



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE, MECHANIZACE A ŘÍZENÍ STAVEB

INSTITUTE OF TECHNOLOGY, MECHANIZATION AND CONSTRUCTION MANAGEMENT

## OPTIMALIZACE RECYKLÁTŮ Z BETONOVÝCH PREFABRIKÁTŮ A JEJICH CHARAKTERISTIKY PRO INFORMAČNÍ MODEL BUDOVY

OPTIMIZATION OF RECYCLED CONCRETE MATERIALS FROM PRECAST CONCRETE  
ELEMENTS AND THEIR CHARACTERISTICS FOR BUILDING INFORMATION MODEL

### TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

#### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Václav Venkrbec

#### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Svatava Henková, CSc.

#### VEDOUCÍ SPECIALISTA

SUPERVISOR SPECIALIST

Prof. Dr. Uroš Klanšek

BRNO 2021

## ABSTRAKT

V disertační práci je řešeno téma využití recyklovaného kameniva z betonů, získaných z dekonstruovaných částí prefabrikovaného panelového bytového domu, následná optimalizace dodavatelsko-logistického systému při aplikaci recyklovaných betonů do konstrukčního betonu v rámci nové budovy. V rámci nově vyvinutého optimalizačního algoritmu dodavatelů čerstvého betonu byla intenzivně využita negrafická data z informačního modelu budovy (BIM). Práce se rovněž věnuje přenosu dat z a do informačního modelu a definování charakteristik, potřebných pro optimalizaci celého procesu. V teoretické rovině se práce zabývá komplexní rešerší výše zmíněných oblastí. Experimentální část práce je zaměřena na materiálový výzkum prováděný za účelem ověření vhodnosti konkrétního typu recyklovaného betonového kameniva (RCA) do recyklovaného betonu (RAC) pro konstrukční využití. Práce seznamuje s provedenými postupy a výsledky zkušebních testů dvou druhů recyklovaného kameniva a následně prezentuje vytvořenou škálu nových receptur směsí recyklovaných betonů s částečnou náhradou kameniva za recyklované kamenivo, pocházejícího z prefabrikovaných panelů z výškových budov. Získané výsledky zkoušek prokazují technickou vhodnost testovaných zdrojů RCA pro výrobu konstrukčních RAC se střední pevností. Významnou částí analyticky orientované experimentální části práce je logisticko-optimalizační scénář s vlastním maticovým diskrétním algoritmem a ekonomickým grafickým vyhodnocením. Případová studie prověřuje relevantnost navrženého algoritmu na reálném scénáři, a sice stavbě vědeckého technologického institutu CEITEC v Brně. Dále je v práci shrnuta problematika BIM a prezentována metodika nakládání s negrafickými informacemi modelu budovy pro definování charakteristik betonových recyklátů v budovách. Závěry jsou adresovány jak pro praxi, tak pro rozvoj vědních oborů. Práce poskytuje prakticky směřované nové informace konkrétním výrobcům a dodavatelům betonových směsí z oblasti zpracování prefabrikovaných panelů z dekonstruovaných budov, shromažďování vhodných RCA a s výrobou nového konstrukčního RAC a demonstruje vhodnost navrženého algoritmu pro nalezení optimálního dodavatele betonu s ohledem na ekonomické a environmentální kritérium.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Recyklace; recyklované betonové kamenivo; RCA; recyklovaný beton; RAC; prefabrikovaný panel; panelový dům; dekonstrukce budovy; stavební a demoliční odpad; SDO; optimalizační metody; receptura betonu; informační management budovy; BIM; životní cyklus stavby; cirkulační ekonomika; udržitelná výstavba.

© Václav Venkrbec

Listinná verze disertační práce je uložena v Knihovnickém informačním centru Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně. Elektronická verze je uložena v Digitální knihovně VUT v Brně v repozitáři DSpace, dostupném online na adrese: <https://dspace.vutbr.cz>

# OBSAH

<b>1. MOTIVAČNÍ ÚVOD DO PROBLEMATIKY</b>	<b>5</b>
1.1. Recyklované betonové kamenivo.....	6
1.2. Problematika panelových budov .....	7
1.3. Informační management budov.....	8
1.4. Optimalizační metody ve stavebním managementu.....	9
<b>2. VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>10</b>
2.1. REFLEXE A KONTEXTUALIZACE PROBLEMATIKY .....	10
2.2. CÍLE PRÁCE .....	10
2.3. STANOVENÍ VĚDECKÝCH HYPOTÉZ .....	11
<b>3. METODY ZPRACOVÁNÍ</b>	<b>11</b>
3.1. METODICKÝ RÁMEC NAKLÁDÁNÍ S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM .....	11
3.1.1. I. fáze – vstup – zdroj materiálu .....	14
3.1.2. II. fáze – klasifikace zdroje.....	14
3.1.3. III. fáze – zpracování zdroje .....	14
3.1.4. IV. fáze – procesy zpracování RCA .....	15
3.1.5. V. fáze – procesy zpracování RAC.....	16
3.1.6. VI. fáze – výstupy – zpracovaný materiál .....	16
3.2. Odběr a příprava zkušebních vzorků.....	16
3.2.1. Stanovení zrnitosti kameniva – síťový rozbor .....	17
3.2.2. Stanovení množství jemných částic.....	18
3.2.3. Stanovení tvaru zrn – tvarový index.....	18
3.2.4. Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti .....	19
3.2.5. Stanovení odolnosti proti drcení metodou Los Angeles.....	19
3.3. METODY NÁVRHU RECEPTUR BETONU .....	20
3.3.1. Poměry frakcí kameniva dle Fullerovy křivky .....	20
3.3.2. Poměr záměsové vody k množství cementu.....	20
3.3.3. Stanovení dílčích složek betonové směsi .....	21
3.3.4. Stanovení cen směsí recyklovaných betonů .....	21
3.4. Rámece optimalizačního výzkumného přístupu .....	22
3.4.1. Vybrané části modelu v prostředí MATLAB .....	23

3.5. Metody tvorby negrafických dat pro charakteristiky RAC v BIM .....	26
<b>4. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO PROGRAMU</b>	<b>26</b>
4.1.1. I. fáze – vstup – zdroj materiálu .....	26
4.1.2. II. fáze – klasifikace zdroje .....	26
4.1.3. III. fáze – zpracování zdroje.....	27
4.1.4. IV. fáze – procesy zpracování RCA.....	28
4.1.5. V. fáze – procesy zpracování RAC .....	30
4.2. Export dat z BIM a import do prostředí optimalizačních výpočtů .....	32
4.3. Případová studie a výsledky optimalizace .....	33
4.3.1. Logistický model.....	33
4.3.2. Okrajové podmínky a limity .....	34
4.3.3. Výsledky optimalizace dodavatelů transportbetonu .....	34
<b>5. DISKUZE A SOUHRNNÝ ZÁVĚR</b>	<b>37</b>
<b>6. LITERATURA A ZDROJE</b>	<b>39</b>
<b>VYBRANÁ PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA</b>	<b>42</b>
<b>ŽIVOTOPIS</b>	<b>43</b>

# 1. MOTIVAČNÍ ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Budovy a stavební průmysl mají významný dopad na využívání globálních zdrojů a generují přibližně 40 % celkové celosvětové produkce odpadu [1], což jsou cca 3 miliardy tun odpadu ročně [2]. Snižování objemu stavebního a demoličního odpadu je proto pochopitelně jednou ze světových i Evropských priorit [3, 4]. V této souvislosti je jedním z definovaných cílů členských států EU recyklovat alespoň 70 % stavebního a demoličního odpadu [5]. Signifikantní množství betonu, nacházející se v budovách, dává při odstraňování budov za vznik produkci právě betonové suti, která je v objemu stavebního odpadu podstatnou složkou, ze které lze vyrobit recyklované betonové kamenivo. Až 70 % z objemu betonu zaujímá totiž právě kamenivo [6]. Pro vytvoření principů udržitelného stavebního průmyslu je nevyhnutelné nakládat s betonovým recyklátem efektivně, a tudíž využít jeho plný potenciál.

Problematika recyklovatelnosti je ve střední a východní Evropě umocněna rozšířeným podílem budov z prefabrikovaných dílů, vybudovaných v padesátých až devadesátých letech 20. století v mnoha evropských zemích. Panelové budovy se nacházejí v pokročilém stadiu své životnosti, jejich konstrukce zaujímají nemalý objem betonového materiálu a naskýtá se otázka vhodného stanovení způsobu jejich dalšího využití šetrným způsobem.

Stavební produkce se od ostatního průmyslu vyznačuje především decentralizovanou výrobou, to znamená různou polohou zdrojů neboli produkčních center a finálních spotřebišť, tedy stavenišť. V procesu stavebně technologického plánování výstavby představuje proto logistika dopravních řetězců materiálu jednu ze základních a nezbytných činností plánování, kterou lze interpretovat jako množinu komplexních a vzájemně závislých kombinačních problémů od získávání surovin, plánování výrobních zařízení až po pohyb (trasování) dopravních prostředků [7]. V této práci je zpracována rešerše těchto přístupů s cílem vytvořit vhodný algoritmus, který bude schopen efektivně vybrat optimálního dodavatele betonové směsi. Existují tedy vhodné optimalizační metody k vylepšení procesů konstrukčního návrhu [8], procesů [9, 10], nebo optimalizovat výběr dodavatelů materiálu [11], které ovlivní konkrétní výrobu jak z ekonomického, tak z environmentálního hlediska.

V práci byla aplikována diskrétní optimalizace dodávky recyklovaných betonů s možností uceleného pohledu na dosažené výsledky a možností výběru optima uživatelem z portfolia výsledků dle důrazu na ekonomický či environmentální faktor.

Digitalizace stavebnictví (Stavebnictví 4.0) je nezpochybnitelným směrem vývoje stavebního průmyslu, ve kterém představuje technologie informačního managementu budov (BIM) klíčový prostředek. V něm hraje významnou roli digitální model stavb, ve kterém jsou kromě geometrie definovány i negrafické informace o řešeném stavebním objektu. Nabízí se zde využití těchto vhodně strukturovaných informací pro celkovou optimalizaci daného scénáře. Pro nalezení jakéhokoliv optima je nutno nejprve vyvinout optimalizační algoritmus, a především shromáždit pro výpočet korektní a úplná data. BIM model takováto data může obsahovat a

poskytnout pro optimalizační analytické nástroje za účelem významně pomoci racionálně zefektivnit výstavbové procesy, v tomto případě rozhodovací procesy optimálních dodavatelů recyklovaných betonů a umožnit komparaci s dodávkou konvenčních betonů, vyrobených z přírodních zdrojů.

V práci je představen metodický přístup, který propojuje výše uvedené odborné oblasti stavebního sektoru, tedy: I. Kamenivo z betonového recyklátu jako náhrada přírodního kameniva do konstrukčního betonu; II. Problematika využití betonů z prefabrikovaných panelových budov; III. Informační management budov v kontextu využití informací o materiálech a IV. Optimalizační metody pro vytvoření algoritmu a nalezení optimálního řešení. Kompletní rešerše je uvedena v plné verzi práce v kapitole č. 2.

## 1.1. Recyklované betonové kamenivo

V Evropě se každý rok vyprodukuje 2,500 miliardy tun odpadu, z toho je cca 924 milionů tun stavební a demoliční odpad (SDO) [12]. USA produkují zhruba 569 milionů tun SDO [13] a Japonsko zhruba 82 milionů tun SDO [14]. Rostoucí poptávka po kamenivu do betonu představuje tlak na omezené přírodní zdroje. **Kamenivo z betonového recyklátu má potenciál částečně zastoupit přírodní kamenivo**, což snižuje nároky na tyto přírodní zdroje a současně redukuje množství stavebních a demoličních odpadů. Použití recyklovaného kameniva pro směsi nových betonů vyžaduje ověření a zkoušení geometrických, mechanických a fyzikálních vlastností dle EN 12 620+A1. Vlastnosti recyklátu extrahovaného ze stavebního a demoličního odpadu, pocházejícího z prefabrikované panelové výstavby bytových domů, nejsou dostatečně známy. To je dáno především malou znalostí receptur původních betonových směsí, nedostatečnou dokumentací výrobních procesů a nedodržovanými předepsanými výrobními postupy [15]. **Demolice** panelových budov jsou v dnešní době ojedinělé. Množství demolic je kromě jiného dáno také legislativními požadavky, které mohou v pozitivním smyslu ovlivňovat recyklační příležitosti [16]. Dle organizace WRAP<sup>1</sup> by mohl požadavek na doporučené či povinné množství recyklací v legislativě znít přibližně následovně: *"...nejméně 10 % celkové hodnoty použitých materiálů by mělo pocházet z recyklovaného a opětovně použitého obsahu vybraných produktů a materiálů"* [17].

Při návrhu **postupu recyklace** a následné produkce může vznikat mnoho různých scénářů výroby totožného výrobku na základě různých zdrojů, dopravních scénářů, či technologické vyspělosti celého procesu. [18]. Recyklované kamenivo může snadno splňovat předepsané požadavky na kamenivo do konstrukčního betonu, avšak objem využití recyklátu je velmi ovlivněn jeho vlastnostmi. Aby bylo možné dodržet principy efektivní recyklace, tedy zabránění

---

<sup>1</sup> z angl. Waste and Resources Action Programme (WRAP), volně přeloženo jako Akční program pro odpady a zdroje, je nezisková organizace Spojeného království věnující se řízení zdrojů pro maximalizaci hodnoty odpadů a opětovného využití pomocí recyklací.

downcyclingu a co neefektivnější využití daného materiálu, je nutno zpracovávat a upravovat materiál odděleně. **Dekonstrukční metody** demolic se tak stávají technologickými nástroji stavebních dekonstrukčních projektů. Dekonstrukce šetří nejvíce složek pro opětovné použití nebo recyklaci [19]. Významný vliv na opětovné využití materiálu může mít i příprava v rámci tzv. demoličního plánu<sup>2</sup> [20, 21]. V rámci české normativní a legislativní úpravy prozatím není proces demoličních plánů nijak definován.

**Těžba přírodního** šterku a písku poškozuje přirozenou krajinu, protože pro získání horninového materiálu je nutno vytěžit také velké množství půdy. Vytěžení 1 tuny kameniva vyžaduje odtěžení přibližně 0,02 m<sup>2</sup> půdy [22]. Ročně je celosvětově vytěženo asi 40 miliard tun šterku a písku, což odpovídá 68 až 85 % veškerých světově vytěžených hornin.

**Produkce recyklovaného kameniva** je v rámci Evropy podstatně nižší než kameniva přírodního. Dle statistik UEPG<sup>3</sup> tvoří recyklované kamenivo cca 5,26 % a znovu využité kamenivo 0,30 %, společně tedy 5,56 % z veškeré produkce všech 39 Evropských států [23].

Legislativní a **normové požadavky** na vlastnosti recyklovaného kameniva většiny států EU specifikují možný podíl kameniva v betonu a plnou náhradu kameniva recyklátem nepovolují. Synoptický přehled normativních požadavků recyklovaného kameniva (vhodných pro zhotovení betonu) je uveden v příloze práce v Kapitole 13.1. Evropská harmonizovaná norma ČSN EN206+A1 pro České prostředí, doporučuje požadavky na hrubé recyklované kamenivo. Norma rozlišuje dva typy hrubého recyklovaného kameniva. Typ A je kamenivo ze známého zdroje, s maximální náhradou 30 % až 50 %, dle stupně vlivu prostředí. Typ A lze použít pro betony se stupněm vlivu prostředí totožným, jako měl původní beton. Typ B je kamenivo, které lze použít pro betony pevnostní třídy do C30/37. Kvalita recyklátu závisí na typu konstrukcí a na kvalitě matečního betonu (PC). Vliv na kvalitu betonového recyklátu má rovněž proces recyklace, tedy drcení PC a fakt, zda se jedná o jednofázové nebo vícefázové drcení [24].

## 1.2. Problematika panelových budov

Dle Českého statistického úřadu je v České republice 214 760 bytových domů. Z tohoto počtu je 65 641 bytových domů ze stěnových panelů, což je 30,56 %. [25]. Panelové systémy byly v Československu vyvíjeny jako ucelené systémy, tzv. konstrukční soustavy [26]. Vývoj soustav probíhal od roku 1954 až do roku 1989 a realizace soustav a jejich lokálních variant se časově překrývaly. Typizované konstrukční soustavy realizovaných v hromadné výstavbě panelových domů definuje příloha č. 1 nařízení vlády č. 299/2001 Sb. Životnost panelových domů nebyla ve fázi výstavby nijak podrobně řešena. Tato forma bydlení byla plánována jako dočasná

---

<sup>2</sup> Ze zahraniční literatury je známo pod anglickým pojmem deconstruction project.

<sup>3</sup> Z franc. Union Européenne des Producteurs de Granulats (UEPG), anglicky European Aggregates Association, volně přeloženo jako Evropská asociace producentů kameniva.

a prvotní odhady životnosti panelových domů na 40 až 50 let, jsou již nyní překonány. Reziduální životnost panelového domu se odvíjí od konkrétních subjektivních podmínek každého objektu. Jedním z důležitých faktorů jakosti betonových prvků, je materiálová stálost při výrobě. Zabezpečení výroben ze stálých zdrojů surovin se nedařilo a do jedné výrobní prvků dodávalo kamenivo i 10 až 20 různých těžebních podniků. Rovněž cementové materiály byly dodávány pro jednu výrobní během roku ze zemí až dvou světadílů [15].

### 1.3. Informační management budov

BIM lze v současné době považovat za nejrychleji se rozvíjející koncept ve správě staveb. Zaměřuje se na globalizaci stavebního trhu, která odpovídá obecnému trendu globalizace a sleduje také rychle se rozvíjející odvětví informačních technologií [27]. Zároveň je právě BIM jednou ze slibných technologií, kterou lze využít pro efektivnější přenos informací ve stavebním průmyslu.

V České republice je implementace BIM poměrně pomalá, ale přelomovým rokem byl 2017, kdy vláda ČR podpořila koncept zavádění metody BIM do českého stavebnictví usnesením vlády č. 958. Byl zpracován dokument Koncepce zavádění BIM v ČR, který dává směr zavádění a prezentuje klíčová témata této oblasti, včetně doporučených opatření a časového rámce zavádění do roku 2022. České Agentury pro Standardizaci (ČAS) a její Odbor Koncepce BIM je pověřen realizací odborných opatření zavádění metody BIM v ČR. ČAS generuje datové a smluvní standardy a další dokumenty pro implementaci BIM. V roce 2021 byl představen BIM Protokol, který specifikuje vzájemnou digitální spolupráci ve klíčových oblastech: požadavky objednatele na informace, požadavky na společné datové prostředí a nabízí také šablonu plánu realizace BIM [28].

Koncept BIM pracuje kromě geometrie jednotlivých prvků (3D modelu) také s negrafickou částí modelu, využitelnou k informacím o čase (4D) [29], nákladech (5D) [30], udržitelnosti (6D) [31], provozních a výrobních údajích (7D) [32] atd. [33]. Pak se jedná se o tzv. **nD BIM modely** [34], které lze využít jako nosič informací s možností exportu a importu dat různého charakteru, například informací o materiálové základně objektu. Pak je možné hovořit o tzv. **aktivním či pasivním BIM přístupu**. Pasivní BIM přístup bere v úvahu modely, které neobsahují analytickou část. Naopak aktivní BIM přístup zahrnuje modely, které obsahují aktivní prvky, tedy tzv. analytickou část nebo je lze využít a pracovat s nimi pomocí jiného softwaru. Cílem je po výpočtech či složitějších optimalizacích **data zpětně importovat do BIM modelu**, čímž vznikne přidaná hodnota původního BIM modelu. Pro přenos informačních dat z BIM modelu do jiných prostředí, např. pro optimalizační výpočty, byl vyvinut **společný datový formát IFC<sup>4</sup>**, který je otevřeným neplaceným standardem.

---

<sup>4</sup> z angl. Industrial Foundation Classes, IFC. Podrobnější informace obsahuje plná verze práce.



## 1.4. Optimalizační metody ve stavebním managementu

Kvantitativní podpora rozhodovacích procesů v průmyslu je v moderních trendech řízení zvláště zdůrazňována jako zásadní a důležitá. Specifikem řízení stavebních projektů je však jejich stochastické a dynamické prostředí. Optimalizační metody mohou řešit řadu různých technických a inženýrských problémů. Obecně platí, že problém optimalizace může být vyjádřen ve tvaru:

$$\min. f(x) \tag{1}$$

za podmínek:

$$h(x) = 0$$

$$g(x) \leq 0$$

, kde:

$f(x)$  je účelová funkce, minimalizována přes vektor rozhodovacích proměnných  $x$ ,

$h(x) = 0$  představují podmínky rovnosti,

$g(x) \leq 0$  značí nerovnostní podmínky.

Účelová funkce tedy definuje kritéria pro výběr optimálního řešení, zatímco omezující podmínky určují hranice pro prostor všech možných řešení.

Možné přístupy řešení jedno-kriteriálních optimalizačních problémů lze zhruba rozdělit do dvou hlavních skupin, a to na heuristické a matematické metody programování.

**Heuristické techniky** mohou řešit širokou škálu optimalizačních úkolů a jejich hlavní výhody spočívají v tom, že většina z nich konverguje poměrně rychle a zvládne problémy, které obsahují nedefinovatelné funkce. Heuristické algoritmy však často naleznou pouze přibližné optimální řešení na konci procesu vyhledávání. Přesto se heuristické metody ukázaly jako vhodné pro řešení řady optimalizačních problémů ve stavebním inženýrství. Proto jsou matematické programovací metody široce uznávány jako výhodné a exaktní nástroje pro optimalizaci ve stavebnictví. Nejčastěji používané jsou metody jsou uvedeny v plné verzi práce.

**Matematické metody** programování je, že mohou poskytnout přesný optimální výsledek. Obecně platí, že oblast matematického programování zahrnuje lineární programování (LP), nelineární programování (NLP), smíšené celočíselné lineární programování (MILP) a smíšené celočíselné nelineární programování (MINLP).

Existuje celá řada komerčně dostupných programů pro počítačové modelování optimalizačních problémů. Je možné využít optimalizační algebraické modelovací jazyky, tabulkové editory, samostatné specializované optimalizační software, interaktivní počítačové jazyky pro numerické výpočty nebo interaktivní skriptovací počítačové jazyky jako je MATLAB [35], interaktivní prostředí pro strukturování dat, modelování a řešení problémů s optimalizací a také zobrazování výsledků ve formě digitálních výstupů a grafů.

---

## 2. VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

### 2.1. REFLEXE A KONTEXTUALIZACE PROBLEMATIKY

Na základě výše zmíněné motivace v kapitole 1, podložené rešeršní prací, je možné definovat oblast směřování vývoje stavu poznání problematiky a popsat cíle disertační práce. Tematická multidimenzionalita práce v oblastech recyklací materiálů, problematiky panelových budov a informačního modelování budov BIM vede k potřebnosti řešit komplexní a ověřený přístup k recyklacím a využití betonového recyklovaného kameniva s moderním řízením. Předpokladem této práce je, a v literatuře se takové tvrzení již objevují, že budoucí legislativa "de lege ferenda" stanoví nutnost každou demolovanou budovu, včetně panelových budov, alespoň z části recyklovat. Respektive bude nutné v každé nové budově využít jistý podíl recyklovaných materiálů. Recyklace a demolice jsou spojeny rovněž s investiční přípravou každého takového projektu. Na základě světových tendencí je možné predikovat, že pro stavebnictví a plánování investic spojených se stavebně-technologickou přípravou bude informační modelování zásadním nástrojem pro splnění kritérií "Průmyslu 4.0", respektive „Stavebnictví 4.0“.

### 2.2. CÍLE PRÁCE

Z výše uvedených předpokladů vyvstávají následující **cíle disertační práce**:

- **Hlavní cíl: Vytvořit optimalizační metodiku**, reprezentovanou vývojovým diagramem, která je schopna podpořit rozhodovací proces výběru nejvhodnějšího postupu recyklace s odkazem na receptury betonových směsí a využití recyklovaného kameniva na základě zvolených kritérií a okrajových podmínek.

Splnění hlavního cíle podporují následující dílčí cíle práce:

- **Dílčí cíl 1: Vyvinout rozhodovací optimalizační algoritmus** (optimalizační model), který umožní stavební společnosti rozhodnout se, zda má beton vyrobit ve své interní betonárně, a tedy chovat se jako výrobce, nebo koupit již hotovou betonovou směs od externího dodavatele čili chovat se jako kupující. Hlavním kritériem je ekonomické optimum, avšak výsledkové grafy by měly poskytnout rovněž možnost posoudit environmentálně příznivější varianty s důrazem na aplikace recyklovaných betonů.

**Dílčí cíl 2: Definovat vhodné charakteristiky recyklovaného betonu**, pomocí kterých bude možné následně implementovat sadu dat do informační části počítačového modelu budovy za přístupu BIM pro účely dalšího využití těchto informací v celoživotním cyklu budovy.

Dosažení cílů je možné, na základě rešeršní činnosti a teoretické přípravy, provést pomocí následujících bodů řešení:

- shromáždit kolekci vstupních dat z BIM modelu,
- odebrat vzorky matečního betonu ze stávající stavby panelového domu,
- zpracovat odebrané vzorky betonu v recyklačním středisku,

- stanovit vlastnosti recyklátu na základě normových zkoušek kameniva pro ověření vhodnosti použití do nového betonu,
- vytvořit sadu testovacích receptur směsí recyklovaných betonů,
- vyrobit zkušební vzorky s důrazem na nejnepříznivější recepturu betonu,
- provést destruktivní a nedestruktivní normové zkoušky na vzorcích,
- sestavit logisticko-dodavatelský scénář se zaměřením na ekonomické kritérium pro stavbu v případové studii,
- sestavit optimalizační model (algoritmus) v modelovacím prostředí,
- definovat charakteristiky recyklovaných betonů, využitelné v informačním managementu budovy BIM,
- deklarovat užitečnost optimalizačního modelu pomocí vyhodnocení a závěrů z aplikace modelu na případové studii s využitím BIM modelu reálné stavby.

### 2.3. STANOVENÍ VĚDECKÝCH HYPOTÉZ

V práci byly stanoveny vědecké hypotézy, které bude možné potvrdit nebo vyvrátit:

**Hypotéza 1:** Recyklované kamenivo, pocházející z panelové budovy, nelze použít pro konstrukční recyklovaný beton, jelikož je kamenivo většinou nedostatečné kvality.

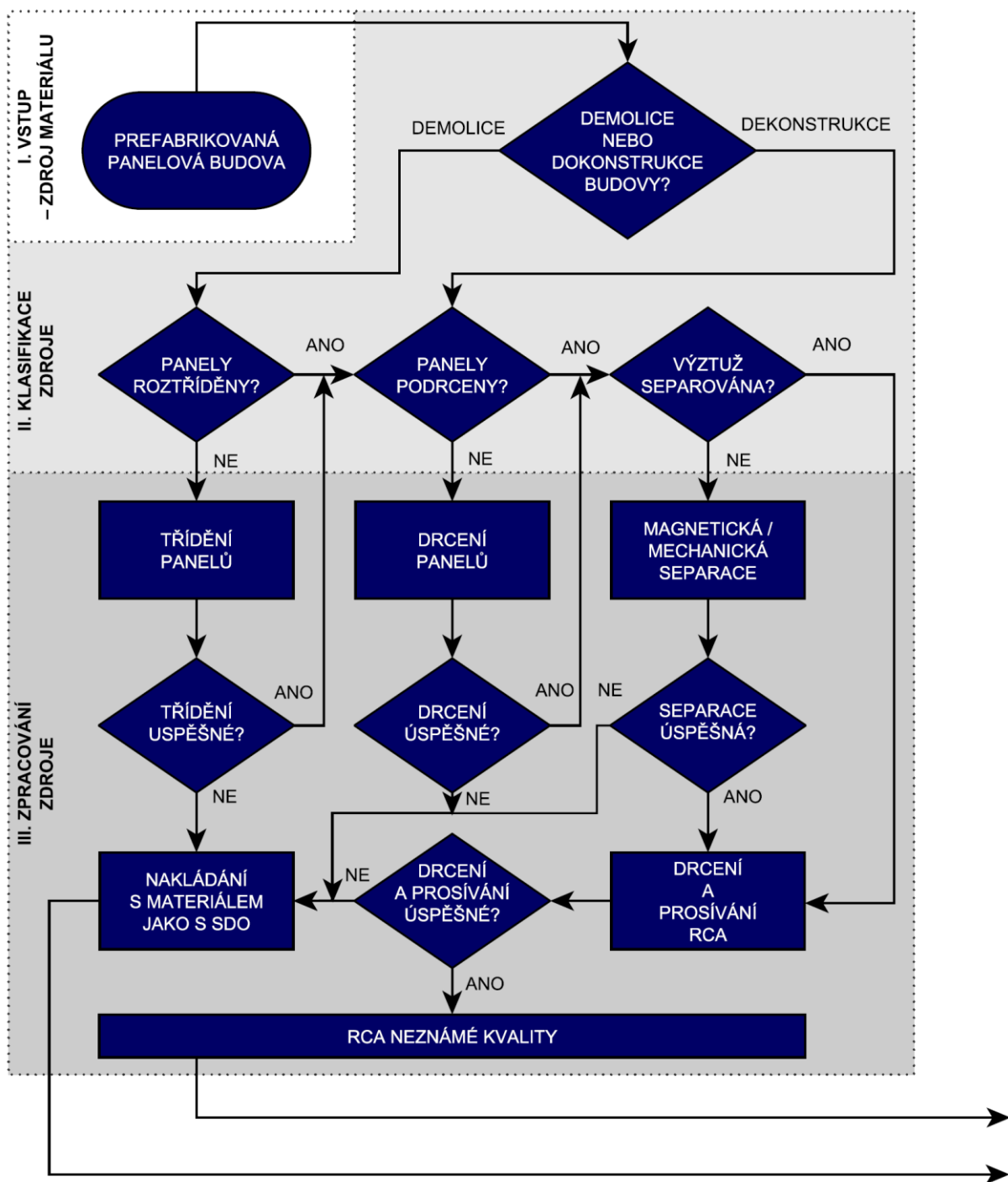
**Hypotéza 2:** Implementace informací o recyklovaném kamenivu v informační části BIM modelu a využití optimalizačních metod zefektivní recyklační proces.

## 3. METODY ZPRACOVÁNÍ

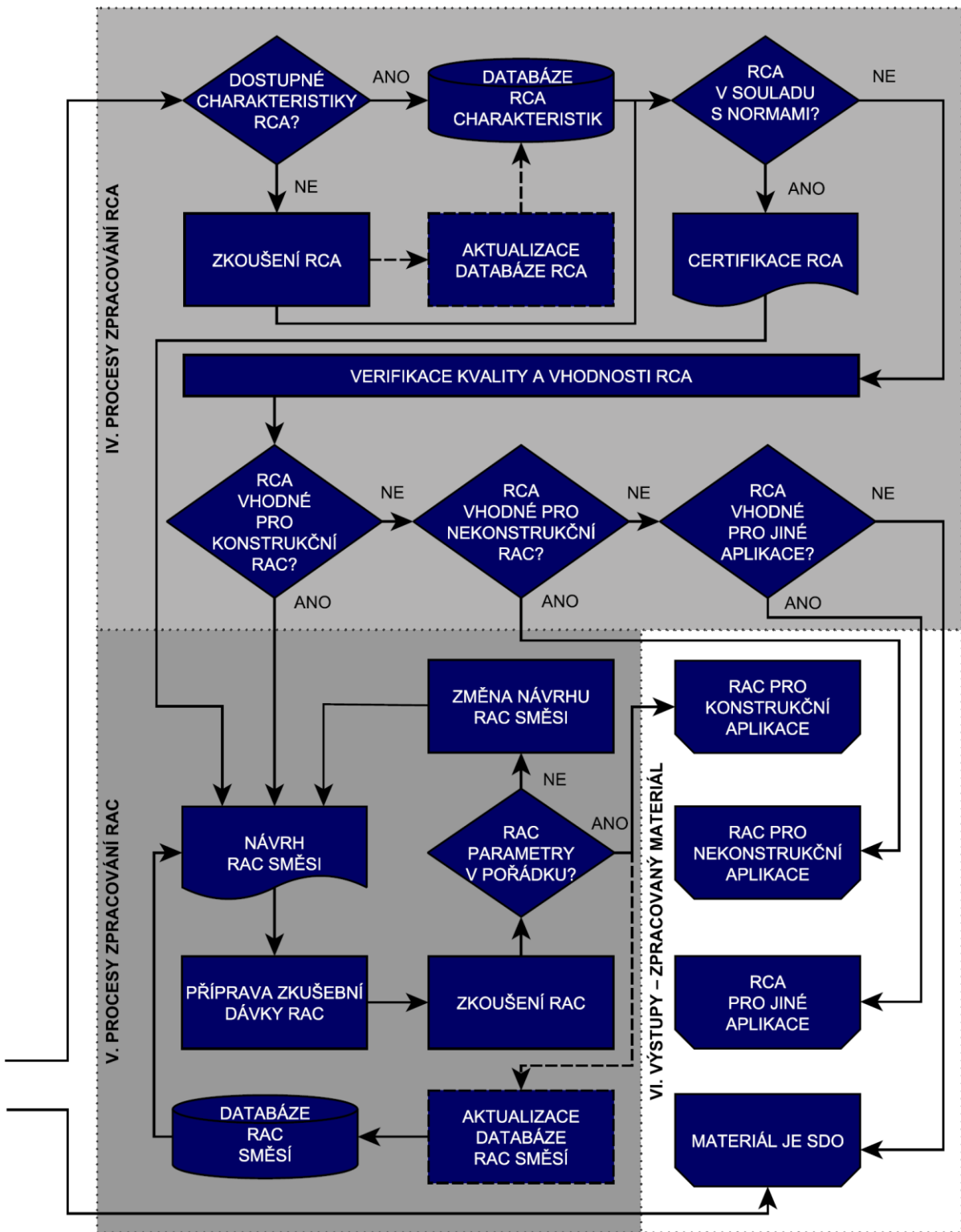
Metody použité v práci jsou popsány v následujících kapitolách v chronologickém členění dle logického postupu práce na tématu. Stěžejní je kapitola metodického rámce, ve kterém je zpracováno téma komplexního uchopení recyklovaného kameniva (RCA) včetně přípravy vzorků kameniva z matečního betonu (PC) s následným přesahem do problematiky recyklovaných betonů s popisem metod pro návrh receptur nových směsí recyklovaných betonů (RAC). Další metodickou kapitolou je rámec optimalizačního výzkumného přístupu, jež obsahově a rozsahem zaujímá významnou část cílů práce. Rovněž je zde uveden rámec pro datovou výměnu v rámci informačního modelu budovy při recyklacích betonů.

### 3.1. METODICKÝ RÁMEC NAKLÁDÁNÍ S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM

V rámci výzkumu byl vyvinut nový metodický rámec, reprezentován vývojovým diagramem, který je rozložen na Obr. 1 a Obr. 2, ze kterých jsou zřejmé fáze metodického rámce.



Obr. 1 Vývojový diagram metodického rámce nakládání s recyklovaným kamenivem - 1. část (vlastní práce)



Obr. 2 Vývojový diagram metodického rámce nakládání s recyklovaným kamenivem - 2. část (vlastní práce)

### **3.1.1. I. fáze – vstup – zdroj materiálu**

První fáze navrženého metodického rámce (vstup) pokrývá zdroj vstupního materiálu, tj. v tomto případě betonovou prefabrikovanou panelovou budovu, která má být odstraněna.

### **3.1.2. II. fáze – klasifikace zdroje**

Druhá fáze zahrnuje soubor rozhodnutí, která je třeba učinit, aby se určil způsob, kterým by měla být budova odstraněna. Toto počáteční rozhodnutí o demolici nebo dekonstrukci budovy ovlivňuje očekávanou kvalitu recyklovaného betonového kameniva (RCA) i odpovídající postup odstraňování budovy, což vyžaduje specifické rozmístění a využití zdrojů a zařízení staveniště, jako jsou stroje, zaměstnanci a finanční prostředky [36]. Dekonstrukce je selektivní a systematický proces demontáže konstrukce. Jeho použití je nezbytné k maximalizaci opětovného využití částí konstrukcí a je považována za alternativu ke konvenčnímu demoličnímu procesu, ve kterém je separaci materiálů kladen obvykle mnohem menší důraz. Ruční třídění směsných materiálů po demolici není tak přesné jako v případech, kdy se používá selektivní demontáž budovy. Avšak konvenční demolice jsou stále využívány ve větší míře než dekonstrukce [37]. Je však třeba mít také na paměti, že není vždy možné dekonstruovat budovy jako celek a že demolice lze kombinovat s postupy dekonstrukce [38]. Po výběru vhodného způsobu odstranění budovy je třeba učinit rozhodnutí, které zajistí náležitou integraci materiálu do recyklačního procesu. V závislosti na zvoleném způsobu odstraňování budovy je možné pokračovat tříděním nebo drcením. Je-li budova konvenčně zbourána bez provedení separace materiálu, je nutné pokračovat tříděním. Pokud je však materiál smíchán a během demolice nedošlo k žádné separaci, je často obtížné dosáhnout uspokojivého vytřídění odpadu [39]. Tato konkrétní část může také vyžadovat rozhodnutí, zda se nasadí metoda separace betonu od ocelové výztuže.

### **3.1.3. III. fáze – zpracování zdroje**

Třetí fáze navrženého metodického rámce zahrnuje řadu nezbytných kroků souvisejících se zpracováním zdroje, tj. třídění panelů, drcení panelů, magnetická / mechanická separace výztuží, drcení a prosévání RCA, dokud není dosaženo standardizovaných frakcí kameniva. Třídění panelů zahrnuje identifikaci jejich specifických typů v budově před tím, než dojde k její dekonstrukci. Měl by být prováděn s ohledem na původní funkci panelů (např. nosné stěnové panely, nenosné stěnové panely, stropní panely, fasádní panely atd.) a zahrnovat jejich rozdělení do samostatných skupin a jejich označení přímo na panelech s podobnými vlastnostmi matečního betonu (tj. Zohledněním zohlednit podobné třídy pevnosti nebo obsah konkrétního materiálu). Každá skupina panelů tak může mít odlišné složení PC, a proto se může kvalita vyráběného RCA lišit. Zde je nutno si uvědomit, že kvalita RCA závisí na vlastnostech PC, jako jsou kvalita původní směsi, její pevnost v tlaku a navržený stupeň vlivu prostředí [40]. Pokud jsou panely během demolice zničeny, smíchány s jinými materiály a nejsou jasně roztříděny

podle typu, výsledný materiál je degradován a stane se běžným demoličním odpadem, což vyžaduje nakládání v souladu s příslušnými předpisy [4].

U velkých panelů je nutné rozpojit je pneumatickým kladivem (nebo jiným vhodným nástrojem) na vhodně velké kusy pro další zpracování [41]. Poté je nutné každou skupinu kusů získaných z různých typů panelů rozdrtit zvlášť, což se nejčastěji provádí pomocí rázových nebo čelistových drtičů. V tomto okamžiku může metoda drcení (jednofázová nebo vícefázová) vysoce ovlivnit vlastnosti RAC související s životností [24]. Poté lze provést separaci ocelové výztuže od betonu, dobře známý proces, při kterém se používá systém detekce kovů a magnetický separátor, případně mechanické třídění [42]. Některé kusy ocelové výztuže však mohou být během předchozího procesu odděleny a zachyceny přímo v drtiči. Následně je RCA neznámé kvality proseto do standardizovaných frakcí pomocí sítové analýzy a tvoří tak výstup z fáze III. zpracování zdroje. V případě mobilních recyklačních linek proces recyklace RCA často končí ve fázi drcení, zatímco ve stacionární recyklační lince se používá více jednotek drcení, prosévání a třídění [43]. Na konci fáze III. zpracování zdroje je sice vytvořeno RCA, ale stále je třeba provést kontrolu kvality.

#### **3.1.4. IV. fáze – procesy zpracování RCA**

Ve čtvrté fázi, věnované procesům při zpracování RCA, vyvstává základní otázka, zda jsou známy charakteristiky RCA. Pokud jsou tyto informace známy a dostupné v databázi charakteristik RCA<sup>5</sup>, pak je lze použít pro další kroky a testování RCA není nutné.

V opačném případě je vyžadováno testování, aby bylo možné vyhodnotit kvalitu RCA a aktualizovat databázi. Testování RCA se skládá ze standardizovaných testů určených k poskytování údajů o fyzikálních a mechanických vlastnostech. Z testů, které se provádí dle norem ČSN EN 933-2, ČSN EN 1097-6, ČSN EN 933-4 a ČSN EN 1097-2, lze identifikovat základní charakteristiky RCA: stanovení zrnitosti – síťový rozbor a množství jemných částic; objemová hmotnost částic a nasákavost; tvarový index; odolnost proti oděru Los Angeles.

Avšak v případě potřeby nebo podezření, že RCA není inertní, může být také nutné a vhodné získat další informace z dodatečných testů, jako je např. chemické složení. Ověření vhodnosti RCA se zabývá posouzením kvality RCA pro účely její certifikace podle místně příslušných legislativních požadavků [5] a norem ČSN EN 12620+A1. Pro návrh směsi betonu z recyklovaného kameniva (RAC) lze obvykle využít certifikované kamenivo RCA s deklarovanými parametry. Pokud však není známa kvalita RCA, což je vysoce pravděpodobná situace

---

<sup>5</sup> Databáze charakteristik RCA, dostupná veřejná či interní databáze uživatele (např. výrobce či dodavatele betonu), která obsahuje zejména mechanické a fyzikální charakteristiky využívaných kameniv.

v případě, kdy materiál pochází z prefabrikovaných betonových panelových budov, pak je potřeba odpovědět na řadu otázek týkajících se vhodnosti RCA pro specifické účely. Aby se ověřila vhodnost RCA pro účely RAC, je nutné RCA otestovat a na základě výsledků je poté klasifikovat podle jedné z následujících kategorií:

- RCA vhodné pro konstrukční RAC,
- RCA vhodné pro nekonstrukční RAC,
- RCA vhodné pro jiné použití.

Na základě uvedené klasifikace je možné přistoupit k další V. fázi (procesy zpracování RAC) nebo, v případě nevhodnosti kameniva přejít k závěrečné fázi výstupů.

### **3.1.5. V. fáze – procesy zpracování RAC**

Předposlední, V. fáze se zabývá procesním zpracováním RAC. Fáze může být zahájena, jakmile je RCA klasifikováno jako vhodné pro konstrukční účely. Je-li k dispozici databáze směsi RAC, může být použita k návrhu směsi RAC. Po vytvoření směsi se připraví první testovací dávka RAC, ze které se zjistí vlastnosti čerstvého betonu a směsi jsou následně odlévány do forem. Testování RAC se provádí podle norem (uvedeny v plné verzi práce) a jsou při nich vyhodnocovány charakteristiky, jako například: konzistence čerstvého betonu zkouškou sednutím kužele; obsah vzduchu; objemová hmotnost čerstvého betonu; pevnost v tlaku; pevnost v ohybu; objemová hmotnost ztvrdlého betonu; nasákavost.

Pokud jsou hodnoty, získané pro testované vlastnosti v souladu s normovými požadavky, může být vydán soubor dokumentů, kterými jsou prohlášení o vlastnostech, bezpečnostní list směsi a technický list směsi. Databáze směsi RAC může být aktualizována pro další využití a může být zahájena širší výroba směsi RAC pro konstrukční využití. Pokud některá z hodnot získaných pro výše uvedené parametry nesplňuje požadavky konstrukčního RAC, je nutné se vrátit, zjistit důvod, změnit návrh směsi a opakovat výrobu a testování dané šarže RAC.

### **3.1.6. VI. fáze – výstupy – zpracovaný materiál**

Závěrečná fáze týkající se výstupů obsahuje čtyři možné typy produktů, které tento metodický rámec může vygenerovat. V souvislosti s kvalitou mohou být výstupy klasifikovány jako nehodnotnější produkt což je konstrukční RAC, následován produkty nižší kvality, jako jsou RCA, použitelné pro nekonstrukční účely, až po nežádoucí, což je stavební a demoliční odpad.

## **3.2. Odběr a příprava zkušebních vzorků**

Před samotným zkoušením RCA je nutné odebrat vzorky z demolovaného objektu. To může být provedeno před samotnou demolicí pomocí částečných demolic nebo odebráním tzv. jádrových vývrtů. Jednotlivá minimální množství zkušebních navážek jsou uvedena pro každou



dílčí zkoušku dále v textu. V uváděném experimentálním případě byly zkušební vzorky konstrukcí) odebrány až po dekonstrukci budovy. Při odebrání vzorků bylo nutné dbát zvýšené pozornosti, z jaké konstrukce vzorek pochází. Pro vhodné využití RCA je nutné stanovit jednotlivé zkušební metody, kterými lze zjistit charakteristiky RCA. Byly zvoleny platné metody pro testování kameniva dle harmonizovaných norem EU.

### 3.2.1. Stanovení zrnitosti kameniva – síťový rozbor

V experimentu je vycházeno z normy ČSN EN 933-1. Bylo zvoleno prosévání vypraného, vysušeného kameniva. Sušení navážky bylo prováděno po dobu 24 hodin při okolní teplotě  $110 \pm 5$  °C. Poté byla navážka přirozeně ochlazována a byla zvážena hmotnost  $M_1$ . Pro zkoušku byla zvolena normová sada sít podle ČSN EN 933-2 se čtvercovými otvory sít: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3,15; 4; 5,6; 8; 11,2 a 16 mm. Hmotnost zkušební navážky byla podle stanovena dle norem pro každou frakci, tj. 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm a 16-32 mm. Procento zachyceného kameniva dílčích frakcí bylo vypočteno podle vztahu dle normy ČSN EN 933-1:

$$a_i = \frac{R_i}{M_1} * 100 [\%] \quad (2)$$

, kde  $M_1$  je celková hmotnost zkušební vzorku a  $R_i$  je hmotnost materiálu zachyceného na každém dílčí sítě  $i$ . Výsledky jsou prezentovány graficky a uvedeny v křivce zrnitosti kameniva v kapitole výsledky.

Celkový zbytek na sítě je pak součet dílčích hmotností na zkoumaném sítě a dílčích hmotností na všech sítích s většími otvory použité sady normových sít a je vyjádřen vztahem:

$$A_i = a_i + a_{i+1} + a_{i+2} + \dots + a_n [\%] \quad (3)$$

, kde

$a_i, a_{i+1},$  až  $a_n$  ... dílčí hmotnosti vzorku, zachycené na všech sítích normované řady sít s většími rozměry otvorů,

$i, i+1$  až  $n$  ... indexy vyjadřující pořadí normované řady sít.

Celkový propad dílčí sítím je pak dopočtem celkové dílčí hmotnosti vzorku do celkové hmotnosti vzorku a je vyjádřen vztahem:

$$Z_i = 100 - A_i [\%] \quad (4)$$

Zrnitost kameniva je dáno křivkou zrnitosti, kterou můžeme vyjádřit pomocí modulů, vyjadřující jemnost kameniva. Rozlišujeme k-modul a D-modul. Vztah mezi moduly:

$$100k + D = 900 \quad (5)$$

k-modul dle Abramse vyjadřuje součet hmotností propadlých zrn kameniva na dílčích sítích rozšířené základní normované řady sít dělený 100 a je dán vztahem:

$$k = \sum \frac{Z_i}{100} \quad (6)$$

, kde

$Z_i$  ... zůstatek na síť o velikosti  $i$  [% hm.]

D-modul dle Rothfuchse vyjadřuje součet hmotností propadlých zrn kameniva na dílčích sítích rozšířené základní normované řady sít a je dán vztahem:

$$D = \sum y_i = (n - k)100 \quad (7)$$

, kde

$n$  ... počet sít vybraných ke stanovení čáry zrnitosti

$y_i$  ... hmotnosti zrn, propadlých dílčími sítí o velikosti  $i$  [%]

### 3.2.2. Stanovení množství jemných částic

Pro stanovení obsahu jemných částic v kamenivu byla použita norma ČSN EN933-1. Po propadu navážky kameniva přes všechna síta včetně síta 0,063 mm byl tento zbytek sušen 24 hodin při  $110 \pm 5$  °C. Procento jemných částic bylo vypočteno podle vztahu z normy:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} 100 [\%] \quad (8)$$

, kde  $M_1$  je suchá hmotnost vzorků kameniva v kilogramech,  $M_2$  je suchá hmotnost zbytku zachyceného na sítu 0,063 mm v kilogramech a  $P$  je hmotnost odděleného materiálu procházejícího sítím 0,063 mm v kilogramech, resp. materiálu propadlého na dno. Výsledky podílu jemných částic  $M_2$  jsou popsány v kapitole výsledky. Výslednou křivku zrnitosti pak vyjadřuje popisná charakteristická hodnota  $F$  dle Hummela, dána vztahem:

$$F = \frac{(f_i m_i)}{100} \quad (9)$$

Logaritmický tvar křivky je dán vztahem:

$$f_i = 100 \times \log (10d_i) \quad (10)$$

, kde

$m_i$  ... hmotnostní podíl zrn frakce o průměrné velikosti zrna  $d_i = \left(\frac{d_1+d_2}{2}\right)$ .

### 3.2.3. Stanovení tvaru zrn – tvarový index

Tvarový index zrn byl testován na zkušební navážce vysušených zrn  $D \leq 2d$ , tzn. na tzv. úzké frakci dle normy ČSN EN 933-4, kde  $D$  je tzv. horní velikost zrna. Tvarový index  $SI$  byl

vypočten dle vztahu z normy ČSN EN 933-4:

$$SI = \frac{M_2}{M_1} 100[\%] \quad (11)$$

, kde  $M_1$  je hmotnost navážky v gramech a  $M_2$  je hmotnost nekubických zrn v gramech.

### 3.2.4. Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti

Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavost RCA pro zrna o velikosti větší 0,063 bylo provedeno v souladu s ČSN EN 1097-6. Objemová hmotnost byla stanovena na navážce kame-niva vysušené v sušárně při  $110 \pm 5$  °C a poté pomocí pyknometrické metody. Zdánlivá obje-mová hmotnost  $\rho_a$ , objemová hmotnost  $\rho_{rd}$  (někdy též  $\rho_{odd}$ ) navážky vysušené v sušárně a obje-mová hmotnost  $\rho_{ssd}$  nasycené navážky a povrchově osušené, byly vypočteny dle vztahů z normy ČSN EN 1097-6:

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad [\text{Mg} / \text{m}^3] \quad (12)$$

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad [\text{Mg} / \text{m}^3] \quad (13)$$

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad [\text{Mg} / \text{m}^3] \quad (14)$$

, kde  $\rho_w$  je objemová hmotnost vody v  $\text{Mg} / \text{m}^3$ .  $M_1$  hmotnost nasycených povrchově osu-šené navážky v gramech.  $M_2$  je hmotnost pyknometru obsahujícího nasycenou navážku pono-řenou do vody, v gramech.  $M_3$  je hmotnost pyknometru, naplněného vodou, v gramech a  $M_4$  je hmotnost vysušené navážky v sušárně, v gramech.

Nasákavost vodou v ustálené hmotnosti po 24 hodinách ponoření  $WA_{24}$ , byla vypočtena podle vztahu z normy ČSN EN 1097-6:

$$WA_{24} = \frac{100 (M_1 - M_4)}{M_4} \quad [\%] \quad (15)$$

, kde  $M_1$  je hmotnost navážky nasycené a povrchově osušené, v gramech a  $M_4$  je hmotnost vysušené navážky v sušárně, v gramech.

### 3.2.5. Stanovení odolnosti proti drcení metodou Los Angeles

Zkouška RCA odolnosti proti drcení byla otestována metodou Los Angeles dle normy ČSN EN 1097-2 na velikosti navážky  $5000 \pm 5$ g. Součinitel Los Angeles  $LA$  byl následně vy-počten dle vztahu:

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad [\%] \quad (16)$$

, kde  $m$  je hmotnost zbytku navážky na síť 1,6mm [g].

### 3.3. METODY NÁVRHU RECEPTUR BETONU

V rámci materiálové části výzkumu byla rovněž blíže uchopena a zkoumána oblast metodiky návrhu betonové směsi RAC, s důrazem na maximální využití materiálového potenciálu RCA. Dvě betonové směsi RAC pod označením RAC-01-40 a RAC-02-40, obě s obsahem 40 % hmotnosti RCA byly studovány a porovnány s referenční směsí ze 100 % hmotnosti přírodního kameniva NA, označenou NAC. Směs RAC-01-40 se skládá z kameniva NA a 40 % hmotnosti je substituováno kamenivem RCA-01. Podobně je směs RAC-02-40 tvořena kamenivem NA a 40 % hmotnosti je substituováno kamenivem RCA-02. Při navrhování složení hmotnostních poměrů kameniva ve směsi RAC byla respektována rovnice absolutních objemů.

Receptura betonové směsi je jedním ze vstupních parametrů následné optimalizace. Poměr jednotlivých složek kameniva je závislý na požadovaných vlastnostech čerstvé betonové směsi, jako je zpracovatelnost při ukládání a hutnění směsi, ale rovněž na návrhových vlastnostech výsledného ztvrdlého betonu. Jedním ze zásadních parametrů se jeví poměr hrubého a jemného kameniva, poměr záměsové vody k množství cementu či poměr kameniva a cementu. Důraz při návrhu směsi byl kladen na charakteristiku návrhové pevnosti betonu v tlaku, jež byla zvolena jako hlavním parametrem pro deklaraci konstrukčního betonu.

#### 3.3.1. Poměry frakcí kameniva dle Fullerovy křivky

Jedním z prvních kroků návrhu betonové směsi je stanovení optimálního poměru hrubého a jemného kameniva a definování optimální čáry zrnitosti kameniva. Mísící poměry frakcí jemného a hrubého kameniva byly stanoveny dle Fullerovy rovnice [44]. Fullerova křivka je dána vztahem:

$$y = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,5} \quad [\%] \quad (17)$$

, kde

- $y$  ... propad sítem o průměru oka  $d$  [%]
- $d$  ... průměr oka dílčího síta [mm]
- $D$  ... maximální velikost oka v normové řadě sít [mm]

#### 3.3.2. Poměr záměsové vody k množství cementu

Poměr účinného množství vody k hmotnosti cementu v čerstvé betonové směsi je dán vodní součinitelem  $w$ . Přípustné maximální hodnoty vodního součinitele stanovuje Tab. F.1.

normy ČSN EN 206-1. Vzhledem k vyšším hodnotám nasákovosti kameniva RCA bylo nutno zvýšit množství záměsové vody o tzv. přidanou vodu pro ovlhčení zrn kameniva RCA.

### 3.3.3. Stanovení dílčích složek betonové směsi

Výpočet množství jednotlivých složek betonové směsi vychází ze základní rovnice absolutních objemů:

$$\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_p}{\rho_p} = 1 - \frac{V_z}{100} \quad [\%] \quad (18)$$

, kde

$m_c$	... množství cementu [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_c$	... objemová hmotnost cementu, ve výpočtech používáno 3110 kg/m <sup>3</sup> ,
$m_v$	... množství vody [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_v$	... objemová hmotnost vody, ve výpočtech používáno 1000 kg/m <sup>3</sup> ,
$m_k$	... množství kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_k$	... objemová hmotnost kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]
$m_p$	... množství příměsi [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	... objemová hmotnost příměsi [kg/m <sup>3</sup> ]
$V_z$	... množství vzduchu v betonu [%]

Pro ověření vhodného složení betonové směsi je vhodné ověřit schopnost efektivně zaplnit dutiny mezi zrna kameniva cementovým tmelem. Tuto vlastnost vyjadřuje výpočtový vztah mezerovitosti kameniva  $M$ :

$$M = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_k} \quad [\%] \quad (19)$$

, kde

$\rho_s$	– sypaná hmotnost kameniva v setřeseném stavu [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_k$	– objemová hmotnost zrn kameniva [kg/m <sup>3</sup> ], Pokud není stanovena laboratorně, pak se použije pro přírodní kamenivo hodnota 2650 kg/m <sup>3</sup> .

### 3.3.4. Stanovení cen směsí recyklovaných betonů

Jednotkovou cenu recyklované betonové směsi je v současnosti obtížné stanovit, jelikož současně dostupní dodavatelé betonů takové produkty nenabízí. Proto bylo nutné v rámci práce stanovit princip výpočtu jednotkové ceny čerstvé směsi recyklovaného betonu interní betonárny. Ten vychází z jednotkové ceny ekvivalentního přírodního betonu dodavatele, nacházejícího se ve stejné lokalitě s obdobnými parametry výrobní linky, odečtením jednotkové ceny substituovaného přírodního kameniva dle následujícího vztahu:

$$C_{RAC} = C_{EQ} - C_{NA,sub} + C_{RCA} \quad [\text{Kč/m}^3] \quad (20)$$

, kde

$C_{RAC}$  – jednotková cena čertsvé směsi recyklovaného betonu [ $\text{Kč/m}^3$ ]

$C_{EQ}$  – jednotková cena ekvivalentní betonové směsi z přírodního kameniva (betonárna stejné lokace a parametrů) [ $\text{Kč/m}^3$ ]

$C_{NA,sub}$  – jednotková cena substitute přírodního kameniva všech frakcí ve směsi [ $\text{Kč/m}^3$ ]

$C_{RCA}$  – jednotková cena recyklovaného kameniva všech frakcí ve směsi [ $\text{Kč/m}^3$ ]

Vzath pro jednotkovou cenu přírodního kameniva všech frakcí ve směsi je pak následující:

$$C_{NA,sub} = \sum_{f=1}^n C_f V_{f,sub} \quad [\text{Kč/m}^3] \quad (21)$$

, kde

$C_{NA,sub}$  – jednotková cena substitute přírodního kameniva všech frakcí ve směsi [ $\text{Kč/m}^3$ ]

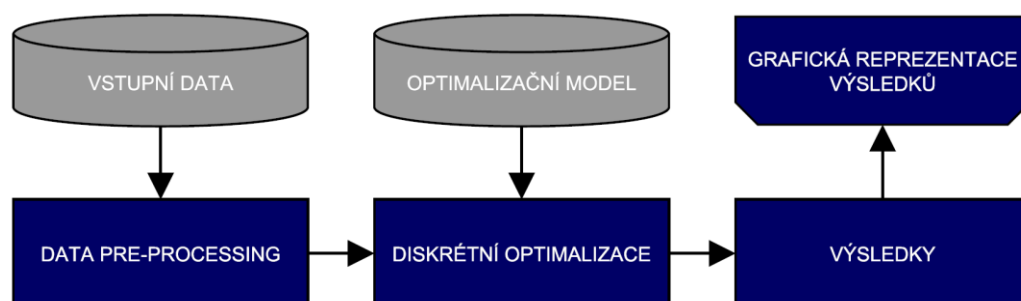
$C_f$  – jednotková cena přírodního kameniva frakce  $f$

$V_{f,sub}$  – objem substitute kameniva frakce  $f$

$f$  – frakce kameniva;  $n$  – počet frakcí

### 3.4. Rámec optimalizačního výzkumného přístupu

Rámec optimalizačního výzkumného přístupu je definován a je rozdělen do třech hlavních kategorií (I) Data pre-processing, (II) Diskrétní optimalizace a (III) Segmentace výsledků a jejich grafická reprezentace. Optimalizační model je definován zdrojovým kódem v příslušném programovém prostředí (MATLAB). Primární funkcí modelu je vybrat z daných možností takového dodavatele betonových směsí, který bude ekonomicky nejvýhodnější. Environmentální aspekt výběru je však ponechán na uživateli – nástroj pouze poskytne škálu možností, ze kterých je následně možné vybrat cenově přijatelnou variantu. Vnitřní strukturu modelu je možné rozčlenit do chronologicky navazujících tzv. funkčních modulů viz Obr. 3, které jsou dále podrobněji popsány.



Obr. 3 Schéma chronologického postupu funkčních modulů optimalizačního modelu (vlastní zpracování)

**(I) Data pre-processing** zahrnuje úpravu získaných vstupních dat, respektive parametrů. Vstupními parametry jsou myšleny především informace o betonárnách a betonech, tedy o výrobních parametrech betonu a následně parametry nasazeného logistického dodavatelského scénáře, přičemž pro porovnání konvenčních a recyklovaných betonů je nutno užít tolik scénářů výpočtu nákladů na dopravu, kolika použitelnými variantami betonů disponují zahrnuté betonárny.

**Geoprostorová vstupní data** byla získána z veřejně dostupných zdrojů. Google Maps Directions API je nástroj pro hledání alternativ tras z bodu A do bodu B, v tomto případě přepravu betonu z betonárny na staveniště. Výstupem požadavku je vzdálenost a doba přepravy ve formátu JavaScript Object Notation (JSON), doporučeným formátem Google. Každá žádost o rozhraní API musí obsahovat jedinečný identifikátor. Pro HTTP požadavky byl použit jazyk Python ve verzi 2.7.10 pro získání dat z Google Maps Directions API pomocí vlastního skriptu. Vrácená data z API pomocí Python skriptu jsou kombinované informace o dopravní trase. Pro každou žádost kombinace výchozího a cílového bodu byly přijaty až dvě nebo tři rozdílné trasy a doba přepravy (sekundy) a silniční vzdálenost (metry) pro každou získanou trasu.

**(II) Diskrétní optimalizace** představuje univerzální nástroj je tvořen diskrétním optimalizačním modelem, který využívá předem upravených dat a následně generuje veškeré potenciálně vhodné varianty. Zohledňuje tedy všechna přípustná řešení inženýrského problému v kritériálně definovaném pořadí. Model je postaven na příkazově definovaném kódu, obsahuje rovněž filtry, sloužící pro třídění výsledů na základě zvolených kritérií, například ekonomické výhodnosti. Pro vývoj zdrojového kódu modelu bylo vybráno prostřední MATLAB [45].

**(III) Segmentace výsledků a jejich grafická reprezentace** obsahuje úpravu výsledků do uživatelsky přívětivé (čitelné) podoby a následně zpracovány generátorem grafů na základě vyfiltrovaných požadovaných informací. Grafy jsou generovány pro každý prvek objektu přímo pomocí skriptů z prostředí MATLAB. Pro výsledky v této práci byl zvolena interpretace grafů kombinovaných s ID betonárny a celkovou cenou interních i externích dodavatelů.

### 3.4.1. Vybrané části modelu v prostředí MATLAB

Následující kapitola obsahuje ohraničené ukázky zdrojového kódu algoritmu v jazyce prostředí MATLAB (ohraničený text) a doprovodný text. Dále jsou v modelu definovány množiny proměnných (pomocí řetězcového pole): pevnostní třídy betonu; stupně vlivu prostředí; názvy interních betonů s uvedením množství substituce RCA.

#### (a) Externí betonárny

Pro zohlednění dopravní pásma pro transport z externích betonáren, navržený model pracuje s 37 pásmy, které zahrnují dopravní vzdálenost staveniště 1 km až 150 km od betonárny.

Obecný vztah pro výpočet ceny dle daného dopravního pásma za autodomíchávač je následující:

$$CD_{rm} = UC_r \frac{V_e}{V_m} \quad (22)$$

, kde

- $CD_{rm}$  ... náklady na dopravu dle dopravního pásma za autodomíchávač [Kč]
- $UC_r$  ... jednotková cena za dopravní pásma  $r$  [Kč]
- $V_e$  ... objem konstrukčního prvku (nebo suma objemu betonu stejného typu) [m<sup>3</sup>]
- $V_m$  ... objem nasazeného autodomíchávače [m<sup>3</sup>]

```
cena_radiusu = raw_cena_externi_dopravy{x, (I+4)};
if (cena_radiusu > 0)
    objem_mixu = raw_cena_externi_dopravy{x, 3};
    pocet_mixu = ceil(objem_prvku/objem_mixu);
    cena_dopravy = cena_radiusu * pocet_mixu;
```

Obecný vztah pro výpočet ceny dle daného dopravního pásma za objem betonu je následující:

$$CD_{rv} = (2UC_r)V_e \quad (23)$$

, kde

- $CD_{rv}$  ... náklady na dopravu dle dopravního pásma dle objemu betonu [Kč]
- $UC_r$  ... jednotková cena dle dopravního pásma  $r$  [Kč]
- $V_e$  ... objem konstrukčního prvku (nebo suma objemu betonu stejného typu) [m<sup>3</sup>]

```
elseif (km_nebo_radius==1)
    [I,J] = find(radius==(vzdalenost_betonary_od_stavby));
    cena_radiusu = raw_cena_externi_dopravy{x, (I+4)};
    if (cena_radiusu > 0)
        cena_dopravy = cena_radiusu * objem_prvku;
```

Obecný vztah pro výpočet ceny za kilometr za autodomíchávač je následující:

$$CD_{km} = UC_d d \quad (24)$$

, kde

- $CD_{km}$  ... náklady na dopravu za dopravní kilometr za autodomíchávač [Kč]
- $UC_d$  ... jednotková cena za kilometr [Kč/km]
- $d$  ... vzdálenost staveniště od dodavatele betonu [km]



```
elseif (km_nebo_radius > 1)
    cena_dopravy = (vzdalenost_betonarny_od_stavby) * km_nebo_radius;
```

Poslední možný typ výpočtu ceny dopravy, tedy cena za kilometr za objem v m<sup>3</sup> betonu nebyla v rešerši ceníků dodavatelů betonu nalezena a v modelu proto není zohledněna.

Celková cena za beton, dodávaný externím dodavatelem, je vyjádřena vztahem:

$$TC = CC V_e CD \begin{cases} CD_{rm} \\ CD_{rv} \\ CD_{km} \end{cases} \quad (25)$$

, kde

$TC$  ... celková cena dodávky betonu [Kč]

$CC$  ... jednotková cena použitelné betonové směsi [Kč]

$V_e$  ... objem konstrukčního prvku (nebo suma objemu betonu stejného typu) [m<sup>3</sup>]

$CD$  ... náklady na dopravu [Kč]

$CD_{rm}$  ... náklady na dopravu dle dopravního pásma za autodomíchávač [Kč]

$CD_{rv}$  ... náklady na dopravu dle dopravního pásma za objemu betonu [Kč]

$CD_{km}$  ... náklady na dopravu za kilometr za autodomíchávač [Kč]

```
if cena_dopravy > 0
    celkova_cena = ((objem_prvku * ceny_pouzitelnych_betonu) + cena_dopravy );
```

## (b) Interní betonárny

Kalkulace ceny pro interní dodavatele betonu je v některých částech modelu definováno analogicky s kalkulací externích dodavatelů betonu.

Celková cena za dodaný beton, dodávaný interní betonárnou je vyjádřena vztahem:

$$TC = (CC V_e) + CD_{km} \quad (26)$$

, kde

$TC$  ... celková cena dodávky betonu [Kč]

$CC$  ... jednotková cena použitelné betonové směsi [Kč]

$V_e$  ... objem konstrukčního prvku (nebo suma objemu betonu stejného typu) [m<sup>3</sup>]

$CD_{km}$  ... náklady na dopravu za kilometr za autodomíchávač [Kč]

```
celkova_cena = ((objem_prvku * ceny_pouzitelnych_betonu) + cena_dopravy );
```

Zdrojový kód obsahuje také části generování grafických výstupů a generování výsledků do podoby \*.xls souboru a další části, které lze nalézt v kompletní verzi kódu v příloze 14.10.

### 3.5. Metody tvorby negrafických dat pro charakteristiky RAC v BIM

**Jedinečnost každého prvku** je v rámci BIM modelu stěžejní pro dosažení bezchybné datové výměny mezi BIM modelovacím prostředím a prostředím optimalizačních výpočtů. Pro přenos dat byl využit otevřený formát IFC ve své v současnosti nejrozšířenější a stabilní verzi 2x3. **Globálně jedinečný identifikátor (GUID)** poskytuje způsob jedinečné identifikace objektu a algoritmy, které generování GUID zajišťují. Rovněž byly vyvinuty pro většinu prostředí rámce pro vývoj softwaru a v těchto rámcích existují metody perzistence.

Datový formát IFC využívá tyto jedinečné identifikátory pro instance objektu, který se řídí standardním UUID univerzálního jedinečného identifikátoru s jeho implementací jako globálně jedinečný identifikátor GUID.

V rámci **exportu IFC** z Autodesk Revit je možné definovat rovněž identifikátory, generované v tomto SW nástroji: **Element ID a Unique ID**. Pro účely demonstrace algoritmu na případové studii bylo využito identifikace pomocí Element ID a to ze dvou důvodů. Prvním důvodem je poměrně malý rozsah modelu a fakt, že nebylo nutno sdílet práci s jinými účastníky. Druhým důvodem je fakt, že obdržený podkladový BIM model vytvořený v aplikaci Autodesk Revit již obsahoval ve svém nativním formátu přehlednou identifikaci Element ID.

## 4. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO PROGRAMU

V rámci experimentálního materiálového výzkumu byly nejprve jednotlivé fragmenty betonových panelů zpracovány podle navrhované metody. Poté byly provedeny laboratorní testy na vzorcích RCA a byly identifikovány vlastnosti tohoto materiálu. Poté byly navrženy nové betonové směsi ze dvou různých skupin panelů se stejnou hmotnostní substitucí RCA a porovnány s referenčními z NA. Nakonec byly studovány vlastnosti vyrobeného čerstvého a ztvrdlého RAC za účelem posouzení vlivu zdrojového RCA na vlastnosti vyrobeného RAC.

### 4.1.1. I. fáze – vstup – zdroj materiálu

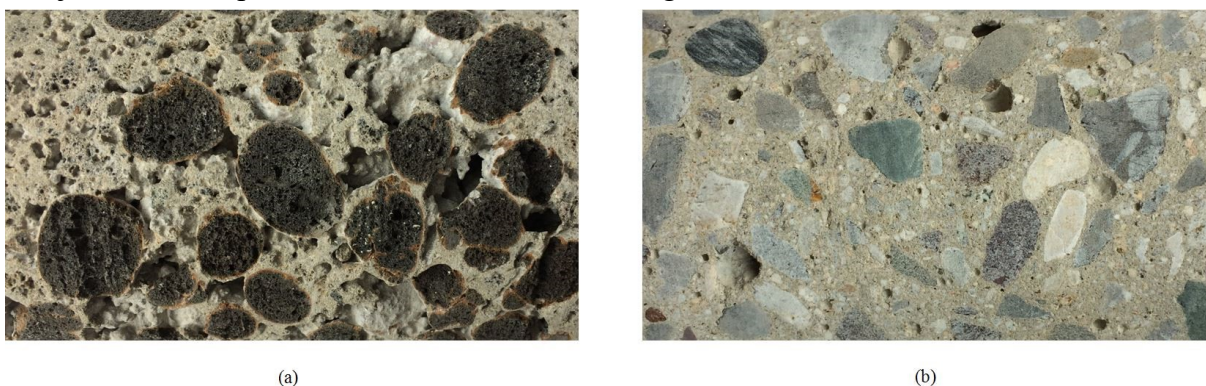
Materiálovým zdrojem RCA, uvažovaným v tomto experimentálním výzkumu, je dekonstruovaná budova hotelu Dukla ve městě Blansko. Budova byla v roce 2015 dekonstruována přístupem sekvenční demolice shora dolů, tzv. metodou top-down a všechny materiály, včetně prefabrikovaných panelů, byly pečlivě tříděny pro docílení vysoké recyklovatelnosti materiálů.

### 4.1.2. II. fáze – klasifikace zdroje

Pro výrobu matečního betonu pro prefabrikované panely hotelu roce 1981 byla v Blansku použita betonárna Prefa Blansko. Bylo obtížné najít původní dokumenty, obsahující hmotné složení PC, protože socialistické podniky, které tuto budovu vytvořily, již neexistují a mnoho dokumentů bylo zničeno nebo ztraceno. V rámci práce byly procházeny a studovány rovněž archivní dokumenty dotčených společností. Návrh betonové směsi byl nicméně identifikován z

podnikového normového dokumentu z roku 1975 s názvem *Podnikové spotřební normy materiálu HSV* [46], které v té době používal státní stavební podnik *Pozemní stavby Brno*.

Panelová budova hotelu byla postavena ze standardizovaných panelů, používaných v **konstrukčním systému T06 - B KD IV** [47], a proto bylo možné dohledat některé z jednotných konstrukčních charakteristik. Fasádní panely byly vyrobeny z lehkého betonu s významným množstvím materiálu *Keramzit*. Přestože je *Keramzit* díky svým tepelně izolačním vlastnostem vhodným materiálem pro fasádní panely, jeho použití jako zdroje RAC je méně výhodné z důvodu vysoké nasákavosti. Průřezy vzorků matečních betonů, odebraných z fasádního průčelního lehkého stěnového panelu a nosného vnitřního stěnového panelu lze vidět na Obr. 4. Ve směsi bylo pravděpodobně použit plastifikátor, protože tato přísada byla doporučena pro výrobu prefabrikovaných komponent ve spotřebě materiálu dle tehdy používaných standardů [46], kde je uvedena doporučená dávka 0,735 litru/100 kg cementu.

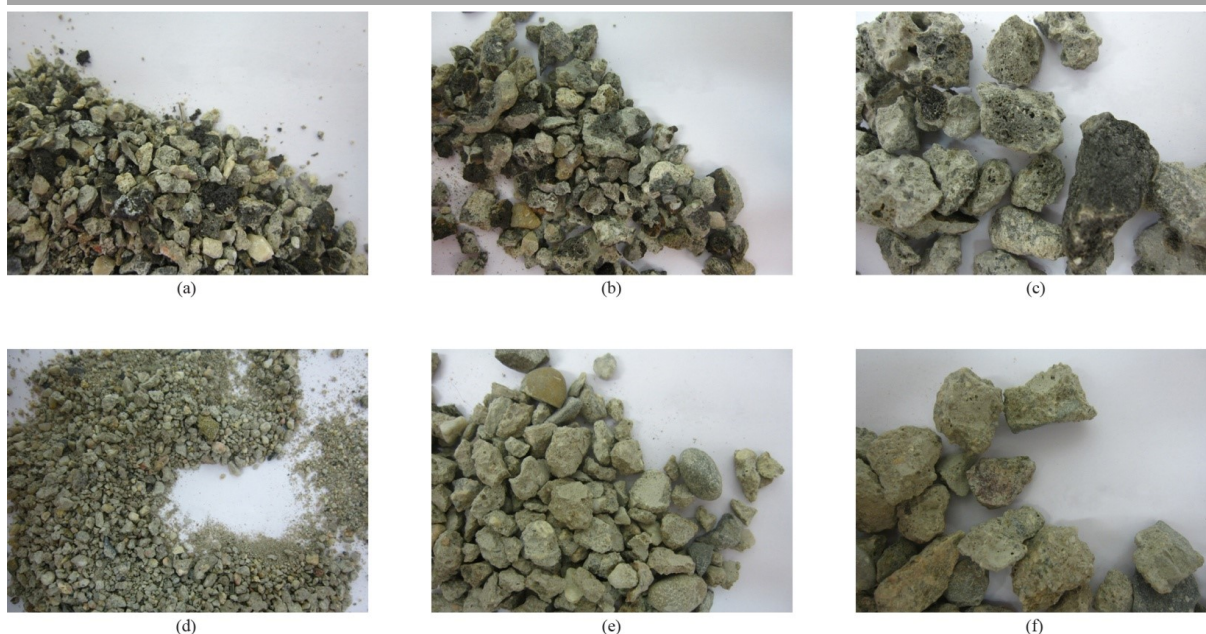


**Obr. 4 Průřezy vzorků matečního betonu:**

**(a) RCA-01 – průčelní lehký stěnový panel fasády; (b) RCA-02 – Nosný panel vnitřní stěny**

### 4.1.3. III. fáze – zpracování zdroje

Dekonstrukce byla provedena podle projektové dokumentace bouracích prací [48], včetně auditu odpadu, při kterém byla provedena inventarizace materiálů a prvků podle evropských pokynů [49]. Přímo na staveništi byly ještě před přepravou do recyklačního střediska panely označeny a rozdrčeny hydraulickým kladivem na menší kusy. Kusy byly označeny pro evidenci materiálového zdroje a následně přepraveny do recyklačního střediska v Brně. Drcení bylo prováděno ve třech fázích. Při první fázi byl použit mobilní čelistový drtič za účelem získání nejhrubší frakce 0-63 mm, poté bylo pomocí druhého a třetího drcení dosaženo frakce 0-16 mm za využití malého čelistového drtiče v laboratoři na Fakultě stavební VUT v Brně. Pomocí elektromechanické laboratorní vibrační prosévačky a normované řady sít byly oba typy RCA rozříděny do tří frakcí: 0-4 mm, 4-8 mm a 8-16 mm. Všechny materiálové zdroje vyhovovaly příslušným evropským normám, především EN 197-1 (2000) pro cement, EN 1008 (2002) pro záměsovou vodu a ČSN EN 12620 pro kamenivo do betonu.



**Obr. 5** Fotografie rozdrcených a prosetých vzorků RCA-01 a RCA-02: (a) RCA-01 0-4 mm; (b) RCA-01 4-8 mm; (c) RCA-01 8-16 mm; (d) RCA-02 0-4 mm; (e) RCA-02 4-8 mm; (f) RCA-02 8-16 mm.

Zdroje materiálů zahrnutých do experimentálního výzkumu byly následující:

- Vzorky recyklovaného betonového kameniva RCA byly získány z výše uvedených rozdrcených prefabrikovaných betonových panelů. Byly použity dva typy RCA:
  - **RCA-01, které pochází z lehkých vnějších fasádních stěnových panelů,**
  - **RCA-02 z nosných vnitřních stěnových panelů a stropních panelů,** které bylo možné zpracovat společně vzhledem k podobnosti.
- Vzorky přírodního kameniva NA byly získány z lomů v obcích Žabčice a Bratčice, tedy výrobci kameniva certifikováni podle normy ČSN EN 12620: 2008.
- Při výrobě RAC byl použit cement CEM II / B-M (S-LL) 32,5 R
- Ke snížení potřeby záměsové vody byla použita plastifikační přísada SikaPaver HC-230 v dávce 0,7 % hmotnosti cementu.

#### **4.1.4. IV. fáze – procesy zpracování RCA**

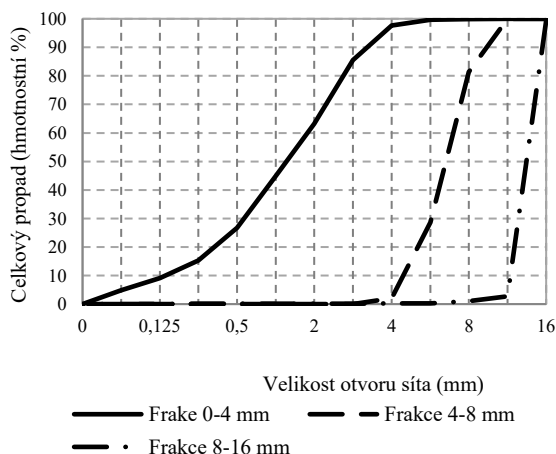
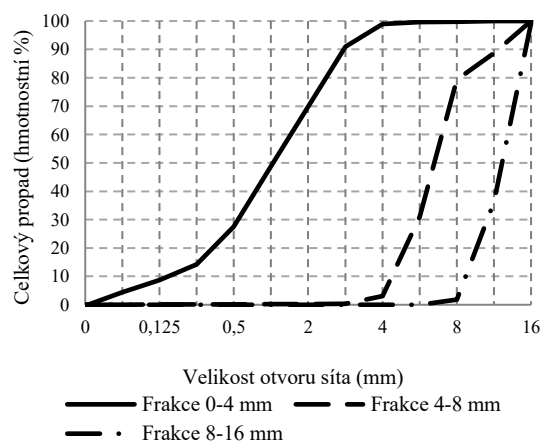
Vzhledem ke stáří budovy, ze které pochází mateční beton, nebyly v žádných materiálových databázích k dispozici žádné charakteristiky RCA, a proto bylo nutné provést testy několika vlastností RCA. RCA-01 i RCA-02 prošly předběžným testováním a některé z počátečních výsledků již byly publikovány [50]. Rovněž byl proveden index tvaru a testy odolnosti proti oděru metodou Los Angeles. Pomocí provedených testů byly identifikovány následující charakteristiky RCA: (a) stanovení zrnitosti – síťový rozbor a množství jemných částic dle ČSN EN 933-2; (b) objemová hmotnost částic a nasákavost dle ČSN EN 1097-6; (c) tvarový index dle ČSN EN 933-4; (d) odolnost proti oděru Los Angeles dle ČSN EN 1097-2.

**Tab. 1 Fyzikální a mechanické vlastnosti RCA a NA, komplexní přehled výsledků (vlastní práce)**

Charakteristiky	RCA-01			RCA-02			NA		
	0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm	0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm	0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
Kategorie kameniva	R <sub>C</sub> 90	R <sub>C</sub> 90	R <sub>C</sub> 90	R <sub>C</sub> 90	R <sub>C</sub> 90	R <sub>C</sub> 90	G <sub>F</sub> 85	G <sub>C</sub> 85/20	G <sub>C</sub> 85/20
Obsah jemných částí (%)	16,08	–	–	9,97	–	–	3,00	–	–
Nasákavost (%)	9,20	7,50	6,00	9,60	6,10	6,00	1,10	1,50	1,50
Tvarový Index (%)	–	14,00	8,00	–	18,00	11,00	–	15,00*	20,00
Los Angeles třída	LA50	LA50	LA50	LA30	LA30	LA30	LA25	LA25	LA25
Objemová hmotnost (kg/m <sup>3</sup> )									
A	2483	2469	2269	2592	2637	2663	–	–	–
SSD	2207	2239	2117	2275	2410	2506	2762	–	–
ODD	2021	2083	1997	2076	2272	2412	2748	2640	2630

Pozn.: A – zdánlivá objemová hmotnost  $\rho_a$ ; ODD – objemová hmotnost navážky vysušené v sušárně  $\rho_{odd}$ ; SSD – objemová hmotnost nasycené navážky a povrchově osušené  $\rho_{ssd}$ ; (\*) hodnoty validní pro frakci 5,6-8 mm.

RCA byl klasifikován podle normy EN 13242:2002+A1:2007 jako RC90 pro RCA-01 i pro typ RCA-02, což znamená, že více než 90 % hmotnosti obou RCA obsahovalo betonové části a maltu. Po vyhodnocení výsledků zkoušek a srovnání s ekvivalentním NA byly oba RCA klasifikovány jako vhodný zdroj pro konstrukční beton. Zrnitost RCA-01 a RCA-02 byly zkoušeny na standardizovaných sítích 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3,15; 4; 5,6; 8; 11,2 a 16 mm. Výsledky jsou prezentovány křivkami zrnitosti na Obr. 6 a Obr. 7.

**Obr. 6 Křivka zrnitosti pro vzorek RCA-01****Obr. 7 Křivka zrnitosti pro vzorek RCA-02**

Výsledky ukazují, že RCA-01 obsahuje více jemných částic než RCA-02 ve frakci 0–4 mm. Dále bylo zjištěno, že hodnoty nasákavosti po 24 hodinách (W-24) se pohybují mezi 6,00 % a 9,20 % pro vzorek RCA-01 a od 6,10 % do 9,60 % pro vzorek RCA-02. Vyšší nasákavost je způsobena obsahem drcené cementové kaše a u RCA-01 obsahem lehčeného drceného plniva *Keramzit*.

Nasákavost RCA-01 je téměř ve všech případech vyšší než nasákavost u RCA-02, což je opět pravděpodobně způsobeno obsahem *Keramzitu*. Tyto uměle produkovaná kameniva mají vysoký povrch a otevřené póry, které mohou snadněji zadržovat vodu ve své struktuře. Tvarový index zrn byl hodnocen na 1 kg zkušební navážky hrubého RCA (frakce 4–8 mm a 8–16 mm) a ve všech případech překročil 20 %. Stanovením odolnosti proti drcení metodou Los Angeles byla zjištěna hodnota 42 (odpovídá třídě LA50) pro RCA-01, respektive 33 (třída LA30) pro RCA-02. Všechny objemové hmotnosti byly zkoušeny pyknometrickou metodou podle normy EN 12350-6 (2009) pro frakci od 0,063-4 mm a také pro frakci od 4-16 mm pro obě zkušební navážky.

#### 4.1.5. V. fáze – procesy zpracování RAC

V rámci této fáze bylo nejprve nutno připravit návrh nových betonových směsí RAC. Byly studovány dvě směsi RAC, označeny RAC-01-40 a RAC-02-40, s obsahem RCA v množství 40 hmotnostních % a porovnány s referenčním vzorkem NAC. Směs RAC-01-40 sestává z NA a 40 % hmotnostní substituce RCA-01. Analogicky je směs RAC-02-40 tvořena NA a 40 % hmotnostní substituce RCA-02. Při návrhu složení kameniva během návrhu směsi RAC byla respektována rovnice absolutních objemů. Mísicí poměry specifických frakcí kameniva byly stanoveny Fullerovými rovnicemi [44], a proto byla betonová směs bez ohledu na obsah RCA nebo NA navržena s 29,289 % hrubého kameniva, 20,711 % středně hrubého a 50 % jemného kameniva.

Obě betonové směsi byly navrženy pro RAC s návrhovou třídou pevnosti na válci/krychli 25/30 MPa, která je vhodná pro stupeň vlivu prostředí XC2 dle EN 206:2013+A1:2016 a návrhovou třídou konzistence Abrams S3, což odpovídá propadu mezi 100 mm a 150 mm. U šarže čerstvého betonu byla hodnota propadu měřena na 110 mm pro RAC-01-40 a 120 mm pro RAC-02-40. Poměr  $w/c$  byl 0,6 a minimální množství cementu bylo užito  $280 \text{ kg/m}^3$ , tedy striktně dle normy EN 206:2013+A1:2016 pro stupeň vlivu prostředí XC 2, tzn. při návrhu směsi byly použity stejné hodnoty. Návrh betonové směsi s RCA a NA je uveden v Tab. 2. Komplexní portfolio návrhu receptur je uvedeno v přílohové části práce v kapitole 14.1. a 14.2.

Tab. 2 Návrh betonové směsi s kamenivem RCA a NA (vlastní práce)

Receptura betonu	$w/c$ *	Proporce receptury ( $\text{kg/m}^3$ )									Objemová hmotnost ( $\text{kg/m}^3$ ) **						
		Cement			Voda			Přísady				RCA			NA		
		$m_c$	$m_{w,free}$	$m_{v,add}$	$m_p$	0–4 mm	4–8 mm	8–16 mm	0–4 mm	4–8 mm		8–16 mm					
RAC-01-40	0.6	280,00	166,04	58,85	1,96	361,92	149,91	212,01	542,88	224,87	318,01	2257,60					
RAC-02-40	0.6	280,00	166,04	55,00	1,96	377,84	156,51	221,34	566,77	234,76	332,00	2335,26					
NAC	0.6	280,00	166,04	0,00	1,96	0,00	0,00	0,00	951,55	394,15	557,41	2349,14					

Pozn.: (\*)  $w/c$  poměr vztažen k volné vodě; (\*\*) objemová hmotnost čerstvé betonové směsi

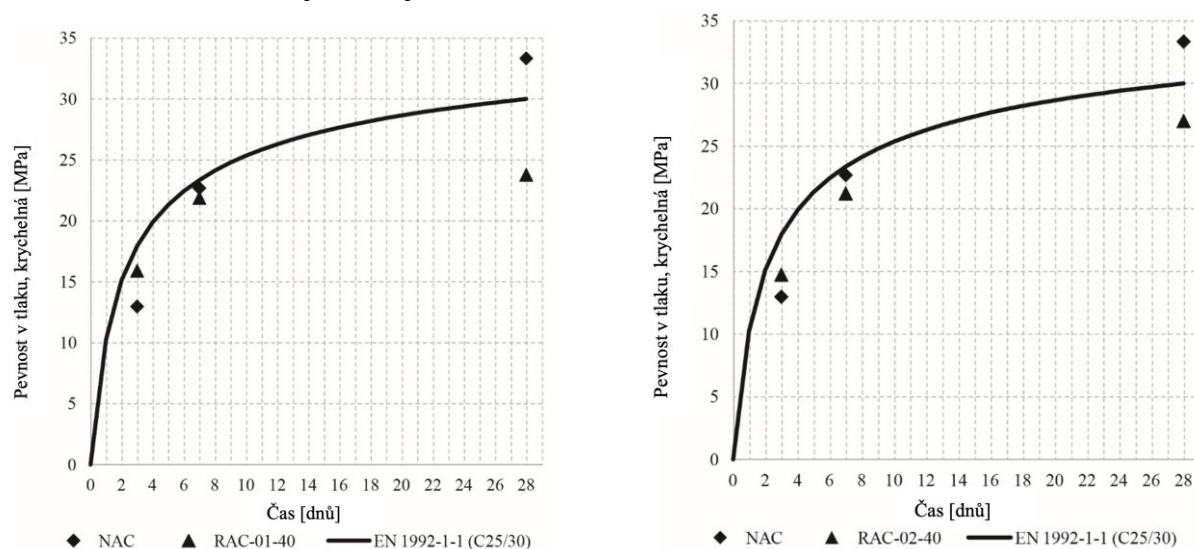
Zkušební krychle a hranolky byly připraveny pro každou záměs na základě návrhu směsi, který byl vyvinut v souladu s normou EN 12390-2 (2009), a prošly zkouškami, ze kterých byly definovány vlastnosti betonů. Při zkoušce konzistence byl propad čerstvých betonových směsí 110 mm pro RAC-01-40 a 120 mm pro RAC-02-40, přičemž obě hodnoty odpovídají kategorii S3 podle EN 12350-2 (2009). Cílová hodnota obsahu vzduchu byla u všech směsí 3 % v návaznosti na normu EN 12350-7 (2009), avšak bylo zjištěno, že reálný obsah vzduchu dle zkoušek provedenými na čerstvých směsích je 15 % pro RAC-01-40, a hodnota 8 % pro RAC-02-40. Zkoušky pro zjištění objemové hmotnosti čerstvé betonové směsi byly provedeny v souladu s požadavky normy EN 12350-6. Bylo zjištěno, že objemová hmotnost čerstvé směsi byla 2276,16 kg/m<sup>3</sup> pro směs RAC-01-40 a 2199,33 kg/m<sup>3</sup> pro RAC-02-40.

Pevnost v tlaku na krychlích byla stanovena pomocí zkoušek provedených podle EN 12390-3. Nárůst krychelné pevnosti v tlaku v čase byl porovnán s konvenčním grafem nárůstu pevnosti založeným na doporučených hodnotách dle EN 1992-1-1. viz Tab. 3.

**Tab. 3 Pevnost v tlaku pro směsi RAC-01-40 a RAC-02-40 (vlastní práce)**

Čas / Vzorek č.	Pevnost v tlaku, krychelná (MPa)										
	NAC	RAC-01-40					RAC-02-40				
		#1	#2	#3	Průměr	Směrodat. odchylka	#1	#2	#3	Průměr	Směrodat. odchylka
3-dny	12,980	15,160	14,969	17,596	15,906	1,1964	14,403	14,639	15,159	14,734	0,3159
7-dní	22,680	21,630	21,839	22,176	21,882	0,2250	21,550	21,293	20,806	21,216	0,3083
28-dní	33,340	22,940	23,646	24,769	27,785	0,7533	27,466	26,744	26,802	27,004	0,3276

Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku ze zkoušek provedených po 3, 7 a 28 dnech u směsí RAC-01-40 a RAC-02-40 ve srovnání s konvenční referenční směsí NAC a očekávané hodnoty uvedené v EN 1992-1-1 jsou zřejmé z Obr. 8.



**Obr. 8 Pevnost v tlaku na krychlích směsí RAC-01-40 (vevo) a RAC-02-40 (vpravo).**

Pevnost v tahu za ohybu pro směs RAC-01-40 a RAC-02-40 byla testována na hranolcích po 28 dnech od betonáže.

Zjištěné průměrné hodnoty objemové hmotnosti jsou 2272 kg/m<sup>3</sup> pro směs RAC-01-40 a 2324 kg/m<sup>3</sup> pro směs RAC-02-40. Nasákavost ztvrdlého betonu byla měřena po 3 a 7 dnech a byly získány průměrné hodnoty 7,5 % pro směs RAC-01-40 a 7,4 % pro směs RAC-02-40

## 4.2. Export dat z BIM a import do prostředí optimalizačních výpočtů

Pro dosažení automatizované a standardizované kvalitní výměny dat bez ztráty informací mezi BIM modelovacím a optimalizačním prostředím je vhodné využít importní a exportní formáty a dosáhnout tak co nejvyššího stupně eliminace chyb oproti manuálním přenosům dat. V rámci metod využitých v níže uvedené případové studii byl pro modelování BIM modelu užít Autodesk Revit [51]. Pro optimalizační model pak prostředí MATLAB [45]. Vzhledem k tabulkové (maticové) struktuře negrafických dat, určených k optimalizaci bylo využito meziprostředí tabulkového editoru. Pro export výkazů betonových prvků z Revit byla využita nativní exportní funkce tohoto SW do formátu \*.xlsx. Kompletní exportní data z BIM jsou uvedena v elektronické příloze 14.3.

Zpětná implementace dat do modelu BIM se jeví jako vhodný prostředek pro uchování a plné využití takto optimalizovaných dat. Dojde tak k plnému naplnění smyslu **aktivního BIM přístupu**, který byl definován výše. Základní seznam nově navržených obohacených parametrů, které mohou být aplikovány na většinu betonových konstrukcí, resp. prvky modelu, jsou shrnuty v následující Tab. 4.

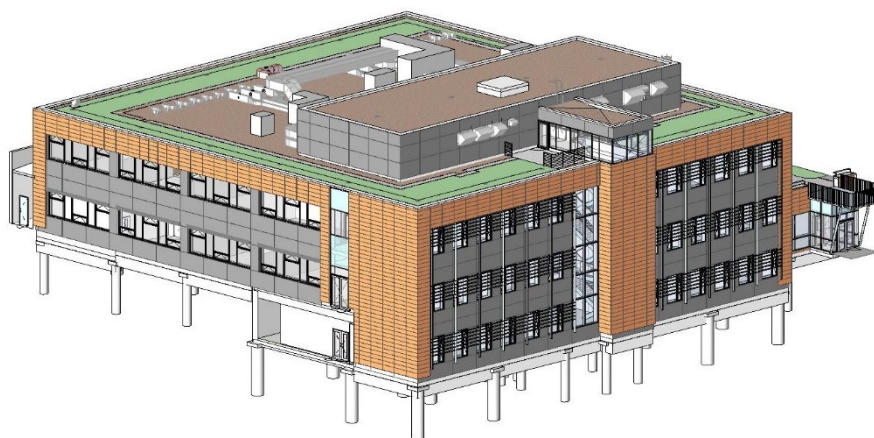
Tab. 4 Rozšíření parametrů pro charakterizaci RAC prvků v BIM modelu pro datový formát IFC

Parametr	Datový typ	Jednotka	IFC název	Sdílené parametry pro Revit
Globálně jedinečný identifikátor	number	-	IfcGUID	GUID
ID prvku	number	-	ElementID	ID PRVKU
Stupeň vlivu prostředí	string	TEXT	ExposureClass	STUPEŇ Vlivu PROSTŘEDÍ
ID dodavatele betonu	number	-	ConcreteSupplierID	ID DODAVATELE BETONU
Název dodavatele betonu	string	TEXT	ConcreteSupplierName	NÁZEV DODAVATELE BETONU
Hmotnost RCA	number	kg	RCAWeight	HMOTNOST RCA
Množství náhrady kameniva recyklátem	number	%	RCASubstitution	MNOŽSTVÍ NÁHRADY KAMENIVA RECYKLÁTEM
Kvalita kameniva	string	TEXT	AggregateQuality	KVALITA KAMENIVA
Cena betonu	number	Kč/m <sup>3</sup>	ConcreteTotalCost	CENA BETONU



### 4.3. Případová studie a výsledky optimalizace

Smyslem implementace algoritmu na konkrétní případovou studii je prokázání jeho vhodnosti a přínosu pro optimalizaci investičního výstavbového projektu. Jako testovací objekt pro případovou studii byla zvolena stavba výzkumného centra CEITEC. **Případová studie byla aplikována pouze na budovu objektu A**, která obsahuje komplexní portfolio železobetonových konstrukcí, vhodné pro případovou studii [52].



Obr. 9 Případová studie – Výzkumné centrum CEITEC, BIM model v prostředí Autodesk Revit, objekt A

Projektová dokumentace byla vypracována za využití metody informačního modelování budov BIM v prostředí Autodesk Revit verze 2012 viz výřez z modelu na Obr. 9. Byly získány podklady v nativním formátu \*.rvt, které byly pro účely dalšího zpracování převedeny do verze Autodesk Revit 2021 a exportovány do formátu \*.ifc verze 2x3. Vlastníkem tendrové projektové dokumentace je VUT v Brně jakožto stavebník a investor stavby.

#### 4.3.1. Logistický model

Logistický model představuje dopravní scénář s možností alternativních dopravních tras transportbetonu v závislosti na zvolených kritériích. Logistický model doplňuje ekonomická část, která klade důraz na minimální náklady na pořízení a dopravu transportbetonu. Pro případovou studii byly zvoleny následující pravidla a omezení, inspirovaná reálným prostředím dodavatelského systému transportbetonu, z nichž některé jsou:

- Pro výpočet budou vybrány pouze takoví dodavatelé betonu, kteří splňují kritérium dojezdového času do 1,5 hodiny.
- Pokud dodavatel nedisponuje požadovaným typem betonu, bude vyhodnocena varianta betonu vyšší kvality (vyšší pevnostní třída / vyšší stupeň vlivu prostředí apod.).
- Model pracuje s ceníky dodavatelů betonu, které nezohledňují individuální slevy.

- Aktuální dopravní situace je zohledněna vygenerovanými daty pomocí samostatného skriptu v jazyce Python, který vrací aktuální data z Google Maps.
- Objem bubnu autodomíchávače je uveden dle ceníkových informací a sice nejbližší varianta k objemu 8m<sup>3</sup>. Pokud taková informace v ceníku chybí, je zvolen defaultní objem 8 m<sup>3</sup>.

V rámci případové studie je testován **logistický scénář s 79 externími betonárnami a s 11 interními betonárnami**. Externí betonárny disponují výrobou betonu výhradně z přírodních zdrojů. Interní betonárny jsou takové, které mají schopnost vyrobit určité množství a druh recyklovaného betonu.

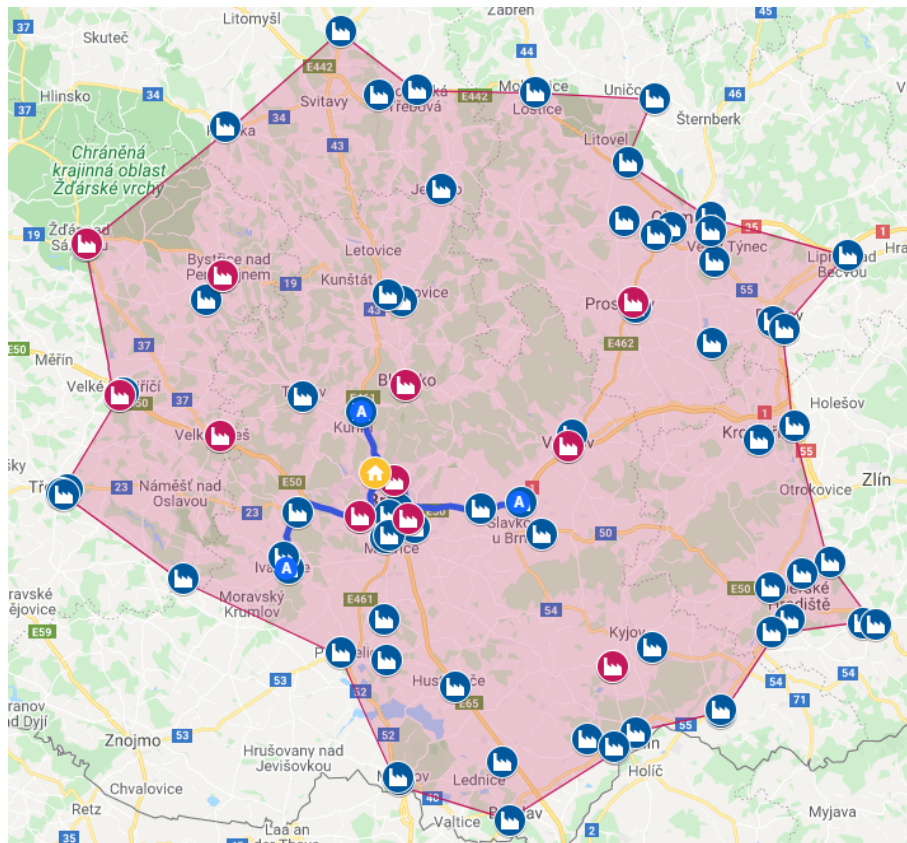
### 4.3.2. Okrajové podmínky a limity

- Kritérium dojezdového času do 1,5 hodiny by mělo zohledňovat i nakládku a vykládku betonové směsi s ohledem na konzistenci (způsob dopravy a ukládání směsi do bednění)
- Ceny betonových směsí a jejich dopravy je v současnosti komplikované obstarat jako ucelený soubor dat pro určitý region a je závislý na manuální práci s možností vzniku chyb. Databáze s aktuálními cenami pro ČR prozatím neexistuje.
- Individuální slevy cen transportbetonu představený model nezohledňuje, ale tento parametr může být zadán jako samostatný parametr při budoucím vývoji algoritmu. Tato alternativa již je ve vývoji. Ačkoliv není součástí disertační práce, lze ji nalézt v SW nástroji Concrete Delivery 1.0, dostupném online [53].
- Aktuální dopravní situace je závislá na zdroji těchto informací.
- Tržní cena recyklovaného kameniva se může v průběhu času měnit. V odborných kruzích v oblasti recyklací (např. v rámci výroční konference Reycling, společnosti ARSM), je diskutováno s variantou, že v budoucnu může být cena za recyklát rovna nebo vyšší tržní ceně kameniva přírodního za předpokladu, že dojde ke zvýšené poptávce tohoto zdroje.
- Případová studie adresuje variantu s kamenivem RCA-02, tedy receptury betonů RAC-02-05 až RAC-02-40 s obsahem recyklovaného podílu kameniva od 5 % do 40 % hmotnosti kameniva (se skokem po 5 %).

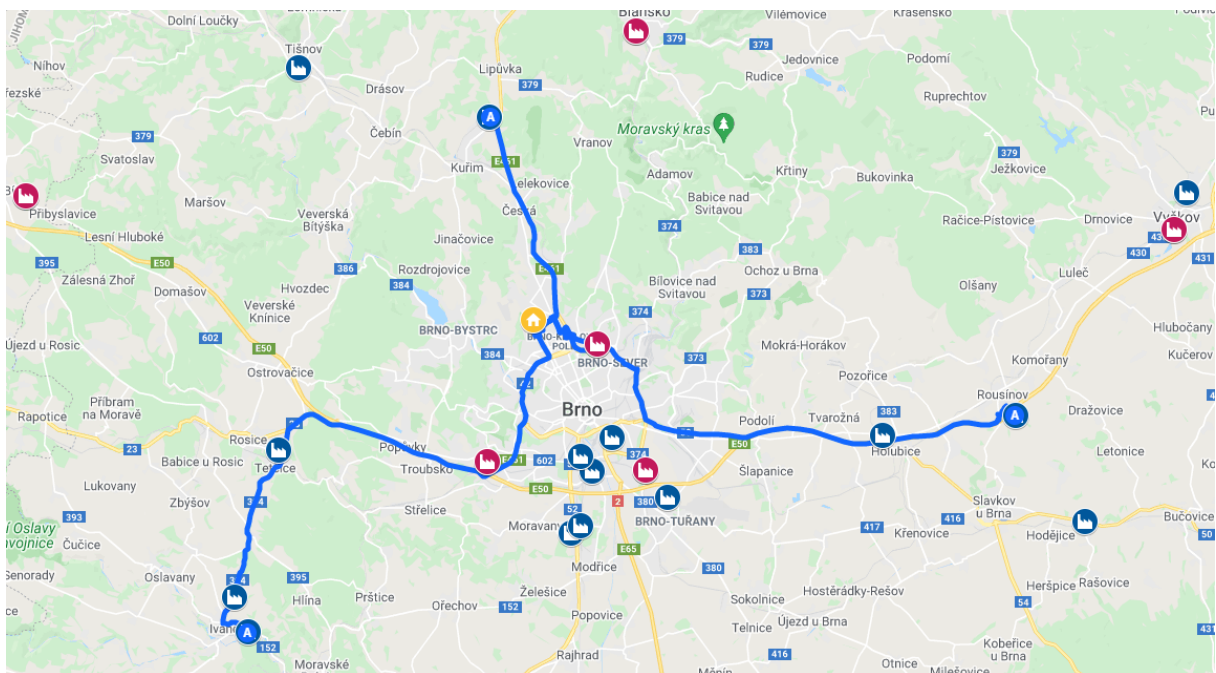
### 4.3.3. Výsledky optimalizace dodavatelů transportbetonu

Optimální dodavatelé jednotlivých druhů betonů pro každý konkrétní konstrukční prvek budovy A byli stanoveni na základě exaktního výpočetního algoritmu pomocí optimalizačního modelu v prostředí MATLAB, pospaného v kapitole 3.4.1.

Vstupní soubory, vzhledem k rozsahu, jsou v přílohové části práce. Jedná se o soubory \*.xls, reprezentované následujícími kapitolami a zkrácenými tabulkami (plné verze tabulek jsou uvedeny v přílohové části práce). Vstupní data jsou zveřejněna v plné verzi práce.



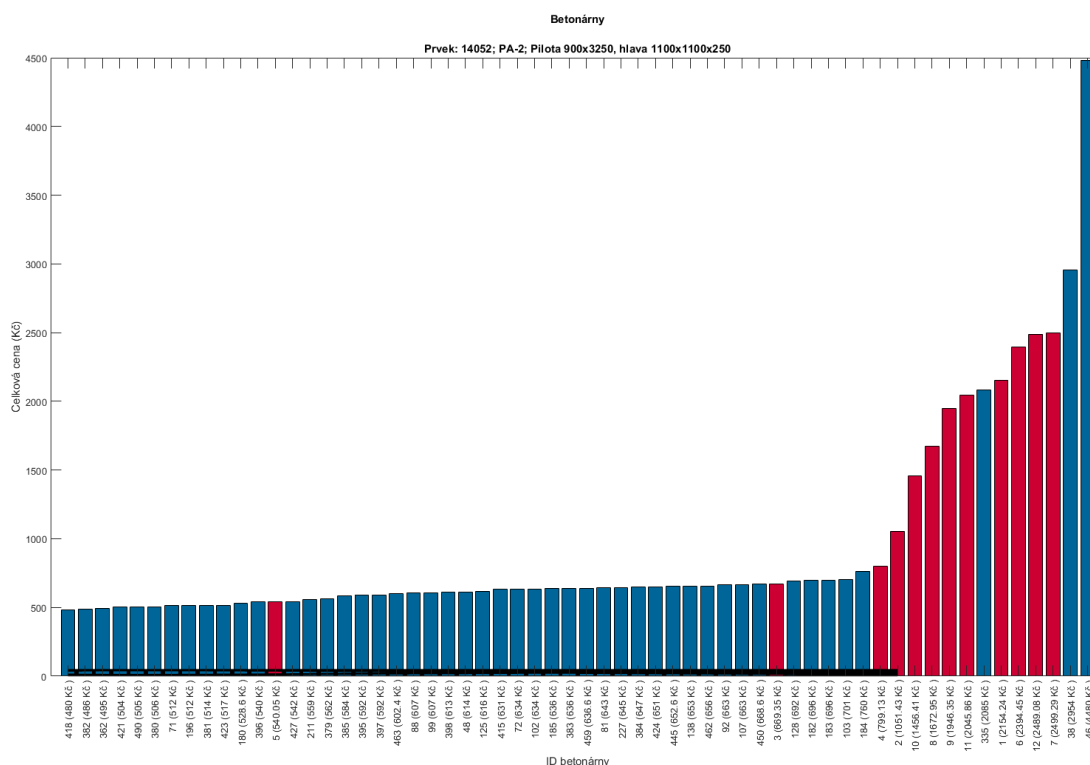
**Obr. 10** Mapa optimálního řešení s pozicemi interních (červených) a externích (modrých) betonáren ve vztahu k umístění objektu řešené stavby (žlutě) a dopravních tras.



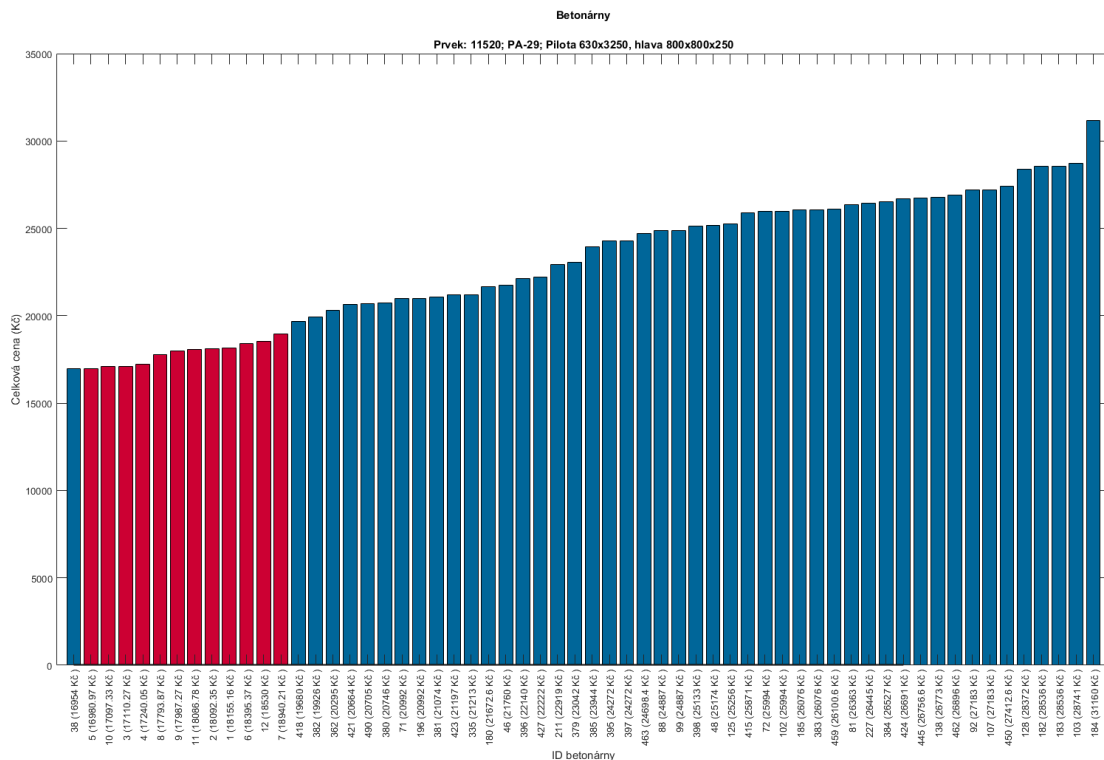
**Obr. 11** Mapa s dopravními trasami optimálního řešení s pozicemi interních (červených) a externích (modrých) betonáren ve vztahu k umístění objektu řešené stavby (žlutě) a dopravních tras.

Výsledky optimalizace se sestávají z několika automatizovaně generovaných výstupů, které jsou pospány v plné verzi práce. Vizualizace optimálního řešení je zřejmé z mapy na Obr. 10 a konkrétní dopravní trasy optimálních dodavatelů pak v mapě na Obr. 11. Podrobné výsledkové grafy jsou uvedeny v elektronické části příloh práce v kapitole 14.9.

**Testovací ověřovací model s objemy prvků po krocích** je ověřovací model, který obsahuje prvky po objemovém kroku  $0,2 \text{ m}^3$ . Počet prvků byl zachován totožný s počtem prvků případové studie, tedy 394 ks. Počet modelovaných betonáren byl zachován na počtu 11 interních a 79 externích a pozice staveniště byla rovněž zachována. Ověřovací model tímto postihuje objemy od  $0,2 \text{ m}^3$  do  $78,8 \text{ m}^3$ . Veškeré prvky byly uvažovány s betonem C25/30 XC2. Výsledkový graf pro počáteční objem prvku  $0,2 \text{ m}^3$  vykazuje z počátku benefit pro externí dodavatele, konkrétně pro betonárnu č. 418 viz Obr. 12, následovanou lineárně vzrůstající cenou s dodavateli interními. Jasný zlom v linearitě je mezi externími a interními dodavateli. Až od prvku č. 12 o objemu  $2,4 \text{ m}^3$  se interní betonárny začínají umisťovat v první polovině optimálních dodavatelů. Tento jev je ukončen u prvku č. 56 o objemu  $6,2 \text{ m}^3$ . Od prvku č. 37 o objemu  $7,4 \text{ m}^3$  se ve výsledkovém grafu objevuje posun umístění externí betonárny č. 38 směrem k první pozici. Tento jev je ustálen u prvku č. 41 o objemu  $8,2 \text{ m}^3$  viz Obr. 13. Následující výsledkové grafy prvků reflektují cenovou úroveň dle použitého objemu prvku a lineárně vzrůstají. Podrobné výsledkové grafy jsou uvedeny v elektronické části příloh práce v kapitole 14.9.



Obr. 12 Výsledkový graf – prvek č. 1 o objemu  $0,2 \text{ m}^3$  – optimální interní a externí dodavatelé betonu



Obr. 13 Výsledkový graf – prvek č. 41 o objemu 8,2 m<sup>3</sup> – optimální interní a externí dodavatelé betonu

## 5. DISKUZE A SOUHRNNÝ ZÁVĚR

Cílem práce bylo rozšířit stávající stav poznání a mezery v literatuře problematiky využití recyklovaného kameniva z demolovaných objektů, v tomto případě z prefabrikovaných panelových budov a definovat charakteristiky pro přenos informací o materiálech v průběhu výstavbového procesu za plného využití informačního managementu budov BIM a optimalizačních technik. Z provedeného výzkumu lze vyvodit následující závěry:

- Efektivní využití RCA z prefabrikovaných panelových budov s pečlivě naplánovaným a provedeným oddělením materiálu při dekonstrukci **může přispět k rapidnímu snížení SDO** a také k **úspoře prostoru na skládkách odpadů**, který stále ubývá.
- Prezentovaný přístup poskytuje: (i) **požitelné informace** pro efektivní a ekologicky vhodnou dekonstrukci výškových prefabrikovaných panelových budov; a (ii) **pokyny pro manipulaci** s betonovými panely, získání vhodných recyklovaných kameniv a výrobu konstrukčního recyklovaného betonu.
- **Různé prefabrikované panely mohou obsahovat různé druhy a kvality matečního betonu**, které ovlivňují rovněž vlastnosti recyklovaného betonového kameniva (RCA).
- **Pevnost v tlaku** u všech vzorků RAC vyrobených z RCA získaného z prefabrikovaných panelů byla uspokojivě **blízko cílových hodnot** ve srovnání s hodnotami vypočtenými podle normy EN 1992-1-1 (2004). Získané výsledky odhalily, že panely z prefabrikovaných

budov lze po adekvátním zpracování **použít pro aplikaci v konstrukčních betonech středních pevností.**

- Navzdory faktu, že ČSN EN 206: 2013 + A1: 2016 předepisuje maximálně 30% náhradu, výzkum vědomě a cíleně překročil uvedenou hranici na hodnotu **40 % hmotnostní substituce v betonových směsích** a byla shledána technická vhodnost výroby RAC.
- Vzdálenost betonárny od staveniště se **neprokázala jako kriticky cenotvorná.** Naopak **objem prvku je signifikantním parametrem** pro výpočet celkové ceny transportbetonu při úvaze využití složky z recyklovaného kameniva.
- Zlomová hranice, kdy je možné aplikovat beton s recyklovaným kamenivem ve výši 40 % hmotnosti jako ekonomicky výhodnější je přibližně 8 m<sup>3</sup>, tzn. **recyklovaný beton může být ekonomicky smysluplný.**
- Definování charakteristik jako modelových **parametrů pro zpětný import do BIM** dává datům vhodnou strukturalizaci jasnost a čistotu. Informace o betonech zpětně obohacují BIM model pro využití v dalších fázích životního cyklu budovy.

Je rovněž možné provést vyhodnocení předem stanovených vědeckých hypotéz:

**Hypotéza 1:** Recyklované kamenivo, pocházející z panelové budovy, nelze použít pro konstrukční recyklovaný beton, jelikož je kamenivo většinou nedostatečné kvality.

**Odpověď na vědeckou hypotézu č.1:** Obecně, lze konkludovat, že konstrukční beton středních pevností může obsahovat alespoň minimální množství RCA v souladu s lokálně příslušnými normovanými požadavky a příslušným ověřením.

**Hypotéza č. 1 byla jednoznačně VYVRÁCENA.**

**Hypotéza 2:** Implementace informací o recyklovaném kamenivu v informační části BIM modelu a využití optimalizačních metod zefektivní recyklační proces.

**Odpověď na vědeckou hypotézu č. 2:** Efektivita prezentovaného algoritmu spočívá v opakovaném vyhodnocování suboptimálních variant, které by při ručním či intuitivním vyhodnocení byly velmi obtížně a zdlouhavě zjištělné.

**Hypotéza č. 2 byla jednoznačně POTVRZENA.**

Výsledky experimentálního výzkumu **odhalily technickou vhodnost studovaných zdrojů RCA** pro výrobu středně pevných konstrukčních recyklovaných betonů. Z prezentovaných výsledků dále vyplývá, že **ekonomická výhodnost použití RAC je odlišná pro každý individuální prvek a rovněž pro každou stavbu.** Množství typů odebraných vzorků z panelových budov je v této práci omezené a pro ucelenější obraz stavu materiálové základny panelových domů nejen v České republice **bude nutno provést další testování.** Práce však **deklaruje, že využití digitálních dat informačního modelu budovy** a jeho využití při **optimalizačních výpočtech** může napomoci **efektivně a ekonomicky nakládat s přírodními i druhotnými zdroji.** Při rozhodovacích problémech s důrazem na environmentální aspekty výstavby pak může práce přispět k inicializaci propojení systémů výkonných optimalizačních metod, principů cirkulární ekonomiky a digitalizace stavebnictví v kompaktní a funkční systém.

## 6. LITERATURA A ZDROJE

- [1] UNEP-DTIE. *Cities and Buildings* [online]. 2016. Dostupné z: [http://energies2050.org/wp-content/uploads/2013/09/2013-06-UNEP-Cities-and-buildings-activities\\_16-pages-GB.pdf](http://energies2050.org/wp-content/uploads/2013/09/2013-06-UNEP-Cities-and-buildings-activities_16-pages-GB.pdf)
- [2] BRAVO, Miguel, Jorge DE BRITO, Jorge PONTES a Luís EVANGELISTA. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, **77**, 357–369. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103>
- [3] KOZLOVSKÁ, Mária a Marcela SPIŠÁKOVÁ. Construction waste generation across construction project life-cycle. *Organization, Technology & Management in Construction: An International Journal* [online]. 2013. ISSN 18475450. Dostupné z: <https://doi.org/10.5592/otmcj.2013.1.5>
- [4] EUROPEAN COMMISSION. *EU Construction & Demolition Waste Management Protocol* [online]. 2016. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/attachments/1/translations/en/renditions/native>
- [5] EUROPEAN COMMISSION. *Regulation No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC* [online]. 2011. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R0305&from=EN>
- [6] SARAVANAN, J. a N. SUGANYA. Mechanical Properties of Concrete Using Steel Slag Aggregate. *International Journal of Engineering Inventions* [online]. 2015, **4(9)**, 7–16. Dostupné z: <http://www.ijejournal.com/papers/Vol.4-Iss.9/B0490716.pdf>
- [7] VISWANADHAM, N. The past, present, and future of supply-chain automation. *IEEE Robotics and Automation Magazine* [online]. 2002. ISSN 10709932. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MRA.2002.1019490>
- [8] KRAVANJA, S., T. ŽULA a U. KLANŠEK. Multi-parametric MINLP optimization study of a composite I beam floor system. *Engineering Structures* [online]. 2017, **130**, 316–335. ISSN 18737323. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.012>
- [9] CAJZEK, Rok a Uroš KLANŠEK. Cost optimization of project schedules under constrained resources and alternative production processes by mixed-integer nonlinear programming. *Engineering, Construction and Architectural Management* [online]. 2019, **ahead-of-p**(ahead-of-print). ISSN 0969-9988. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/ecam-01-2019-0013>
- [10] VENKRBEK, Václav, Mario GALIĆ a Uroš KLANŠEK. Construction process optimisation – review of methods, tools and applications. *Grđevinar* [online]. 2018, **70(07)**, 593–606. ISSN 03502465. Dostupné z: <https://doi.org/10.14256/jce.1719.2016>
- [11] VENKRBEK, Václav a Uroš KLANŠEK. Software-based support to decision-making process regarding the selection of concrete suppliers. In: M. A. ALI a P. PLATKO, ed. *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II* [online]. Leiden: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017, s. 667–672. ISBN ISBN 978-131539382-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781315393827-113>
- [12] EUROSTAT. Generation of waste by economic activity, Classification of Economic Activities NACE Rev. 2, Construction. *Waste statistics* [online]. 2019 [vid. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00106/default/table?lang=en>
- [13] EPA. *Advancing Sustainable Materials Management: 2017 Fact Sheet, Assessing Trends in Material Generation, Recycling, Composting, Combustion with Energy Recovery and Landfilling in the United States* [online]. 2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [14] MOE. *Annual Report on Environmental Statistics 2017* [online]. 2018. Dostupné z: [https://www.env.go.jp/en/statistics/contents/2017/E2017\\_all.pdf](https://www.env.go.jp/en/statistics/contents/2017/E2017_all.pdf)
- [15] ROJÍK, Václav, Václav BRABEC, Miloš CUC, Václav HLAVÁČEK, Alexej HRON, Zdeněk LHOTA, Lubor ODVÁRKA, Tatjana ROJÍKOVÁ, Josef ŘÍHA, Jiří WITZANY a Rudolf ZAHŘÁDKA. *Panelové objekty, Zásady konstruování a provádění*. Praha: SNTL, 1974.
- [16] COHEN, Caroline, Andrew FLYNN a John RYDER. Waste policy in wales: The case of construction and demolition. In: *Sustainable Waste Management, Proceedings of the International Symposium* [online]. Dundee: ICE Publishing, 2003, s. 95–104. ISBN 072773251X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1680/swm.32514.0011>
- [17] WRAP. *Calculating and declaring recycled content in construction products*. 2008.
- [18] JUNG, Jong Suk, Sang Hoon SONG, Myoung Hoon JUN a Seong Sik PARK. A comparison of

- economic feasibility and emission of carbon dioxide for two recycling processes. *KSCE Journal of Civil Engineering* [online]. 2015, **19**(5), 1248–1255. ISSN 19763808. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0708-2>
- [19] CHAKRADHARA, Rao M., Sriman Kumar BHATTACHARYYA a Sudhir Kumar V. BARAI. Demolition Techniques and Production of Recycled Aggregate. In: *Systematic Approach of Characterisation and Behaviour of Recycled Aggregate Concrete* [online]. Transactio. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019, s. 39–63. ISBN 978-981-10-6685-6. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6686-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6686-3_2)
- [20] WBCSD. *Recycling Concrete* [online]. 2009. ISBN 978-3-940388-49-0. Dostupné z: <http://docs.wbcsd.org/2009/07/CSI-RecyclingConcrete-FullReport.pdf>
- [21] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Průvodce předcházením vzniku stavebních odpadů*. 2017. ISBN 978-80-7212-613-9.
- [22] WEIMANN, Karin, Lutz B. GIESE, Günter MELLMANN a Franz-Georg SIMON. Building Materials from Waste. *Materials Transactions, Special Issue on Growth of Ecomaterials as a Key to Eco-Society* [online]. 2003, **7**(44), 1255–1258. Dostupné z: <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.1255>
- [23] UPEG. *Annual Review 2017-2018* [online]. 2017. Dostupné z: <http://www.uepg.eu/uploads/Modules/Publications/uepg-annual-review-2017-2018.pdf>
- [24] PEDRO, D., J. DE BRITO a L. EVANGELISTA. Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: influence of the crushing process. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* [online]. 2015, **48**(12), 3965–3978. ISSN 13595997. Dostupné z: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0456-7>
- [25] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. Tab. 250 Obydlené domy s byty podle období výstavby nebo rekonstrukce a podle počtu bytů, technického vybavení, počtu nadzemních podlaží, materiálu nosných zdí a podle druhu domu (SPCR250). *Sčítání lidu, domů a bytů, definitivní výsledky* [online]. 2019 [vid. 2019-11-15]. Dostupné z: [https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jspx?\\_afP=page=vystup-objekt&pvo=SPCR250&pvoc=&katalog=30725&z=T](https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jspx?_afP=page=vystup-objekt&pvo=SPCR250&pvoc=&katalog=30725&z=T)
- [26] ŠÁLA, Jiří a Milan MACHATKA. *Tepelné technické vady a poruchy panelových budov a jejich sanace*. Praha / Brno: Organization for the Promotion of Energy Technologies (OPET), 2002. ISBN 80-902689-7-8.
- [27] GALIĆ, Mario, Vaclav VENKRBEK, Franziska CHMELIK, Immo FEINE, Zoran PUČKO a Uroš KLANŠEK. Survey of Accomplishments in Bim Implementation in Croatia, the Czech Republic, Germany, and Slovenia. *Elektronički časopis građevinskog fakulteta Osijek* [online]. 2017, **8**(15), 23–35. ISSN 18478948. Dostupné z: <https://doi.org/10.13167/2017.15.3>
- [28] KLEE, Lukáš. *BIM Protokol: pravidla pro digitální spolupráci* [online]. 2021 [vid. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.koncepcibim.cz/832-bim-protokol-pravidla-pro-digitalni-spolupraci>
- [29] LIU, Hexu, Mohamed AL-HUSSEIN a Ming LU. BIM-based integrated approach for detailed construction scheduling under resource constraints. *Automation in Construction* [online]. 2015, **53**, 29–43. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.008>
- [30] LU, Qiqi, Jongsung WON a Jack C.P. CHENG. A financial decision making framework for construction projects based on 5D Building Information Modeling (BIM). *International Journal of Project Management* [online]. 2016, **34**(1), 3–21. ISSN 02637863. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.09.004>
- [31] WONG, Johnny Kwok Wai a Jason ZHOU. Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Automation in Construction* [online]. 2015, **57**, 156–165. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003>
- [32] MOTAWA, Ibrahim a Abdulkareem ALMARSHAD. A knowledge-based BIM system for building maintenance. *Automation in Construction* [online]. 2013, **29**, 173–182. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.008>
- [33] EASTMAN a Charles M. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. B.m.: John Wiley & Sons Inc., 2011. ISBN 9780470541371.
- [34] GHAFFARIANHOSEINI, Ali, Tongrui ZHANG, Okechukwu NWADIGO, Amirhosein GHAFFARIANHOSEINI, Nicola NAISMITH, John TOOKEY a Kaamran RAAHEMIFAR. Application of nD BIM Integrated Knowledge-based Building Management System (BIM-IKBMS) for inspecting post-construction energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **72**, 935–949. ISSN 18790690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.061>
- [35] GRIEBEL, M. *Programming for Computations – MATLAB / Octave*. 2016. ISBN 9783319324517.



- [36] VOLK, Rebekka, Thu Huong LUU, Johannes Sebastian MUELLER-ROEMER, Neyir SEVILMIS a Frank SCHULTMANN. Deconstruction project planning of existing buildings based on automated acquisition and reconstruction of building information. *Automation in Construction* [online]. 2018, **91**, 226–245. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.017>
- [37] SCHULTMANN, Frank. *Final Report of Task Group 39 on Deconstruction*. 2005. ISBN 978-9063630447.
- [38] CIB. *CIB report: Building deconstruction* [online]. 2001. Dostupné z: <http://site.cibworld.nl/dl/publications/Pub278/05Deconstruction.pdf>
- [39] WANG, Jiayuan, Hongping YUAN, Xiangping KANG a Weisheng LU. Critical success factors for on-site sorting of construction waste: A china study. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2010, **54**, 931–936. ISSN 09213449. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.012>
- [40] XIAO, Jianzhuang. Reclaim of Waste Concrete. In: *Recycled Aggregate Concrete Structures* [online]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2018, s. 15–38. ISBN 978-3-662-53985-9. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-53987-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53987-3_2)
- [41] ISO. *ISO 21873-1 Building construction machinery and equipment — Mobile crushers — Part 1: Terminology and commercial specifications*. 2015
- [42] COELHO, A. a Jorge DE BRITO. Preparation of concrete aggregates from construction and demolition waste (CDW). In: F. PACHECO-TORGAL, V. W.Y. TAM, J. A. LABRINCHA, Y. DING a J. DE BRITO, ed. *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste* [online]. B.m.: Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2013, s. 231–266. ISBN 9780857096906. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9780857096906.2.210>
- [43] GARBARINO, E. a G. A. BLENGINI. The economics of construction and demolition waste (C&DW) management facilities. In: F. PACHECO-TORGAL, V.W.Y. TAM, J. LABRINCHA, Y. DING a Jorge DE BRITO, ed. *Handbook of recycled concrete and demolition waste* [online]. B.m.: Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2013, s. 131–161. ISBN 9780857096906. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9780857096906.1.108>
- [44] FULLER, William B a Sanford E THOMPSON. The Laws of Proportioning Concrete. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1907, **59**(2), 67–143. ISSN 0066-0604.
- [45] THE MATHWORKS INC. *MATLAB* [online]. 2020 [vid. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [46] POZEMNÍ STAVBY BRNO S.P. *Podnikové spotřební normy materiálu HSV*. Brno: Pozemní stavby Brno s.p., 1975.
- [47] ČKAIT, SVAZ PODNIKATELŮ VE STAVEBNICTVÍ V ČR a STAVEBNÍ CENTRUM. *Panelové domy: stavební kniha*. Stavební k. Brno: Expo Data ve spolupráci s Českou komorou autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě a se Svazem podnikatelů ve stavebnictví v ČR, 2000. ISBN 80-86163-99-7.
- [48] ZBOŘIL, Ivan. *Blansko - odstranění objektu Hotelu Dukla - č.p. 1928, projektová dokumentace bouracích prací*. Brno: Ing. Ivan Zbořil, Vedlejší 8, 39 221 Brno
- [49] EUROPEAN COMMISSION. *Guidelines for the waste audits before demolition and renovation works of buildings*. 2018.
- [50] VENKRBEČ, Václav, Iveta NOVÁKOVÁ a Svatava HENKOVÁ. Characteristics of Recycled Concrete Aggregates from Precast Slab Block Buildings. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, s. 1–10. ISSN 1757899X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/3/032076>
- [51] AUTODESK INC. *Revit* [online]. 2020 [vid. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/revit/subscribe?plc=RVT&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>
- [52] ARCH.DESIGN, s.r.o. *Výzkumné centrum CEITEC, pokročilé materiály a technologie – TENDROVÁ PROJEKTOVÁ DOKUMENTACE –B SOUHRNNÁ TECHNICKÁ ZPRÁVA, kód dokumentu B-08-150-100*. 2011.
- [53] VENKRBEČ, Václav. *Concrete Delivery 1.0* [online]. 2018. Dostupné z: <http://tstsw.cz/betony/>

---

## VYBRANÁ PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA

VENKRBEC, V.; KLANŠEK, U. Suitability of Recycled Concrete Aggregates from Precast Panel Buildings Deconstructed at Expired Lifespan for Structural Use. *Journal of Cleaner Production*, 2019, č. 247, s. 1-12. ISSN: 0959-6526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119593>

VENKRBEC, V.; GALIĆ, M.; KLANŠEK, U. Construction process optimisation - review of methods, tools and applications. *GRADEVINAR*, 2018, roč. 70, č. 7, s. 593-606. ISSN: 0350-2465. Dostupné z: <https://doi.org/10.14256/JCE.1719.2016>

GALIĆ, M.; VENKRBEC, V.; CHMELIK, F.; FEINE, I.; PUČKO, Z.; KLANŠEK, U. Survey Of Accomplishments in BIM Implementation in Croatia, The Czech Republic, Germany and Slovenia. *e-GFOS*, 2017, roč. 2017, č. 14, s. 23-35. ISSN: 1847-8948. Dostupné z: <https://doi.org/10.13167/2017.15.3>

VENKRBEC, V.; KLANŠEK, U. Software-based support to decision-making process regarding the selection of concrete suppliers. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II*. 1. London: CRC Press Balkema, 2016. s. 667-672. ISBN: 9781315393827. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781315393827>

VENKRBEC, V.; KLANŠEK, U. Selection of concrete plant for construction managers - a decision-making process. *International journal of interdisciplinarity in theory and practice*, 2016, roč. 2016, č. 11, s. 257-263. ISSN: 2344-2409. Dostupné z: <http://www.itpb.eu/index.php/ct-menu-item-3/14-engineering/405-11-cislo-clanok-49>

GALIĆ, M.; VENKRBEC, V.; CHMELIK, F.; FEINE, I.; PUČKO, Z.; KLANŠEK, U. Review of BIM' s Implementation in some EU AEC Industries. In *OTMC Conference 2017, 27-30 September 2017, Poreč, Croatia - Conference Proceedings*. Zagreb, Croatia: Croatia Association for Construction Management; University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2017. s. 462-476. ISBN: 978-953-8168-21- 5.

VENKRBEC, V.; NOVÁKOVÁ, I.; BRANDTNER, M.; BUYLE, B. Survey of recycled aggregate concrete requirements in standards and guidelines of selected countries. In *SBE 19 Malta, Sustainability & Resilience, International Conference, 21st November - 22nd November 2019. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Malta: SBE Malta - Sustainable Built Environment Malta, 2020. s. 1-15. ISBN: 978-99957-1-613-4. ISSN: 1755-1307.

BRANDTNER, M.; VENKRBEC, V. Non-graphical data structure for the purpose of BIM-based Life Cycle Assessment: Methodology for the Czech environment. In *6th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium 7-11 September 2020, Prague, Czech Republic. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Prague: IOP Publishing, 2020. s. 1-9. ISSN: 1755-1307. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/609/1/012048>

ČECH, D.; ŠTĚRBA, M.; VENKRBEC, V.; FIALOVÁ, K. RECYCLING OF BUILDING WASTE. *Journal of International Scientific Publications: Ecology & Safety*, 2013, roč. 7, č. 1, s. 211-221. ISSN: 1313- 2563.

Kompletní publikační činnost je uvedena na webu VUT v Brně: <https://www.vutbr.cz/lide/vaclav-venkrbec-100074>

## ŽIVOTOPIS

### Ing. Václav Venkrbec

Narozen: 1986, v Havířově

Bydliště: Brno

OrcID: [0000-0003-1842-7582](#)

Researcher ID: [P-5393-2017](#)

Scopus ID: [57190956170](#)

### Vzdělání

2010 – 2012: VUT v Brně, Fakulta stavební, Ing., Stavební inženýrství, Realizace staveb

2006 – 2010: VUT v Brně, Fakulta stavební, Bc., Stavební inženýrství, Pozemní stavby

2002 – 2006: SPŠ Stavební, Havířov, Stavebnictví

### Funkce, členství ve spolcích

2020 – dosud: [BIM EDU University Team](#) – člen pracovní skupiny výuka BIM v rámci ČAS

2016 – dosud: expertní hodnotitel evropských projektů Horizon 2020

2016 – dosud: buildingSMART alliance – člen

2016 – dosud: Building Enclosure Technology & Environment Council – člen

2016 – dosud: Sustainable Buildings Council – člen

2015 – dosud: [Czech Journal of Civil Engineering](#) – vedoucí redaktor

2014 – dosud: [Odborná rada pro BIM \(CzBIM\)](#) – člen pracovní skupiny BIM & Výuka

2013 – dosud: VUT v Brně, Fakulta stavební – asistent, tajemník ústavu pro vědu a výzkum

### Akademické a studijní stáže

2019: University of Maribor, Faculty of Civil Engineering, Transportation Engineering and Architecture, Slovinsko.

2018: University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Department of construction project management, Srbsko.

2018: Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering, Chorvatsko.

### Vybrané granty a projekty

2016 – 2018: [MPO TRIO FV10078](#): Rozvoj retenčních materiálů na bázi recyklátu technologicky kombinované stavební vegetační konstrukce pomocí naměřených dat s verifikací na výseku prototypu (spouřešitel)

2020: [FAST-S-20-6338](#): Envi4BIM – Vývoj datové interoperability založené na aktivním BIM přístupu pro analýzu a posuzování environmentálních aspektů recyklovaných betonů (hl. řešitel)

2018: [FAST-S-18-5286](#): Simulační model pro posouzení čas. vytížení věžových jeřábů (hl. řešitel)

2017: [FAST-S-17-4108](#): Podpora rozhodovacího procesu výběru konkrétních dodavatelů transportbetonu na základě optimalizačních metod (hl. řešitel)

2014: [FAST-J-14-2363](#): Komplexní rekonstrukce panelových domů za využití recyklovaných materiálů a informačního modelu budovy (hl. řešitel)

2013: [FAST-J-13-1970](#): Využití recyklovaného stavebního materiálu k ozeleňování stavebních objektů a jejich okolí (spoluřešitel)

