně náročné stavební hmoty. Mnohem častěji se však využívá jako násypový materiál a jemná cihelná drť se využívá na povrchy sportovišť.

Obr. 2 Druhy recyklátů

1.1.1 Národní technické požadavky na kamenivo z recyklátu

Na recyklované kamenivo se stejně jako na kamenivo přírodní vztahují harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na jednotný evropský trh dle Nařízení (EU) č. 305/2011. Technické požadavky stanoví evropské normy harmonizované k uvedenému Nařízení. Dle stanoveného systému posuzování shody výrobce zajistí provedení zkoušek pro stanovení typu výrobku a u oznámeného subjektu zajistí posouzení a schválení systému řízení výroby, který musí zajistit stálost vlastností deklarovaných výrobcem v rozsahu příslušné harmonizované evropské normy při dodávání výrobku na trh.

Technické požadavky na přírodní recyklované kamenivo stanoví harmonizovaná evropská norma EN 12620:2002+A1:2008 (dále ČSN EN 12620+A1). Jedná se tedy o stavební výrobek, na který výrobce musí povinně vydat prohlášení o vlastnostech a připojuje k němu označení CE. Pouze tento výrobek lze použít pro výrobu jakéhokoliv betonu, nejde-li o kamenivo, na které se tato harmonizovaná norma nevztahuje v rozsahu jejího předmětu. Třídy a úrovně vlastnosti vymezují hranice, ve kterých se hodnoty konkrétního výrobku mohou pohybovat, tedy možný interval hodnot vlastností výrobku.

Uvádění anebo dodávání výrobků na trh se podle ČSN EN 206+A2 řídí legislativou jednotlivých členských států EU. V České republice je tím právním předpisem nařízení vlády č. 163/2002 Sb., ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb. a nařízení vlády č. 215/2016 Sb. ČSN EN 206+A2 je norma určená, tedy stanovující technickou specifikaci na výrobky, podle které se výrobce se musí řídit při dodávání výrobků na trh. Obdobně je to u ČSN P 73 2404.

ČSN EN 206+A2 stanoví v informativní příloze E, mezní hodnoty obsahu recyklovaného kameniva pro beton stupně vlivu prostředí, a to v závislosti na zdroji recyklovaného kameniva. Norma připouští max. 50 % objemu recyklovaného kameniva, jako náhrady hrubého přírodního kameniva pro beton pro třídu prostřední X0. Recyklovaného kameniva typu A i B je možné do betonu, pro stupeň prostředí X0, použít maximálně 50 % (hmotnosti). Pro stupeň XC1 a XC2 je možné použít pouze 30 % recyklovaného kameniva typu A a 20 % typu B. Pro prostředí XC3, XC4, XF1, XA1 a XD1 je možné použít pouze typ A do 30 %. Pro všechny ostatní stupně vlivu prostředí není nadále doporučeno použití recyklovaného kameniva. Recyklované kamenivo typu A musí obsahovat alespoň 90 % betonového recyklátu a méně než 10 % nečistot. Typ B je tvořen minimálně 95 % recyklátu, který je obsahuje minimálně 50 % betonového recyklátu a 45 % recyklátem tvořeným z kameniv, která jsou stmelená hydraulickými pojivy či nestmelená nebo pouze z přírodních kameniv.

Tab. 1 Doporučení pro hrubé recyklované kamenivo podle EN 12620+A1

Vlastnost	**Článek v EN 12620:2002 + A1:2008**	**Druh**	**Kategorie dle EN 12620**
Obsah jemných částic	4.6	A+B	Kategorie nebo deklarovaná hodnota
Index plochosti	4.4	A+B	≤ FI_{50} nebo ≤ SI_{55}
Odolnost proti drcení	5.2	A+B	≤ LA_{50} nebo ≤ SZ_{32}
Objemová hmotnost vysušených zrn ρ_{rd}	5.5	A	≥ 2100 kg/m^3
		B	≥ 1700 kg/m^4
Nasákavost zrn	5.5	A+B	Hodnota musí být určena
Složky	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	≤ $SS_{0,2}$
Obsah ve vodě rozpustných chloridových iontů	6.2	A+B	Hodnota musí být určena
Vliv na začátek tuhnutí	6.4.1	A+B	≤ 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 $FL_{0,2}$			

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 %. Další definovanou vlastností je objemová stálost, kdy smršťování při vysychání musí být menší než 0,075 %.

1.1.2 Mezinárodní technické požadavky na kamenivo z recyklátu

Zahraniční legislativní dokumenty jsou zaměřeny především na možnosti využití recyklovaného kameniva z odpadního betonu, popřípadě cihelných a keramických odpadů z pohledu významnosti a nejvyšší efektivity využití recyklovaného kameniva.

Německo

V Německu jsou dostupné normy popisující požadavky na kamenivo a další omezení na kvalitu betonu. Tyto normy také obsahují definice míry nahrazení kameniva za recyklované kamenivo pro různé typy betonu. Dále jsou stanoveny požadavky, které poskytují informace o procesu demolice. Platí společně s normou DIN EN 12620: 2008-07 pro recyklované kamenivo s objemovou hmotností zrna ≥ 1 500 kg/m^3 pro použití v betonu. Specifikuje testování a vyhodnocování kontrolovaných nebezpečných látek v recyklovaném kamenivu. Použití recyklovaného kameniva 1 a 2 podle této normy a DIN EN 12620: 2008-07 je v normě DIN EN 206-1: 2001-07, DIN EN 206-1 / A1: 2004-10, DIN EN 206-1 / A2: 2005-09 ve spojení s DIN 1045-2: 2008-08 s ohledem na DAfStb beton, recyklované kamenivo. Požadavky na konstrukční požadavky pro typy 3 a 4 podle této normy se vybírají samostatně podle DIN EN 12620: 2008-07.

Dále je platná norma DIN 4226-102, Rezyklierte Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 für Beton - Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle“. Tato norma platí pouze s DIN 4226-101 a DIN EN 12620: 2008-07 pro recyklované kamenivo s objemovou hmotností zrna ≥ 1 500 kg/m^3 pro použití v betonu. Specifikuje typové zkoušky a minimální zkušební frekvence řízení výroby recyklovaného kameniva podle DIN EN 12620: 2008-07, určuje kontrolu kontrolovaných nebezpečných látek.

Rakousko

Norma ÖNORM B 3140: 2015 03 01 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für das Bauwesen“ popisuje využití recyklovaného kameniva ve stavebnictví. Norma v důsledku speciálních rakouských geografických, topografických a klimatických podmínek specifikuje požadavky na recyklované kamenivo pro asfaltové a povrchové úpravy silnic, letišť a ostatních dopravních ploch podle kategorií ÖNORM EN 13043. Tato norma ÖNORM se používá společně s ÖNORM EN 13043. Odstraňování asfaltu pro použití ve směsi zpracovávané za tepla by mělo být postupování v souladu s normou ÖNORM EN 13108-8.

Belgie

Technický předpis PTV 406 “Recycled aggregate from construction and demolition waste” upravuje složení recyklovaného kameniva. Předpis rozlišuje dva druhy recyklovaného kameniva podle jeho složení. Kamenivo je rozděleno na recyklované kamenivo vysoké kvality a recyklované kamenivo. Vlastnosti odpovídají vlastnostem uvedeným v EN 12620.

Tab. 2 Požadované vlastnosti recyklovaného kameniva uvedené v SB250 and NBN B15-001

Vlastnost	**Požadavek**
Velikost částic (mm)	d ≥ 4 and D ≥ 10
Obsah jemných částic	f1.5
Odolnost proti drcení	LA40
Index plochosti	FI20
Složení	RC90/Rcu95/Ra1-/XRg0.5-/Fl2-
Objemová hmotnost v suchém stavu (kg/m^3)	≥ 2200
Nasákavost ve 24 hodinách (%)	≤ 10 ± 2
Sírany rozpustné ve vodě	SS0.2
Obsah humusovitých složek	OSPASS
Vliv na počátek tuhnutí	A40

Nizozemsko

Holandským centrem CUR (Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving) byla vyvinuta specifikace pro použití recyklovaného kameniva. Stanoveny jsou dvě třídy recyklovaného kameniva. Norma definuje minimální objemovou hmotnost recyklovaného kameniva 2100 kg/m^3. Maximální nasákavost kameniva není stanovena a dále norma definuje složení jednotlivých typů recyklovaného kameniva.

1.1.3 Omezení výroby betonu z recyklovaného kameniva podle ČSN EN 206+A2

Současná betonářská norma ČSN EN 206+A2 dovoluje při výrobě betonu nahradit přírodní kamenivo jen částečně. Přitom naše řešení umožňuje použít pro výrobu betonu až 100 % recyklovaného kameniva.

Statici a projektanti se prozatím drží betonářské normy ČSN EN 206+A2 a jen těžko se překonává jejich nedůvěra v beton z recyklovaného kameniva. Přitom beton z recyklovaného kameniva lze bez problémů použít pro základy staveb, podkladní konstrukce, výplňové betony, protihlukové dílce apod. Pokud by projektanti vzali v potaz specifické vlastnosti recyklovaného betonu, dal by se tento použít i do některých konstrukčních prvků budov a našel by tak ještě mnohem širší uplatnění. V této situaci je silně potřebný rychlejší postup v úpravě souvisejících národních norem, které by definovaly požadavky na recyklované kamenivo do betonu a na beton vyrobený z recyklovaného kameniva. Nutná je i větší podpora státu a příslušných ministerstev při využívání recyklovaných stavebních materiálů v praxi.

Je nezbytné měnit zažité postupy při recyklaci stavebních odpadů a zvyšovat využití recyklovaných stavebních materiálů ve stavebnictví, abychom zajistili trvale udržitelný rozvoj na zemi, tak jak to nakonec vyžaduje i nová odpadová legislativa Evropské Unie.

Nová norma či revize by měla reflektovat zejména:

- Zavedení nové definice a označení betonu z recyklovaného kameniva s objemem nad hodnoty uvedené ČSN EN 206 + A2, příloha E.
- Stanovení požadavků na vlastnosti recyklovaného kameniva v rozsahu požadavků ČSN EN 12620 použitelného do betonu i s ohledem na ustanovení Přílohy ZA normy ČSN EN 12620+A1:08.
- Stanovení požadavků na deklaraci určených parametrů ztvrdlého betonu s objemem recyklovaného kameniva nad hodnoty ČSN EN 206+A2, příloha E.
- Stanovení případných dodatečných požadavků na kontrolu shody betonu z recyklovaného kameniva s objemem nad hodnoty ČSN EN 206+A2, příloha E.

1.2 Zdroje recyklátů v Jihomoravském kraji

Podstatná část prací byla věnována výběru a analýze zdrojů SDO v Jihomoravském kraji. Laboratorně byly stanoveny podíly frakcí 0/4, 4/16 a 16/32 mm z jednotlivých typů recyklátů a odlišných technologií drcení ve frakci 0/32 mm. Testování vzorků recyklátů bylo provedeno v souladu s požadavky ČSN EN 12620.

Tab. 3 Dostupnost recyklovaného kameniva v Jihomoravském kraji

Společnost	Betonový recyklát		Cihelný recyklát	
	Frakce [mm]	Cena (bez DPH) [Kč/t]	Frakce [mm]	Cena (bez DPH) [Kč/t]
MORAVOSTAV Brno, a.s. stavební společnost recyklační středisko Modřice	0/8	50	0/8	Zdarma
	8/32	150	8/32	30
DUFONEV R.C., a.s. - deponie	0/16	150	-	-
POKROS, spol. s r.o. - Čebín	4/32	190	4/32	Zdarma
HUTIRA - OMICE, s.r.o.- Kamenolom Omice	0/32	45	-	-
PEDOP s.r.o. - recyklační středisko Lipovec	0/32	100	-	-
TLAK SMOLÍK s.r.o.	0/10	200	-	-
	4/10	400	-	-
	10/32	250	-	-
Očenášek - recyklační centrum Prostějov	8/32	150	8/32	30

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

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

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

Tab. 4 Doporučení na recyklované kamenivo z hlediska vlastností

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

*NSPK – nasáklé povrchově suché kamenivo

Následná tabulka ukazuje, do jaké míry lze využít recyklované kamenivo v závislosti na jeho původu a na charakteristické pevnosti fcu/ck.

Tab. 5 Doporučené použití recyklovaného kameniva v závislosti na charakt. pevnosti

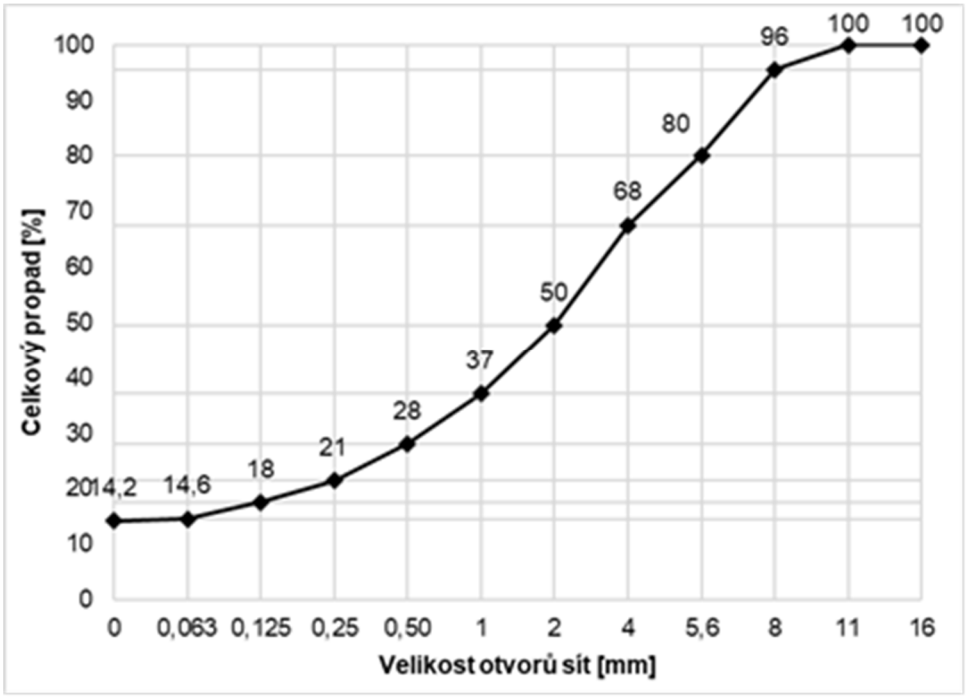
Původ recyklátu	**$f_{cu/ck}$**	**Procento recyklovaného kameniva**
Stavební demolice	< 15 MPa	až do 100 %
Demolice betonu	≤ 25 MPa ≤ 35 MPa	až do 60 % až do 30 %
Drcené prefabrikáty	≤ 55 MPa	až do 5 %

1.3 Výroba betonů s cihelným a betonovým recyklátem jako náhrada přírodního kameniva

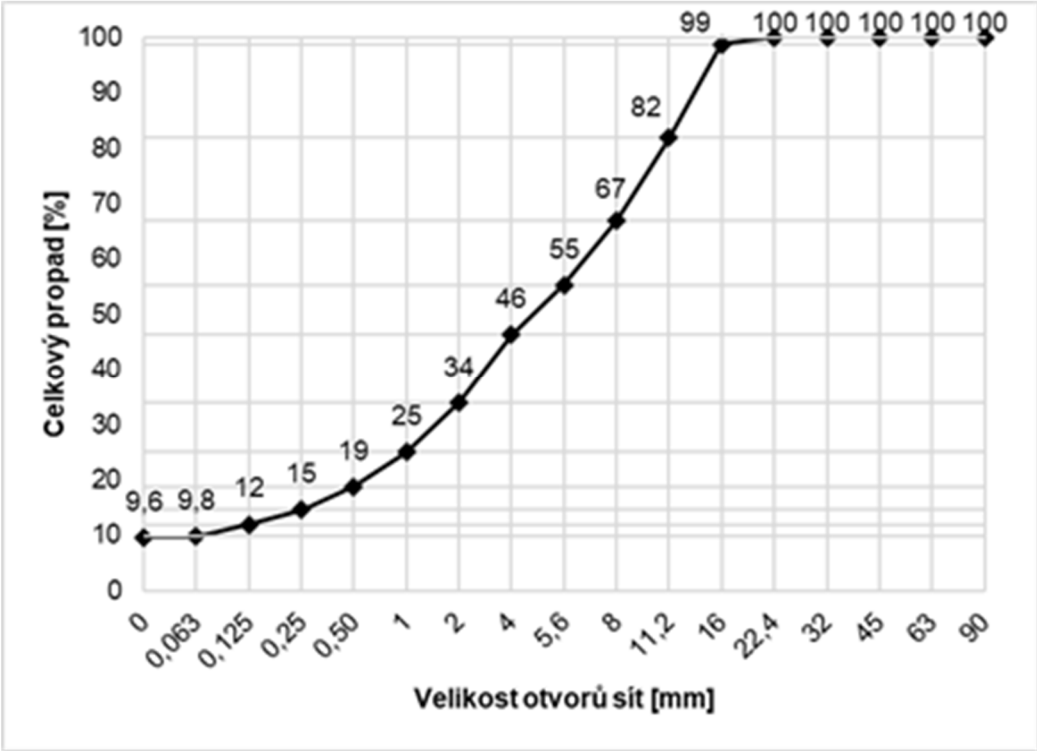
Z reprezentativních vzorků různých zdrojů recyklátu byly zpracovány soubory dat základních vlastností recyklátů použitelných do betonu. Byla analyzována a porovnána stabilita vlastností recyklátů z různých zdrojů a technologií zpracování. Následně byly sestaveny primární receptury betonů s obsahem recyklátu, vyrobeny vzorky a stanoveny sledované parametry betonů v různých pevnostních třídách.

Cihelný recyklát

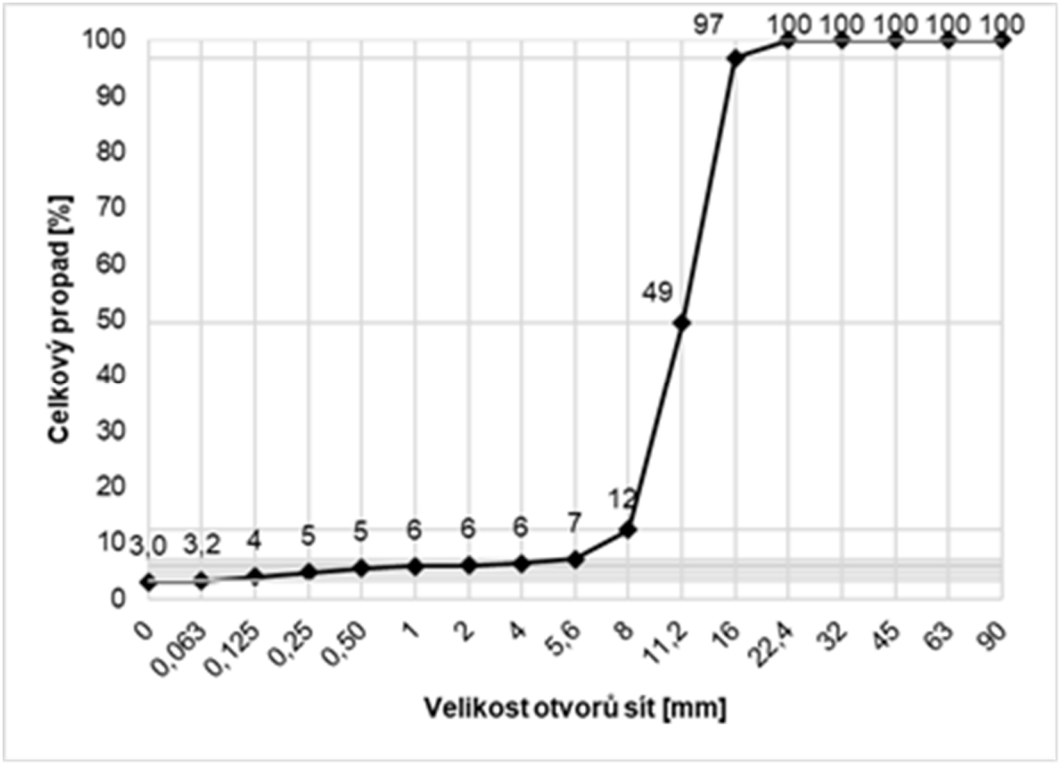
Z reprezentativních vzorků různých zdrojů cihelného recyklátu byly zpracovány soubory dat základních vlastností recyklátů použitelných do betonu. Byla analyzována a porovnána stabilita vlastností recyklátů z různých zdrojů a technologií zpracování. Dosažené výsledky laboratorních zkoušek recyklátů byly porovnány s požadavky na přírodní kameniva do betonů dle ČSN EN 12620. Frakci 0/4 mm je vhodné nahradit z 50 až 65 % přírodním kamenivem. Jako optimální podíl cihelného recyklátu frakce 4/8 se jeví 50 % a zbytek této frakce doplnit přírodním kamenivem. Laboratorně byly odzkoušeny navržené receptury betonů s cihelným recyklátem o max. zrnu 8 a 16 mm.



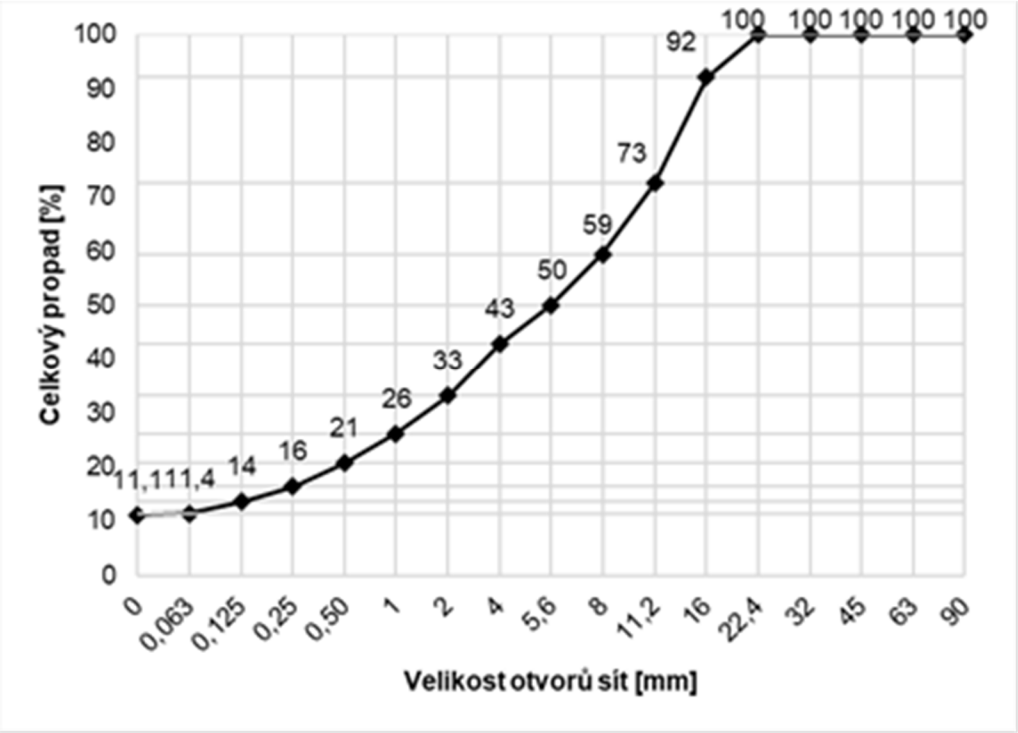
Obr. 3 Příklad křivky zrnitosti cihelného recyklátu 0/8 mm



Obr. 4 Příklad křivky zrnitosti cihelného recyklátu 0/16 mm



Obr. 5 Příklad křivky zrnitosti cihelného recyklátu 8/16 mm



Obr. 6 Příklad křivky zrnitosti cihelného recyklátu 0/22 mm

Před samotnou výrobou betonů bylo potřeba stanovit vlhkost recyklátu. Tato vlastnost zásadně ovlivňuje potřebné množství záměsové vody pro dosažení požadované konzistence. Korekce záměsové vody umožnila vyrobit betony s požadovanou konzistencí čerstvého betonu S4 sednutí kužele. Pevnost v tlaku u navržených betonů se po 7 dnech zrání pohybovala v rozmezí cca 12–22 MPa v závislosti na stanovené pevnostní třídě betonu. Objemová hmotnost ztvrdlých betonů se pohybovala v rozmezí 1800–1900 kg/m^3. Provedené zkoušky signifikují dobrou použitelnost recyklátů pro výrobu různých pevnostních tříd, avšak rozhodující je jejich kvalita a provedení základních rozborů před samotným použitím.

Tab. 6 Příklady návrhu složení betonů s cihelným recyklátem

Složení kg/m^3	**C 20/25**	**C 30/37**
CEM I 42,5 R	305	365
Elektrárenský popílek	60	80
Plastifikační přísada (Mapei)	3,1	3,6
Voda	180	187
Voda pro navlhčení kameniva na 15 %	170	165
Voda záměsová	290	298
Recyklované kamenivo 0/8 mm vysušené	833	745
Recyklované kamenivo 8/16 mm vysušené	360	367
Recyklované kamenivo celkem	1193	1112
Vodní součinitel	0,88	0,75

Betonový recyklát

Negativní dopady má recyklované kamenivo také na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Pro betony s náhradou přírodního kameniva betonovým recyklátem je třeba počítat se zhoršením konzistence, která je závislá především na dávce drobné a jemné frakce a může zvýšit množství záměsové vody až o 15 %. Oproti betonům s přírodním kamenivem klesá pevnost v tlaku o 4–20 %. Vývoje pevnosti v tlaku jsou také zpomaleny, největší nárůst pevností lze pozorovat v prvních 100 dnech. Snižuje se také modul pružnosti o 10–30 % a zvyšuje se nasákavost betonu o cca 20 % a o 20–40 % se zvýší smrštění betonu. Maximální náhrada přírodního hrubého kameniva betonovým recyklátem se pro konstrukční betony jeví do 50 % z celkového objemu kameniva. Betony s recyklovaným betonovým kamenivem je možné použít pro konstrukce v interiéru nebo do základových konstrukcí.

Pro představu byly v rámci experimentu navrženy čtyři betonů v pevnostní třídě C 16/20 a C 30/37 s přírodním kamenivem (NA) a kamenivem recyklovaným (RCA) jako částečné náhrady hrubých frakcí (4/8 a 8/16 mm) přírodních kameniv. Při tomto experimentu bylo zvoleno recyklované kamenivo z původního betonového recyklátu. V případě všech receptur bylo použito konstantní množství cementu a přírodního drobného kameniva frakce 0/4 mm, vždy v sérii podle pevnostní třídy betonu. Z hlediska reologie čerstvého betonu nebyla u betonů C 16/20 použita plastifikační přísada, a to bez ohledu, zda se jednalo o beton pouze s přírodním kamenivem anebo s recyklátem. Naopak u betonů C 30/37 byla plastifikační přísada použita pro dosažení požadované konzistence čerstvého betonu. V následující tabulce je uvedeno složení jednotlivých betonů.

Tab. 7 Složení betonů s přírodním kamenivem (NA) a betonovým recyklátem (RCA)

Složení kg/m³	**C 16/20 NA**	**C 16/20 RCA**	**C 30/37 NA**	**C 30/37 RCA**
CEM I 42,5 R	320	320	360	360
0/4 přírodní	880	880	789	789
4/8 přírodní	190	-	220	-
4/8 recyklované	-	160	-	160
8/16 přírodní	445	-	500	-
8/16 recyklované	-	384	-	382
16/22 přírodní	300	256	297	255
Voda	180	180	170	170
Plastifikační přísada	-	-	2,88	2,88

Na čerstvém betonu byla stanovena konzistence betonu metodou Sednutí kužele. V případě betonů pouze s přírodním kamenivem (NA) bylo dosaženo stupně sednutí S4 (160 mm) a u betonů s recyklovaným kamenivem (RCA) stupně S3 (120 mm).

Výsledky objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a pevnosti v tlaku jak v 7 tak v 28 dnech stáří betonu, vykazují podobný trend vývoje hodnot jak pro navržený C 16/20 i C 30/37. U všech navržených betonů bylo dosaženo požadované pevnostní třídy betonu.

Tab. 8 Výsledky objemových hmotností a pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech

Beton	**Objemová hmotnost D_{ZB} [kg/m^3]**		**Pevnost v tlaku fc [MPa]**	
	7 dní	**28 dní**	**7 dní**	**28 dní**
C 16/20 NA	2320	2300	28,3	32,3
C 16/20 RCA	2230	2220	22,8	24,5
C 30/37 NA	2340	2330	35,9	46,4
C 30/37 RCA	2290	2280	33,1	39,2

Na základě prvotního experimentu výroby betonů s betonovým recyklátem bylo možné konstatovat, že při vhodné skladbě surovin je možné vyrobit takový beton, který bude v čerstvém stavu dosahovat požadované konzistence a bude schopen tuto vlastnost udržet po nutnou dobu až do uložení do konstrukce. Stejně tak je možné dosáhnout hodnot objemové hmotnosti ztvrdlého betonu okolo 2200–2300 kg/m^3. Trend vývoje pevností v čase je shodný s vývojem pevností u betonů pouze s přírodním kamenivem. Je zřejmé, že konečné pevnosti v tlaku nebudou dosahovat totožných hodnot jako u obyčejných betonů. Avšak opět při správném návrhu vstupních surovin není problém se v případě použití betonového recyklátu jako náhrady kameniva přírodního, dostat na hodnoty prokazující splnění pevnostní třídy betonu.

2. Řešení projektu v roce 2022

Počátkem roku 2022 bylo navázáno na získané poznatky laboratorních experimentů z roku 2021 zejména z pohledu znalosti materiálové podstaty recyklátů a jejich definovaných parametrů. Řešením v roce 2021 byly získány soubory hodnot technických parametrů ze souborů zkoušek podle ČSN EN 12 620-1.

Pro cihelné recykláty byly navrženy soubory receptur betonů pro pevnostní třídy C 12/15 až C 25/30 pro stupně agresivity prostředí XO, XC1-3, XD1-2. Tyto betony by byly označovány RC-B Recykled Concrete - Brick. Tímto byl získán soubor receptur betonů, který ukázal dopady na konečné vlastnosti betonů v souvislosti s rozdílnými vlastnostmi cihelných recyklátů a typů použitých frakcí. Testovány byly vliv rozdílné nasákavosti cihelných recyklátů a chování konzistence čerstvého betonu v čase od zamíchání po dobu 90 minut. Na zatvrdlých betonech byl proveden soubor zkoušek a to: pevnost v tlaku po 7, 28 a 60 dech zrání, nasákavosti betonů, pevnost v tahu za ohybu, statický modul pružnosti, smršťování v čase od namíchání do 90 dnů normálního zrání, vodotěsnosti a mrazuvzdornost betonu. Tímto experimentem by

byly dány základy pro vymezení možností použití cihelných recyklátů pro různé pevnostní třídy, konstrukční prvky a prostředí, ve kterém může být zaručena dlouhodobá životnost betonů.

Obdobný metodický postup byl proveden pro betonové recykláty a betony z nich vyrobené označované RC-C Recykled Concrete - Concrete s rozdílem rozptylu pevnostních tříd betonu od C 16/20 až po C 30/37 pro využití ve stupních vlivu prostředí XC 1-4, XD1-3 a XF1-3. Soubor zkoušek na čerstvých a zatvrdlých betonech byl obdobný jako u cihelných recyklátů.

2.1 Beton s náhradou kameniva cihelným recyklátem

V první fázi bylo vybráno p5 typů cihelného recyklátu z různých zdrojů. Nasákavost cihelného recyklátu je podstatná vlastnost ovlivňující zpracovatelnost a výsledné parametry betonu. Vyšší nasákavost cihelného recyklátu je dána vyšší pórovitostí cihelného střepu. Dalším problém v nasákavosti cihelného recyklátu jsou nečistoty, které nasákavost zvyšují. Nasákavost tedy není vlastností, kterou by ovlivňoval proces drcení, ale jde o proces recyklace jako celku, při kterém dochází i k oddělování různých nečistot. V rámci porovnání výsledků recyklátu z odrazového drtiče, které pocházeli z jednoho zdroje, je viditelné, že nasákavost se liší zhruba o 1 %.

Tab. 9 Výsledné hodnoty nasákavosti cihelných recyklátů

Nasákavost	**WA_{24} [%]**
VZ 1	11,8
VZ 2	13,5
VZ 3	9,4
VZ 4	10,1
VZ 5	8,9

Pro výrobu betonů bylo použito recyklované kamenivo z odrazového drtiče. Návrh receptur betonů byl proveden na základě získaných informací, z již proběhlých výzkumů. Pro ověření využitelnosti cihelných recyklátů v betonech bylo vyrobeno 6 různých receptur pro tři pevnostní třídy betonu C 16/20, C 20/25, C 25/30.

Tab. 10 Složení betonů pro pevnostní třídy C 16/20, C 20/25 a C 25/30

Surovina	C 16/20 P	1- C 20/25 P	2- C 20/25 P	C 25/30 P	C 25/30 PN – P
CEM I 42,5 R Mokrá	240	230	250	270	270
Popílek	82	75	80	90	90
Superplastifikační přísada	3,6	3,7	4,0	4,2	4,2
Voda	234	238	200	238	238
Cihelný recyklát 0/22 mm	1013	1020	1050	980	980
Písek 0/4 mm	393	400	400	400	400

Všechny betony dosahovaly v čase 0 kozistenci spadající do třídy S4. Rozdíly se začaly projevovat po určitém časovém prodlení. Zaznamenán byl úbytek konzistence v čase, ve většině případů se výsledek zkoušky sednutí snížil po 30-ti minutách na třídu S2 a po 60-ti minutách byl výsledek sednutí u většiny zatříděn do kategorie S1.

Tab. 11 Výsledné hodnoty konzistence betonů

Beton	Konzistence [mm]				Konzistence třída [–]			
	0 min.	30 min.	60 min.	120 min.	0 min.	30 min.	60 min.	120 min.
C 16/20 P	180	60	30	20	S4	S2	S1	S1
2–C 20/25 P	170	70	50	20	S4	S2	S2	S1
1–C 20/25 P	190	70	30	20	S4	S2	S1	S1
C 25/30 P	210	90	50	30	S4	S2	S2	S1
C 25/30 – PN P	200	130	80	50	S4	S3	S2	S2

Pevnost v tlaku byla stanovena na krychlích o rozměru 100 x 100 x 100 mm. Zkouška se prováděla na betonech ve stáří 7, 28 a 60 dní. Vzorky byly před zkouškou uloženy ve vodním prostředí

Tab. 12 Výsledné hodnoty pevnosti v tlaku zkoušených vzorků betonů

Beton	Pevnost v tlaku [MPa]		
	7 den	28 den	60 den
C 16/20 P	17,1	24,0	27,9
1–C 20/25 P	24,6	34,7	35,3
2–C 20/25 P	22,9	28,1	37,9
C 25/30 P	22,4	32,1	39,5
C 25/30 – PN P	23,6	32,3	38,8

Při porovnání pevnosti s cihelným recyklátem a betonem s přírodním kamenivem byl sledován snižující se trend pevnosti betonu.

Mrazuvzdornost betonu byla zkoumána na zkušebních trámcích o rozměru 100 x 100 x 400 mm v 28 dnech stáří v nasyceném stavu. U některých vzorků došlo během zkoušky k rozpadu, a proto byla zkouška ukončena dříve, než v normou stanovených 100 cyklech. Index mrazuvzdornosti je závislý na pórové struktuře betonu, v níž se nachází voda, která vlivem zmrazovacích cyklů nabývá na svém objemu a vytváří tlak na stěny pórů. V tento moment dochází k vytváření trhlinek, do nichž dále expanduje voda v rámci rozmrazovací fáze cyklu. Beton se dá požadovat za mrazuvzdorný, pokud je jeho index mrazuvzdornosti vyšší než 0,75. U referenčních betonů se index mrazuvzdornosti pohybuje mezi hodnotou 0,89 až 0,92.

Tab. 13 Výsledné hodnoty indexu mrazuvzdornosti pro zkoušené betony

Beton	**Index mrazuvzdornosti [–]**	**Počet cyklů [–]**
C 16/20 P	0,55	82
1–C 20/25 P	0,98	100
2–C 20/25 P	0,93	100
C 25/30 P	0,81	100
C 25/30 – PN P	0,07	75

Z hlediska srovnání dalších vlastností betonů s obsahem cihelného recyklátu a betonů s přírodním kamenivem bylo zjištěno mírné zhoršení vlastností, především u statického modulu pružnosti, pevnosti v tahu za ohybu a odolnosti vůči průniku tlakové vody. Ovšem na druhou stranu se podařilo vyrobit betony v požadované pevnostní třídě. Z hlediska využitelnosti těchto betonů v praxi, je jejich zásadním probléme ztráta zpracovatelnosti v čase.

Dle výsledků zkoušek lze konstatovat, že beton s cihelným recyklátem je v určitém omezení použitelný v konstrukčních aplikacích. Vzhledem k jeho vlastnostem je vhodný pro C 16/20 X0, dále C 20/25 X0, XC1 a pro pevnostní třídy C 25/30 X0, XC1, XC2, XD1.

2.2 Beton s náhradou kameniva betonovým recyklátem

Tato část experimentu měla za cíl stanovení fyzikálně-mechanických vlastností betonů s obsahem přírodního a recyklovaného kameniva. Byly navrženy receptury v pevnostních třídách C 20/25 a C 30/37. Sledována byla zejména konzistence v čase od zamíchání a vybraným zkouškám ztvrdlých betonů.

Primárně byla stanovena nasákavost vzorků betonového recyklátu. Nejnižší nasákavosti 5,2 % dosáhl betonový recyklát 11/22 mm, nejvyšší naopak frakce 4/11 mm. Všechny betonové recykláty dosahovaly objemové hmotnosti > 2000 kg/m^3 a nasákavosti do 10 %, tudíž dle ČSN 73 2404 spadají do kategorie recyklovaného kameniva „TYP 1“.

Tab. 14 Výsledné hodnoty nasákavosti betonových recyklátů

Nasákavost	WA_{24} [%]
0/4 mm	6,1
4/11 mm	7,3
8/16 mm	5,8
11/22 mm	5,2

S ohledem na výsledky zkoušek provedených na kamenivu z betonového recyklátu bylo navrženo 7 receptur betonů, a to betonů s přírodním kamenivem a betonovým recyklátem.

Tab. 15 Přehled návrhu složení betonů pro pevnostní třídy C 20/25 a C 30/37

Beton	TK 0/4 mm Žabčice	DK 8/16 mm Olbramovice	DK 11/22 mm Olbramovice	Betonový recyklát 0/11 mm	Betonový recyklát 8/16 mm	Betonový recyklát 11/22 mm	CEM I 42,5 R	Voda	Plastifikační přísada
REF C 20/25	865	647	300	-	-	-	315	132,8	2,8
REF C 30/37	817	656	289	-	-	-	356	151,4	3,2
RECBET HK C 20/25	639	-	-	-	765	363	315	156,6	2,8
RECBET HK C 30/37	620	-	-	-	750	330	356	129,3	3,2
RECBET 11/22 C 30/37	800	652	-	-	-	301	356	138,8	3,2
RECBET 8/16 C 30/37	647	-	308	-	811	-	356	141,4	3,2
RECBET 100 C 20/25	-	-	-	858	545	364	315	174,8	2,8

Na čerstvém betonu byla stanovena konzistence S4. Nasákavost betonového recyklátu způsobuje odjímání vody z betonové směsi, což se projevuje na zhoršení konzistence v čase. Dle očekávání se nejnižší pokles konzistence v čase projevil u REF C 20/25 a REF C30/37, ale také u RECBET 11/22 C 30/37, kde byla dávka recyklátu pouze 17 % z celkového množství kameniva.

Tab. 16 Stanovení konzistence čerstvého betonu zkouškou sednutím v čase do 120 minut

Beton	**Hodnota sednutí [mm]**		
	0 min	**60 min**	**120 min**
REF C 20/25	180	50	20
REF C 30/37	180	40	10
RECBET HK C 20/25	170	10	0
RECBET HK C 30/37	180	10	0
RECBET 11/22 C 30/37	180	40	10
RECBET 8/16 C 30/37	190	20	0
RECBET 100 C 20/25	170	0	0

Pevnost v tlaku betonu byla stanovena jak pro referenční, tak pro betony s betonovým recyklátem po 7 a 28 dnech ve vodním uložení.

Tab. 17 Výsledné hodnoty pevnosti v tlaku zkoušených vzorků betonů

Beton	**Pevnost v tlaku [MPa]**	**Pokles vůči REF [%]**	**Pevnost v tlaku [MPa]**	**Pokles vůči REF [%]**
	7 dní		**28 dní**	
REF C 20/25	56,3	-	67,5	-
REF C 30/37	59,4	-	69,2	-
RECBET HK C 20/25	38,0	32,5	45,3	32,9
RECBET HK C 30/37	48,6	18,2	55	20,5
RECBET 11/22 C 30/37	52,8	11,1	59,2	14,5
RECBET 8/16 C 30/37	46,6	21,5	56	19,1
RECBET 100 C 20/25	16,4	70,9	22,8	66,2

Pevnost betonu se snižovala s navyšujícím se množstvím recyklovaného kameniva. Dle očekávání bylo nejnižší pevnosti v tlaku dosaženo u betonu se 100% náhradou přírodního kameniva betonovým recyklátem.

2.3 Mezní hodnoty použitelnosti recyklátů pro zavedení do v

Výstupem řešení projektu jsou průkazní zkoušky betonů s cihelným RC-B a betonovým RC-C recyklátem.

Základní kroky pro úpravu příslušných norem pro bezpečné použití recyklátů v praxi:

- Homogenita dodávek recyklátu
- Vhodnost použití recyklátů do pevnostních tříd:

  Cihelný recyklát C 16/20, C 20/25 a C 25/30

  Betonový recyklát C 25/30 a C 30/37

- Identifikace/označení betonů s recykláty

  RC-B 16/20 (cihelný), RC-C 30/37 (betonový)

- Vytřídění recyklátů na obdobné frakce jako přírodní kameniva, tj. optimálně frakce 0/4, 4/16 a 16/32 mm z jednotlivých typů recyklátů a odlišných technologií drcení.
- Maximální náhrada přírodního hrubého kameniva betonovým recyklátem pro konstrukční betony do 50 % z celkového objemu kameniva.
- Cihelný recyklát ve frakci 0/4 mm je vhodné nahradit z 50 až 65 % přírodním kamenivem. Optimální podíl cihelného recyklátu frakce 4/8 50 %.

Tab. 18 Mezní hodnoty použitelnosti recyklátu

Parametr		**Mezní hodnota**
Zrnitost (frakce 4-8, 8-16, 11-22 mm)	Nadsítné podíly	max. 5 %
	Podsítné podíly	max. 5 %
Tvarový index		SI ≤ 15
Obsah jemných částic	max. zbytek na sítě 0,063 mm	max. 1,5 %
Nasákavost		max. 8 %
Objemová hmotnost		2100 kg/m^3
Sypná hmotnost (v setřeseném stavu)		1500 kg/m^3
Mrazuvzdornost		F_4
Obsah chloridů ve vodním výluhu		max. 10 mg/l
Obsah síranů ve vodním výluhu		max. 250 mg/l
Hodnota pH		6-7