



# 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

### DISERTAČNÍ PRÁCE

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

© Václav Venkrbec

Tato práce je výsledek duševní činnosti, která je chráněna autorským právem. Použití jakýchkoliv částí práce je možné pouze s uvedením bibliografické citace. Příklad citace dle normy ČSN ISO 690 je uveden dále v této práci a může být konvertována do jiné citační normy dle požadavků příslušného vydavatele.

Použití optimalizačního algoritmu je možné pouze se souhlasem autora.

Listinná verze disertační práce je uložena v Knihovnickém informačním centru Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně.

Elektronická verze disertační práce je uložena v Digitální knihovně VUT v Brně – institucionálním repozitáři, provozovaném Ústřední knihovnou na systému DSpace, dostupném online na adrese: <https://dspace.vutbr.cz>

---

## 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 transportbetonu byly intenzivně využity negrafická data z informačního modelu budovy (BIM). Práce se rovněž věnuje přenosu dat informačního modelu a definování charakteristik, potřebných pro optimalizaci celého procesu.

V teoretické rovině se práce zabývá rešerší typových soustav panelových domů s důrazem na jejich materiálové charakteristiky, jejich demolicemi, recyklacemi a následnou utilizací recyklovaného kameniva pro nové betonové receptury. Byla provedena synoptická rešerše stávajících přístupů k návrhu nových receptur betonů z recyklovaného kameniva včetně zohlednění normových požadavků s přesahem do roviny udržitelnosti celoživotního cyklu budov a cirkulační ekonomiky stavebnictví.

Experimentální část práce je zaměřena na materiálový výzkum prováděný za účelem ověření vhodnosti konkrétního typu recyklovaného kameniva do betonu (RAC) pro konstrukční využití. Práce seznamuje s provedenými postupy a výsledky zkušebních testů dvou druhů recyklovaného kameniva a následně prezentuje vytvořenou škálu receptur recyklovaných betonů (RAC) s částečnou náhradou kameniva za betonové recyklované kamenivo (RCA), pocházejícího z prefabrikovaných panelů z výškových budov, které jsou typickými obytnými strukturami v bývalých zemích východního bloku evropského kontinentu (panelové domy). Prefabrikované panely z těchto budov jsou často považovány za nevhodné zdroje pro konstrukční RAC, zejména z důvodu jejich špatné materiálové základny, nekvalifikované stavební síly a pochybné kontroly kvality spojené s výstavbovými procesy jejich výroby. Rozsah testování byl stanoven podle pokynů uvedených v normě EN 206-1. Vzorky RAC připraveny na základě receptů vyvinutých v souladu s normou EN 12390 a byly podrobeny testům, které hodnotily vlastnosti betonu. Získané výsledky zkoušek prokazují technickou vhodnost testovaných zdrojů RCA pro výrobu konstrukčních RAC se střední pevností. I přes známé komplikace s hodnotami absorpce vody RCA, které jsou relativně vysoké ve srovnání s přírodním kamenivem (NA), dosáhly 28denní pevnosti většiny vzorků RAC téměř cílových hodnot a jsou srovnatelné s 28denními pevnostmi betonu z přírodního kameniva (NAC).

Signifikantní částí analyticky orientované experimentální části práce je dopravně-optimalizační scénář s vlastním maticovým diskretním 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 informačního managementu budov (BIM) v současném pojetí zavádění do stavebního průmyslu v ČR a prezentována metodika negrafických informací modelu 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.

## ABSTRACT

The dissertation thesis deals with the use of recycled concrete aggregates obtained from deconstructed parts of a precast panels' apartment building. Furthermore, the work presents an optimization supplier-logistics algorithm to achieve a wider application of recycled concrete in structural concrete in a new building. As part of the newly developed optimization algorithm of ready-mixed concrete suppliers, non-graphical data from the building information model (BIM) were intensively used. The work also deals with the transfer of data to and from the information model and the definition of the characteristics needed to optimize the whole process.

At the theoretical level, the work provides a review of structure systems of precast buildings with emphasis on their material characteristics, their demolition, recycling and subsequent utilization of recycled aggregates for new concrete recipes. A synoptic review of existing approaches to the design of new concrete recipes from recycled concrete aggregates (RCAs) was carried out, including consideration of standard requirements with an overlap to the level of sustainability of the life cycle of buildings and the circular economy of construction.

The experimental part of the work is focused on materials research carried out in order to verify the suitability of a particular type of recycled aggregate concrete (RAC) for structural use. The work introduces the procedures and test results of two types of recycled aggregates and then presents a range of recycled concrete recipes with partial replacement of aggregates for RCAs, obtained from prefabricated panels of high-rise buildings, which are typically widespread in the former Eastern Bloc countries in Europe. Panels have been often thought unsuitable as a source of structural RAC due to their poor original material base, low-skilled construction workers and dubious quality controls utilised during their production. The scope of testing was determined according to the instructions given in standard EN 206-1. RAC samples were prepared on the basis of recipes developed in accordance with EN 12390 standard and were subjected to tests that evaluated the properties of concrete. The gained test results show the technical suitability of the tested RCA sources for producing medium strength structural RAC. In spite of obtaining RCA water absorption values which are relatively high compared to natural aggregate (NA), the 28-day strengths of most RAC specimens nearly attained the specified target values. Therefore, they were considered to be comparable to the 28-day strengths of natural aggregate concrete (NAC).

A significant part of the analytically oriented experimental part of the work is the logistic

optimization scenario with its own matrix discrete algorithm and economic graphical evaluation. The case study examines the relevance of the proposed algorithm on a real scenario, namely the construction of the scientific technology institute CEITEC in Brno. Furthermore, the work summarizes the issue of BIM and presents a methodology for handling non-graphical information of the building model to define the characteristics of recycled concrete in buildings.

The conclusions are addressed both for practice and for the development of scientific disciplines. The work provides practically directed new information to specific manufacturers and suppliers of concrete mixtures in the field of processing prefabricated panels from deconstructed buildings as well as collecting suitable RCA and producing a new structural RAC and demonstrates the suitability of the proposed algorithm to find the optimal concrete supplier with respect to economic and environmental criteria.

## **KEYWORDS**

Recycling; Recycled Concrete Aggregates; RCA; Recycled Aggregate Concrete; RAC; Precast Panel; High-rise Building; Deconstruction; Construction and Demolition Waste; CDW; Optimisation Methods; Concrete Recipe; Building Information Management; BIM; Building Life Cycle; Circular Economy; Sustainable Construction.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE DLE ČSN ISO 690: 2010**

Ing. Václav Venkrbec *Optimalizace recyklátů z betonových prefabrikátů a jejich charakteristiky pro informační model budovy*. Brno, 2021. 241 s., 153 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie, mechanizace a řízení staveb. Vedoucí práce Ing. Svatava Henková, CSc. Vedoucí specialista prof. Dr. Uroš Klanšek.

## **BIBLIOGRAPHIC REFERENCE ACORDING TO ISO 690: 2010 STANDARD**

Ing. Václav Venkrbec *Optimization of recycled concrete materials from precast concrete elements and their characteristics for building information model*. Brno, 2021. 241 pp., 153 pp. of appendixes. Doctoral thesis. Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institute of Technology, Mechanization and Construction Management. Supervisor Ing. Svatava Henková, CSc. Supervisor specialist prof. Dr. Uroš Klanšek.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že disertační práci s názvem *Optimalizace recyklátů z betonových prefabrikátů a jejich charakteristiky pro informační model budovy* jsem zpracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 30. 4. 2021

Václav Venkrbec

autor práce



## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané disertační práce s názvem *Optimalizace recyklátů z betonových prefabrikátů a jejich charakteristiky pro informační model budovy* je shodná s odevzdanou listinnou formou. Listinná forma obsahuje kromě tištěné části i část příloh na vloženém elektronickém nosiči.

V Brně dne 30. 4. 2021

Václav Venkrbec

autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mi v průběhu tvorby disertační práce poskytli pomoc. Na prvním místě je to paní školitelka Ing. Svatava Henková, CSc., která se ujala vedení práce a poskytla mi mnoho hodnotných rad. Vážím si jejího skvělého přístupu a podpory.

Školitel specialista pro oblast matematických optimalizačních metod této práce, pan prof. Dr. Uroš Klanšek, PhD z University of Maribor, mi poskytl nejen mentoring akademický a vědecko-výzkumný, ale je mi rovněž životní inspirací a za to mu upřímně velmi děkuji.

Rovněž děkuji kolegovi Assoc. prof. Dr. Mario Galić z University of Osijek za konzultaci optimalizačních metod a za jeho akademicko-přátelský přístup.

Děkuji Ing. Ivetě Novákové, Ph.D. z UiT Norges Arctic University in Narvik za velkou pomoc při zpracování vzorků a konzultaci při míchání nových receptur betonových směsí a rovněž za celkovou akademickou, výzkumnou a publikační spolupráci.

Mnohokrát děkuji kolegům Bc. Ivo Süsovi a RNDr. Oto Příbylovi za konzultace a pomoc při operacích v prostředí Matlab, Ing. Petru Selníkovi za dopravu vzorků, Ing. Šamonilovi, vedoucímu oddělení stavebního řádu MěÚ Blansko za poskytnutou dokumentaci panelové budovy. Panu Ing. Ríznerovi, vedoucímu odboru komunální údržby MěÚ Blansko a panu Vítu Hořejšovi a Romanu Hrabcovi z firmy AWT Rekultivace a.s. děkuji za pomoc při odběru vzorků. Dále děkuji panu Ing. Pavlu Loudovi, Ph.D., hlavnímu technologovi společnosti Prefa Brno, a.s., za pomoc při rešerších v archivech a také paní Ivaně Peterkové, vedoucí recyklačního centra Moravostav a.s. v Brně, za poskytnutí prostoru při drcení betonu.

Děkuji kvestorovi VUT v Brně, panu doc. Janíčkoví a panu Ing. Marvanovi za zájem rektorátu VUT v Brně o recyklace a souhlas s poskytnutím dokumentace ke stavbě CEITEC. Velký dík patří společnosti Arch.Design s.r.o., konkrétně paní Akad. arch. Hayekové a panu Ing. Šplíchalovi za součinnost při poskytnutí podkladové projektové dokumentace CEITEC. Za konzultace a podnětné diskuze na konferencích i mimo ně patří dík téměř nekonečné řadě kolegů z universit a institutů: University of Maribor; University of Osijek; UiT Norges Arctic University in Narvik; TU Split; TU Malta; TU München; TU Wien; Cracow University of Technology; TU Košice; STU Bratislava; ČVUT Praha; VŠB-TUO v Ostravě a mnoho dalších.

Velmi upřímný a osobní dík patří mé partnerce Pavle za její neutuchající trpělivost a podporu, i za to, že se v průběhu dokončování práce tak intenzivně starala o našeho syna Antonína.

Velký dík patří rodičům za jejich hmotnou i morální podporu.

## VYUŽITÉ PLATFORMY A SOFTWARE

Při zpracování této práce bylo nezbytné využít následující výpočetní platformy a softwarové vybavení.

Optimalizační metody:

- MATLAB – verze R2017a – licence VUT v Brně
- Python – verze 2.7.10 – licence Open Source
- Google Maps API – individuálně pořázená licence

Práce s BIM soubory:

- Autodesk Revit 2021 – licence VUT v Brně
- Autodesk Navisworks Manage – licence VUT v Brně

Citační managery:

- Mendeley Desktop for macOS – verze 1.19.8. – Free licence
- Mendeley Cite – verze 1.26.0.0. – Free licence
- Mendeley Web Importer – verze 3.1.117 – Free licence

Grafické a vizualizační práce:

- yEd Editor – verze 3.20.1. – licence Open Source

# KLASIFIKACE ZAMĚŘENÍ PRÁCE DLE MEZINÁRODNÍCH STANDARDŮ

- **BIC 2010**

RN The Environment

RNH Waste management

UM Computer programming / software development

UMJ Functional programming

UG Graphical & digital media applications

UGC Computer-aided design (CAD)

UN Databases

UNJ Object-oriented databases

PBU Optimization

PBUH Linear Programming

PBW Applied mathematics

PBWH Mathematical modelling

- **MSC 2010**

90Cxx Operations research, mathematical programming

90C30 Nonlinear programming

90C90 Applications of mathematical programming

# OBSAH

<b>1. MOTIVAČNÍ ÚVOD</b>	<b>17</b>
<b>2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY</b>	<b>21</b>
2.1. KAMENIVO Z BETONOVÉHO RECYKLÁTU JAKO NÁHRADA PŘÍRODNÍHO KAMENIVA DO KONSTRUKČNÍHO BETONU .....	22
2.1.1. Globální kontext udržitelnosti a recyklací .....	23
2.1.2. Evropský kontext udržitelnosti a recyklací.....	26
2.1.3. Lokální kontext udržitelnosti a recyklací .....	28
2.1.4. Recyklační proces budov .....	29
2.1.5. Materiálové zdroje pro beton.....	37
2.1.6. Normové a legislativní požadavky pro beton z recyklovaného kameniva ...	42
2.1.7. Fyzikální a mechanické vlastnosti recyklovaného kameniva.....	53
2.1.8. Dílčí závěry z rešerše vlastností recyklovaného kameniva .....	58
2.1.9. Sledované parametry recyklovaného betonu .....	59
2.1.10. Dílčí závěry z parametrů recyklovaného betonu .....	60
2.2. PROBLEMATIKA PREFABRIKOVANÝCH PANELOVÝCH BUDOV .....	61
2.2.1. Historie panelových budov .....	61
2.2.2. Konstrukční soustavy panelových budov .....	63
2.2.3. Faktory, ovlivňující stav panelových budov.....	64
2.2.4. Životní cyklus (panelových) budov .....	74
2.2.5. Demolice a recyklace panelových budov .....	77
2.2.6. Dílčí závěry z rešerše panelových budov a životního cyklu.....	77
2.3. INFORMAČNÍ MANAGEMENT BUDOV V KONTEXTU VYUŽITÍ INFORMACÍ O MATERIÁLECH .....	79
2.3.1. BIM v ČR .....	80
2.3.2. Dimenze BIM .....	81
2.3.3. Dodávka výstavbového projektu při využití BIM .....	81
2.3.1. Datové a informační standardy BIM .....	84
2.3.2. Datové formáty pro přenos informací v rámci BIM.....	85
2.3.3. Dílčí závěry z rešerše informačního managementu budov.....	86
2.4. OPTIMALIZAČNÍ METODY VE STAVEBNÍM MANAGEMENTU .....	87
2.4.1. Optimalizační metody.....	87
2.4.2. Modelovací nástroje pro optimalizaci .....	91

2.4.3. Analýza současných matematických optimalizačních metod .....	92
2.4.4. Optimalizace a BIM .....	94
2.4.5. Dílčí závěry z rešerše a analýzy optimalizačních metod .....	95
<b>3. VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>97</b>
3.1. REFLEXE A KONTEXTUALIZACE PROBLEMATIKY .....	97
3.2. CÍLE PRÁCE.....	97
3.3. STANOVENÍ VĚDECKÝCH HYPOTÉZ.....	98
<b>4. METODY ZPRACOVÁNÍ</b>	<b>99</b>
4.1. METODICKÝ RÁMEC NAKLÁDÁNÍ S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM.....	99
4.1.1. I. fáze – vstup – zdroj materiálu.....	102
4.1.2. II. fáze – klasifikace zdroje .....	102
4.1.3. III. fáze – zpracování zdroje.....	102
4.1.4. IV. fáze – procesy zpracování RCA.....	104
4.1.5. V. fáze – procesy zpracování RAC .....	105
4.1.6. VI. fáze – výstupy – zpracovaný materiál.....	105
4.2. ODBĚR A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ .....	106
4.2.1. Stanovení zrnitosti kameniva – síťový rozbor .....	106
4.2.2. Stanovení množství jemných částic .....	108
4.2.3. Stanovení tvaru zrn – tvarový index .....	109
4.2.4. Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti .....	109
4.2.5. Stanovení odolnosti proti drcení metodou Los Angeles .....	110
4.3. METODY NÁVRHU RECEPTUR BETONU.....	110
4.3.1. Poměry frakcí kameniva dle Fullerovy křivky.....	111
4.3.2. Poměr záměsové vody k množství cementu .....	111
4.3.3. Stanovení dílčích složek betonové směsi .....	111
4.3.4. Stanovení cen směsí recyklovaných betonů.....	112
4.4. RÁMEC OPTIMALIZAČNÍHO VÝZKUMNÉHO PŘÍSTUPU.....	113
4.4.1. Definice entit optimalizačního rámce .....	113
4.4.2. Chronologická demonstrace funkce modelu .....	115
4.4.3. Podrobný popis modelu v prostředí MATLAB .....	124
4.5. METODY TVORBY NEGRAFICKÝCH DAT PRO DEFINOVÁNÍ CHARAKTERISTIK RAC V BIM .....	139

4.5.1. Obsah datových standardů.....	139
4.5.2. Volba datového standardu pro transfer.....	141
4.5.3. Definování jedinečnosti prvku v rámci BIM.....	141
4.6. DÍLČÍ ZÁVĚRY Z KAPITOLY METODY.....	144
<b>5. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO PROGRAMU</b>	<b>145</b>
5.1. MATERIÁLOVÝ EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM.....	145
5.1.1. I. fáze – vstup – zdroj materiálu.....	145
5.1.2. II. fáze – klasifikace zdroje.....	147
5.1.3. III. fáze – zpracování zdroje.....	149
5.1.4. IV. fáze – procesy zpracování RCA.....	152
5.1.5. V. fáze – procesy zpracování RAC.....	156
5.2. EXPORT DAT Z BIM A IMPORT DO PROSTŘEDÍ OPTIMALIZAČNÍCH VÝPOČTŮ.....	161
5.2.1. Definování charakteristik RAC z prostředí optimalizačních výpočtů pro modelovací prostředí BIM.....	161
5.3. PŘÍPADOVÁ STUDIE A VÝSLEDKY OPTIMALIZACE.....	163
5.3.1. Představení podkladové části.....	163
5.3.2. Logistický model.....	166
5.3.3. Okrajové podmínky a limity.....	168
5.3.4. Výsledky optimalizace dodavatelů transportbetonu.....	170
<b>6. DISKUZE A SOUHRNNÝ ZÁVĚR</b>	<b>185</b>
6.1. ZÁVĚRY K VÝSLEDKŮM MATERIÁLOVÉHO VÝZKUMU.....	185
6.2. ZÁVĚRY K OPTIMALIZAČNÍM VÝSLEDKŮM NA PŘÍPADOVÉ STUDII.....	187
6.3. ZÁVĚRY Z ČÁSTI INFORMAČNÍHO MODELOVÁNÍ BUDOV (BIM) V SOUVISLOSTI S PŘÍPADOVOU STUDIÍ.....	188
6.4. VYHODNOCENÍ STANOVENÝCH HYPOTÉZ.....	189
6.5. PŘÍNOS PRÁCE PRO PRAXI.....	191
6.6. PŘÍNOSY PRO VĚDNÍ OBORY A DOPORUČENÍ.....	193
<b>7. LITERATURA A ZDROJE</b>	<b>195</b>
<b>8. TERMINOLOGIE A DEFINICE</b>	<b>226</b>

<b>9. SEZNAM ZKRATEK A AKRONYMŮ</b>	<b>233</b>
<b>10. SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>238</b>
<b>11. SEZNAM TABULEK</b>	<b>240</b>
<b>12. SEZNAM ROVNIC A VZTAHŮ</b>	<b>242</b>
<b>13. PŘÍLOHY</b>	<b>243</b>
13.1. Synoptický přehled normativních požadavků na recyklované kameniva.....	243
13.2. Přehled matematických optimalizačních problémů .....	249
13.3. Přehled heuristických optimalizačních přístupů, zaměřených na dopravní problémy při realizaci staveb.....	251
13.4. Přehled matematických optimalizačních přístupů, zaměřených na problémy optimalizace zdrojů při realizaci staveb .....	257
13.5. Přehled matematických optimalizačních přístupů, zaměřených na problémy optimalizace rozvržení a tras při realizaci staveb..	262
13.6. Využití aktivního BIM přístupu pro přiřazovací problémy a problémy rozvržení .....	265
<b>14. ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY</b>	<b>268</b>
14.1. Návrh receptur recyklovaných betonových směsí RAC-01 pro materiálový experimentální program .....	268
14.2. Návrh receptur recyklovaných betonových směsí RAC-02 pro materiálový experimentální program .....	268
14.3. Vstupní data – matice dat z informačního modelu budovy (BIM) .....	268
14.4. Vstupní data – seznam interních betonáren .....	268
14.5. Vstupní data – seznam externích betonáren .....	269
14.6. Vstupní data – matice cen betonů interních betonáren .....	269
14.7. Vstupní data – matice cen betonů externích betonáren .....	269
14.8. Vstupní data – matice cen dopravy externích betonáren .....	269
14.9. Podrobné výsledkové grafy optimalizace .....	269
14.10. Kompletní optimalizační algoritmus v jazyce prostředí MATLAB .....	269



## 1. MOTIVAČNÍ ÚVOD

Budovy a stavební průmysl mají významný dopad na využívání globálních zdrojů a generují přibližně 40 % celkové celosvětové produkce odpadu (UNEP-DTIE 2016), což jsou cca 3 miliardy tun odpadu ročně (Bravo et al. 2015). Snižování objemu stavebního a demoličního odpadu je proto pochopitelně jednou ze světových i Evropských priorit (Kozlovská a Spišáková 2013; European Commission 2016c). Vize Evropské unie pro cirkulární ekonomiku je odklonit se od lineárních procesů a zaměřit se na dosažení takové ekonomiky, v níž bude hodnota zdrojů, materiálů a produktů co nejdéle udržována (European Commission 2015; 2016c). Je proto žádoucí, aby vedlejší produkty, vytvořené během výroby, opakovaně použité produkty a materiály po skončení životnosti již nebyly považovány za odpad, ale spíše za cenné zdroje, které mají být vráceny zpět do výrobního procesu (Stahel 2016). V této souvislosti je jedním z definovaných cílů členských států EU recyklovat alespoň 70 % stavebního a demoličního odpadu (European Commission 2011).

Navíc, míra industrializace a urbanizace, která se navyšuje paralelně s růstem ekonomiky a obyvatelstva vyvolává důsledek, že se beton stává nejneudržitelnějším materiálem, a to především z důvodu spotřeby velkého množství přírodních zdrojů pro jeho výrobu (Behera et al. 2014). 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. Až 70 % z objemu betonu pak zaujímá kamenivo (Saravanan a Suganya 2015). Drcením stávajícího betonu může vzniknout recyklované betonové kamenivo (dále jen recyklát<sup>1</sup>). Pro vytvoření principů udržitelného stavebního průmyslu je nevyhnutelné nakládat s betonovým recyklátem efektivně, a tudíž využít jeho plný potenciál. Z betonového recyklátu je možné opět, za určitých podmínek, vyrobit betonovou směs a vytvořit nový betonový prvek. Současné využití betonového recyklátu je závislé na množství informací o jeho fyzikálně-mechanických vlastnostech, a to především je-li kladen důraz na využití recyklátu v betonech vyšších pevnostních tříd, určených pro nosné konstrukce, tzv. konstrukční beton.

Problematika recyklovatelnosti je ve střední a východní Evropě umocněna rozšířeným podílem budov z prefabrikovaných dílů, vybudovaných v padesátých až devadesátých letech

---

<sup>1</sup> V ČR je nejčastěji používán pojem recyklované betonové kamenivo neboli betonový recyklát (z angl. RCA, recycled concrete aggregate). Beton, který alespoň zčásti obsahuje recyklované kamenivo je pak nazýván beton z recyklovaného kameniva (z angl. RAC, recycled aggregate concrete), někdy též recyklovaný beton.

20. století v mnoha evropských zemích, zejména v zemích bývalého východního bloku (bývalého Československa, Polska, Rumunska, Ukrajiny atd.). Tento typ budov lze však v nemalé míře nelézt také v některých zemích severní (Finsko, Švédsko, Estonsko atd.), západní (Německo, Nizozemsko, Spojené království, Francie atd.) a jižní (Španělsko, Itálie, bývalá Jugoslávie, Bulharsko atd.) Evropy. Panelové budovy se nacházejí v pokročilém stadiu své životnosti a naskytá se otázka vhodného stanovení způsobu jejich dalšího využití v následujících dvaceti až padesáti letech. Kromě rozsáhlých rekonstrukcí a revitalizací, které v současné době intenzivně probíhají, se tyto budovy začínají rovněž odstraňovat. Ačkoliv v centrální Evropě se panelové domy odstraňují velmi zřídka, předpokladem je, že kvantita bude narůstat po vzoru zkušeností ze západní Evropy. Důvodem jsou především nevyhovující komfortní požadavky, a tudíž snížená poptávka po tomto typu bydlení, ale také nedostatky konstrukční, tepelně izolační, hygienické, bezpečnostní a mnohé jiné. Mnoho z prefabrikovaných budov rovněž nevyhovuje současným legislativním standardům. Existují také oblasti, kde jsou prefabrikované panelové budovy neobydlené, více či méně vážně poškozené (Cziesielski 2001; Ligęza 2015), nebo byly v průběhu času rozebrány a staly se tzv. „brownfields“<sup>2</sup> (Henková et al. 2012).

Kromě identifikace zdroje materiálu je možné výrazně optimalizovat rovněž konstrukční návrh (Kravanja et al. 2017), konstrukční procesy (Cajzek a Klanšek 2019; Venkrbec et al. 2018), nebo optimalizovat výběr dodavatelů materiálu (Venkrbec a Klanšek 2017). Existují tedy vhodné metody k vylepšení procesů, které ovlivní konkrétní výrobu jak z ekonomického, tak z environmentálního hlediska. Stavební produkce se od ostatního průmyslu vyznačuje především decentralizovanou výrobou, to znamená různou polohou zdrojů neboli produkčních center (továrny a výrobní základních materiálů), výrobních center (přeměna základních materiálů na stavební výrobky) a finálních spotřebišť, tedy stavenišť (implementace stavebních výrobků do realizovaného objektu). V procesu stavebně technologického plánování výstavby představuje proto logistika dopravy materiálu jednu ze základních a nezbytných činností plánování. V rámci logistiky je výhodné dobře pochopit logistické řetězce, kterými můžeme realitu

---

<sup>2</sup> Brownfields jsou lokality a nemovitosti, které byly ovlivněny původním využíváním, jsou opuštěné nebo nedostatečně využívané, mohou mít skutečné nebo vnímané problémy s kontaminací. Jsou hlavně ve vyspělých městských oblastech a vyžadují zásahy, které by je vrátily k prospěšnému využití (European Commission 2018b). Může se jednat o nemovitosti, které jsou pozůstatky po průmyslových, zemědělských, rezidenčních, vojenských či jiných aktivitách (Ministerstvo průmyslu a obchodu et al. 2019).

dopravních problému vyjádřit. Logistické řetězce je možné chápat jako dynamické sítě nezávislých produkčních center, které mohou uspokojit požadavky finálních spotřebitelů. Problematiku dodavatelských řetězců pak lze interpretovat jako množinu komplexních a vzájemně závislých kombinačních problémů, jako je získávání surovin, plánování výrobních zařízení nebo pohybu (trasování) dopravních prostředků (Viswanadham 2002).

V minulosti bylo prezentováno mnoho vědeckých a odborných studií, které se zabývaly dodavatelskými řetězci a dopravními problémy. V této práci je zpracována rešerše těchto přístupů s cílem vytvořit vhodný algoritmus, který bude schopen efektivně vybrat optimálního dodavatele betonové směsi. Snahou této práce je při hledání takového algoritmu propojit tři odborné oblasti stavebního sektoru: materiálový výzkum z oblasti recyklovaných betonů, digitalizace stavebnictví v podobě využití informačního managementu budov – BIM a matematické optimalizační techniky pro vytvoření algoritmu.

Jestliže byl výše již uveden motivační úvod pro první oblast recyklovaných betonů, nyní je vhodné uvést kontextualizaci s druhou oblastí – metodikou BIM. Digitalizace stavebnictví je nezpochybnitelným směrem vývoje stavebního průmyslu, ve kterém představuje metoda BIM klíčový prostředek. V něm hraje významnou roli tzv. digitální dvojče stavby, tedy model, ve kterém kromě geometrie jsou definovány i negrafické informace o řešeném stavebním objektu. Nabízí se zde využití těchto vhodně strukturovaných informací pro celkovou optimalizaci nasazene recyklace. Pro nalezení jakéhokoliv optima je nutno nejprve vyvinout optimalizační algoritmus, a především shromáždit pro výpočet korektní a úplná data. BIM model taková data může poskytnout a propojení přístupu BIM s optimalizačními analytickými nástroji může významně pomoci racionálně zefektivnit výstavbové procesy, v tomto případě rozhodovací procesy dodavatelů recyklovaných betonů a umožnit komparaci s dodávkou konvenčních betonů, vyrobených z přírodních zdrojů.

Optimalizační metody, třetí oblast, které se práce věnuje, mohou poskytnout nalezení nejvýhodnější varianty dle zadaných kritérií. Z pohledu environmentálního posouzení je však vhodné negenerovat pouze jedno optimální řešení, ale mít možnost posoudit i další sub-optimální varianty v pořadí. Z tohoto důvodu byla aplikována optimalizace diskrétní s možností uceleného pohledu na dosažené výsledky s možností výběru optima uživatelem z portfolia výsledků dle důrazu na ekonomický či environmentální faktor.



## 2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Východiskem pro zpracování zadaného tématu byla komplexní rešerše výzkumných a odborných příspěvků, která byla rozdělena do **čtyř základních tematických celků**:

- kamenivo z betonového recyklátu jako náhrada přírodního kameniva do konstrukčního betonu,
- problematika využití betonů z prefabrikovaných panelových budov,
- informační management budov (BIM) v kontextu využití informací o materiálech,
- optimalizační metody ve stavebním managementu.

Publikační zdroje pro vypracování rešerše byly vyhledávány pomocí univerzitních placených přístupů (Ústřední knihovna VUT v Brně 2020) bibliografických a faktografických databází Scopus a Web of Science a plné tituly následně získány z plnotextových databází, kromě jiných, především ASTM Complete, EBSCO, Emerald, ICE Virtual Library, IEEE Xplore Digital Library, IOPscience, Nature, ProQuest Central, SAGE Journals, Science Direct, Scientific.Net, SpringerLink, Taylor & Francis – Science & Technology Library a Wiley Online Library.

Dále byly využity elektronické knižní databáze a originální tištěné verze knih renomovaných vydavatelů odborných a vědeckých titulů, kromě jiných, především Cambridge University Press, EBSCO, Elsevier, Emerald, ICE Publishing, IOPscience, Proquest Ebook Central, Springer, Taylor & Francis a Wiley.

Byl kladen důraz na nejvíce citované příspěvky, tedy zdroje v daném oboru nejvíce přínosné a relevantní. V případě odkazování se na zásadní zdroje (typu původní metody, zásadní poznatky a myšlenky) byly citovány původní zdroje bez ohledu na rok vydání. V ostatních případech byly citovány, pokud možno, zdroje časově nejaktuálnější.

## 2.1. KAMENIVO Z BETONOVÉHO RECYKLÁTU JAKO NÁHRADA PŘÍRODNÍHO KAMENIVA DO KONSTRUKČNÍHO BETONU

V Evropě se každý rok vyprodukuje 2,500 miliardy tun odpadu, z toho je cca 924 milionů tun stavební a demoliční odpad (SDO) (Eurostat 2019). USA produkují zhruba 569 milionů tun SDO (EPA 2019) a Japonsko zhruba 82 milionů tun SDO (MOE 2018). Vzhledem k tomu, že Čína a Indie v současnosti generují více než 50 % globálního objemu výroby betonu, jejich produkce SDO bude rovněž významná a společně s rozvojem těchto zemí bude dále nabývat (WBCSD 2009). Vize Evropské unie pro oběžnou ekonomiku je odklonit se od lineárních procesů a zaměřit se na dosažení takové ekonomiky, v níž bude hodnota zdrojů, materiálů a produktů co nejdéle udržována (European Commission 2015; 2016c). Proto je žádoucí, aby ve dlejší produkty, vytvořené během výroby, opakovaně použitelné produkty a materiály po skončení životnosti již nebyly považovány za odpad, ale spíše za cenné zdroje, které mají být vráceny do výrobního procesu (Stahel 2016). V této souvislosti je jedním z cílů členských států EU recyklovat alespoň 70 % SDO před rokem 2020 (European Commission 2011). Protože většina budov obsahuje velké množství betonu, ve kterém až 70–80% objemu je složeno z kameniva (Rao et al. 2019b), může recyklace tohoto materiálu významnou měrou přispět ke snížení SDO a také ke snížení poptávky po těžbě přírodních zdrojů.

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, původně určených k likvidaci či skládkování. Použití recyklovaného kameniva pro směsi nových betonů vyžaduje ověření a zkoušení geometrických, mechanických a fyzikálních vlastností dle platných norem<sup>3</sup> (Bravo et al. 2015). 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 (Rojík et al. 1974). Demolice panelových budov jsou v dnešní době ojedinělé. Lze však předpokládat, že v budoucnu dojde k nárůstu počtu demolic těchto budov

---

<sup>3</sup> EN 12 620 + A1: Kamenivo do betonu, ČSN EN 932-1: Zkoušení všeobecných vlastností kameniva – Část 1: Metody odběru vzorků a další

a obecně také k nárůstu množství efektivního využití stavebních a demoličních odpadů obecně (Bosch-Sijtsema a Buser 2017). Množství demolic je kromě jiného dáno také legislativními požadavky, které mohou v pozitivním smyslu ovlivňovat recyklační příležitosti (Cohen et al. 2003).

Podrobná rešeršní činnost z oblasti recyklace materiálů je nutným základním předpokladem k pochopení procesů materiálové obnovy. Následující kapitoly proto uchopují posuzování životního cyklu stavebních materiálů, rozebírají požadované vlastnosti a charakteristiky materiálového zdroje pro recyklaci, shrnují kritéria pro využití recyklovaného kameniva. Rovněž je uvedena kontinuita na rámec udržitelného rozvoje v kontextu světové, evropské i lokální úrovně. Dále je v kapitolách uveden souhrn předchozích výzkumů s návazností na charakteristiky kameniva do betonu, současný stav poznání v oblasti technologie přípravy kameniva a dosud využívaných přístupů k návrhu receptur betonů a vybrané parametry, ovlivňující vlastnosti recyklovaného betonu.

### **2.1.1. Globální kontext udržitelnosti a recyklací**

#### **Mezinárodní iniciativy pro udržitelnost**

Globální cíle udržitelnosti (celkem 17 cílů) jsou dány tzv. Agendou 2030, která byla na summitu OSN přijata v roce 2015. Vývoj této iniciativy sahá do roku 2010, kdy bylo v souhrnném reportu zmíněno, že rychlý hospodářský růst, měnící se postoje k životnímu stylu, neudržitelná spotřeba a rychlá urbanizace v mnoha částech světa vedly k výraznému nárůstu spotřeby surovin a přírodních zdrojů a k nárůstu objemů různorodých odpadů. Účinné nakládání s odpady se stalo kritickým tématem v boji proti chudobě a dosažení mezinárodně dohodnutých rozvojových cílů může být dosaženo jen za efektivního nakládání s odpady (United Nations 2010).

Komise pro udržitelný rozvoj<sup>4</sup> stanovila jako cyklus implementace období 2012 až 2022. Každoročně publikuje reporty implementace udržitelného rozvoje v jednotlivých kategoriích (United Nations 2019a). V roce 2019 byl na mezinárodním fóru publikován dokument plnění

---

<sup>4</sup> Commission on Sustainable Development (zkráceně CSD), volně přeloženo.

---

jednotlivých bodů udržitelné spotřeby, ve kterém je konkludováno, že navzdory zřejmému pokroku v oblasti tvorby politik, znalostních zdrojů a technických nástrojů je jejich aplikace a realizace na podporu konkrétních a hmatatelných změn v praktikách a dopadech udržitelnosti i nadále omezená (United Nations 2019b). V prosinci 2016 světové organizace CIB<sup>5</sup>, iiSBE<sup>6</sup>, UNEP-SBCI<sup>7</sup>, FIDIC<sup>8</sup> a Global ABC<sup>9</sup>, které jsou hlavními iniciativami a sponzory v oblasti udržitelného rozvoje, vydaly prohlášení o zájmu pořádat několik globálních konferencí a diskuzí na téma udržitelné výstavby SBE20<sup>10</sup> (CIB 2017). Iniciativy kladou důraz na programové návrhy konferencí SBE20 v následujících oblastech (CIB 2016):

- relevantní předpisy, programy a normy,
- efektivita zdrojů na úrovni měst a budov,
- inovace materiálů, výrobků a systémů,
- ekologicky šetrné materiály a výrobky a udržitelné využívání materiálů,
- metody, nástroje a certifikace,
- modernizace a modernizace budov a infrastruktury,
- integrace obnovitelné energie v budovách a malých městech,

---

<sup>5</sup> CIB – z angl. International Council for Research and Inovaton in Builidng and Construction, zkratka CIB z franc. "Conseil International du Batiment" volně přeloženo Mezinárodní rada pro výstavbu. CIB byla založena 1953 za podpory OSN a sdružuje oblasti výzkumu, průmyslu a vzdělávání, vládní instituce, iniciuje projekty. CIB vydává aktuální publikace mezinárodních vědeckých a technických analýz.

<sup>6</sup> iiSBE – zkrat. z angl. International Initiative for a Sustainable Build Environment, volně přeloženo Mezinárodní iniciativa pro udržitelnou výstavbu. Jedná se o mezinárodní neziskovou organizaci, která aktivně podporuje přijímání politik, metod a nástrojů pro celosvětově udržitelné prostředí. Vyvinula nástroj SBTool pro certifikaci kvality budov.

<sup>7</sup> UNEP-SBCI – z angl. United Nations Environment Programme – Suistainable Building and Climate Initiative, volně přeloženo Program spojených národů pro životní prostředí – iniciativa pro udržitelné budovy a klima. Sdružuje mezinárodní soukromý a veřejný sektor. Jejím cílem je dosáhnout všeobecného přijetí postupů pro efektivní využívání zdrojů a energetické účinnosti budov.

<sup>8</sup> FIDIC – z franc. Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils neboli angl. International Federation of Consulting Engineers je Mezinárodní federace konzultačních inženýrů, založená v roce 1913 za účelem realizací strategických cílů konzultačního inženýrství. FIDIC rovněž publikuje dokumenty v oblasti podnikatelských procesech a systémů řízení.

<sup>9</sup> Global ABC (zkráceně GABC) – z angl. Global Alliance for Buildings and Construction, volně přeloženo jako globální aliance pro budovy a výstavbu. Je to iniciativa, založená s cílem posílit opatření v oblasti globálního klimatu, snížit uhlíkové emise a rozvinout udržitelnou a efektivní energii a budovy. Založena na základě Pařížské dohody OSN (podepsána 195 stranami 22.4.2016) s cílem udržení nárůstu globální průměrné teploty výrazně pod hranicí 2 °C.

<sup>10</sup> SBE20 – z angl. International Conference on Sustainable Built Environment in 2020, volně přeloženo jako Mezinárodní konference udržitelné výstavby 2020.



- problémy spojené s nulovými a téměř nulovými provozními emisemi a emisemi životního cyklu,
- přístupy k zefektivnění nákladů, financování a zdanění,
- ekonomické a sociální externality,
- školení a vzdělávání s cílem podpořit přijetí udržitelných přístupů.

Z výše uvedených témat předních světových iniciativ může být recyklace považována za reálné naplnění úsilí o udržitelném využívání zdrojů a podstatnou složkou trvale udržitelné výstavby. Rovněž má využití recyklovaných materiálů pozitivní vliv na hodnocení a certifikace budov z hlediska environmentálních a udržitelných hledisek standardů BREAM<sup>11</sup> (Building Research Establishment Ltd 2019), LEED<sup>12</sup> (U.S. Green Building Council 2019) nebo SBTool<sup>13</sup> (SBToolCZ 2019).

### **Globální směřování k recyklaci**

Globálními organizacemi, které se věnují recyklacím širokého spektra materiálů, jsou BIR<sup>14</sup> nebo NWRA<sup>15</sup>. Mezinárodní organizace, zaměřené přímo na recyklaci stavebního odpadu nebo konkrétně recyklaci betonu, nebyly v rámci rešerše nalezeny. Existuje však organizace CSI<sup>16</sup>, která je sektorovým projektem iniciativy WBCSD<sup>17</sup>. Tento globální projekt sdružuje 24 hlavních výrobců cementu, kteří produkují cement ve více než 100 zemích světa, což pokrývá asi 30 % světové produkce cementu. CSI publikovala v roce 2009 dosud poslední zprávu s názvem „Recyklování betonu“, ve které zmiňuje principy udržitelnosti, důvody proč

---

<sup>11</sup> z angl. Building Research Establishment Environmental Assessment Method (zkráceně BREAM), volně přeloženo jako Environmentální posuzovací metoda budov. Jde o mezinárodně nejrozšířenější standard certifikace energeticky šetrných a udržitelných budov.

<sup>12</sup> z angl. Leadership in Energy and Environmental Design (zkráceně LEED), volně přeloženo jako Vedení v oblasti energetického a environmentálního navrhování. Jedná se o mezinárodně uznávaný standard navrhování a výstavby energeticky šetrných a udržitelných budov, původně vyvinut Americkou radou pro šetrné budovy.

<sup>13</sup> SBTool, v České republice SBToolCZ, je multikriteriální nástroj pro hodnocení a certifikaci budov z hlediska principů udržitelné výstavby, vyvinutý organizací iiSBE.

<sup>14</sup> z angl. Bureau of International Recycling (BIR), volně přeloženo jako Mezinárodní úřad pro recyklaci

<sup>15</sup> z angl. National Waste & Recycling Association, volně přeloženo jako Národní asociace pro odpady a recyklaci. Tato organizace sdružuje především státy USA.

<sup>16</sup> z angl. Cement Sustainability Initiative (zkráceně CSI), volně přeloženo jako Iniciativa pro udržitelnost cementu.

<sup>17</sup> z angl. World Business Council for Sustainable Development (zkráceně WBCSD), volně přeloženo jako Světová podnikatelská rada pro udržitelný rozvoj.

recyklovat beton, doporučuje postupy a způsoby recyklací a prezentuje pilotní projekty (WBCSD 2009).

Dle organizace WRAP<sup>18</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. Kromě toho je třeba uvažovat o nejvýznamnějších příležitostech ke zvýšení hodnoty materiálů pocházejících z recyklovaného a opětovně použitého obsahu, například využití deseti nejlepších výsledků Rychlého zlepšení<sup>19</sup> nebo obdobného ekvivalentu. Dále je potřeba zavést osvědčené postupy především tam, kde je to technicky a komerčně životaschopné." (WRAP 2008)*

## 2.1.2. Evropský kontext udržitelnosti a recyklací

### Evropa a Agenda 2030

Významný vliv na strategické oblasti udržitelnosti pro své členské státy má Evropská komise, která spravuje tzv. Agendu 2030. Jedná se o rozvojový program, který byl přijat valným shromážděním na summitu OSN o udržitelném rozvoji v New Yorku v roce 2015. Finální dokument Přeměna našeho světa: Agenda 2030 pro udržitelný rozvoj definuje hlavních 17 cílů. Jedním z cílů je zajištění udržitelné výroby a spotřeby (United Nations 2015). Na konci roku 2016 vydala komise dokument pro další kroky pro udržitelnou budoucnost Evropy<sup>20</sup> (European Commission 2016b) a klíčové evropské opatření na podporu Agendy 2030 a cílů udržitelného rozvoje<sup>21</sup> (European Commission 2016a). Zajištění udržitelné spotřeby a produkce je smyslem environmentálního akčního programu komise, který stanovuje udržitelně využívat a chránit přírodní zdroje. Tento rámec přijala také Česká republika.

---

<sup>18</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.

<sup>19</sup> Rychlá vítězství nebo také Rychlá zlepšení, z angl. Quick Wins, je etapa řízení změnového managementu s cílem poskytnout rychlou zpětnou vazbu. Jako Quick Wins jsou zvolena taková opatření, která jsou přínosem ihned po začátku projektu.

<sup>20</sup> Next steps for a sustainable European future, volně přeloženo Další kroky pro udržitelnou budoucnost Evropy.

<sup>21</sup> Key European action supporting the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals, volně přeloženo Klíčový evropský akční plán podporující Agendu 2030 a cíle udržitelného rozvoje.

---

## Evropská strategie udržitelného využívání přírodních zdrojů

Na evropské úrovni působí v rámci Evropského hospodářského prostoru<sup>22</sup> agentura EEA<sup>23</sup>, která vydala roční zprávu sedmého akčního programu EU pro životní prostředí pro rok 2018. Hlavními prioritami tohoto akčního programu jsou (EEA 2018):

- chránit, zachovat a zvýšit přírodní kapitál Unie,
- přeměnit Unii na úsporné, ekologické a konkurenceschopné nízkouhlíkové hospodářství,
- ochránit občany Unie před tlaky souvisejícími s životním prostředím a riziky pro lidské zdraví a pohodu.

Akční plán oběhové ekonomiky<sup>24</sup> Evropské unie rozlišuje tyto prioritní sektory (European Commission 2015):

- plasty,
- biomasa a produkty na bázi bioplynu,
- stavební a demoliční odpady,
- kritické suroviny,
- potravinový hodnotový řetězec.

Pro zlepšení stavu v oblasti SOD vypracovala evropská komise opatření, a především dokumenty pro předdemoliční pokyny a protokol o nakládání se stavebními a demoličními odpady. V protokolu se uvádí, že před jakýmkoliv projektem rekonstrukce či demolice musí být proveden předdemoliční audit (někdy též audit nakládání s odpady), který pomůže identifikovat vznik těchto odpadů a na základě něj provést řádnou dekonstrukci objektu (European Commission 2018a; Spišáková et al. 2021). Na Evropský protokol o nakládání s odpady (platný pro všechny členské státy) navazují normativní dokumenty a metodické návody základních postupů jednotlivých států, ve kterých se např. Švédsko, Rakousko apod. shodují (Österreichisches Normungsinstitut 2014; The Swedish Construction Federation 2015):

---

<sup>22</sup> zkráceně EHP, z angl. European Economic Area (zkráceně EEA). Pozn.: Často se zkratka plete s European Environment Agency (rovněž EEA).

<sup>23</sup> z angl. European Environment Agency (zkráceně EEA), volně přeloženo jako Evropská agentura pro životní prostředí.

<sup>24</sup> Oběhová ekonomika / oběhové hospodářství je způsob výroby a spotřeby, který díky sdílení, pronajímání, opětovnému používání, opravování, repasování nebo recyklaci zhodnocuje již existující výrobky, suroviny a materiály.

- předdemoliční audit (Pre-demolition Audit),
- plán pro nakládání s odpady (Waste Management Plan),
- provedení demolice,
- závěrečná zpráva.

Aktivní Evropskou iniciativou s celosvětovým přesahem pro oblast kameniva je asociace UEPG<sup>25</sup>, která vydala řadu publikací a dokumentů. Ve své výroční publikaci let 2017 až 2018, popisuje několik klíčových hodnot, z nichž související s problematikou jsou:

- rozvíjet oběhovou ekonomiku prostřednictvím efektivního využívání zdrojů, recyklace a obnovy míst těžby, prokázat přínos kameniva pro oběhové hospodářství<sup>24</sup>,
- podporovat slučitelnost těžby kameniva s životním prostředím s cílem pomoci jeho členům při dosahování odpovědného těžby kameniva a řešit automaticky zákazy z ekologických důvodů (UPEG 2017).

### **2.1.3. Lokální kontext udržitelnosti a recyklací**

Český legislativní rámec pro odpady<sup>26</sup>, stejně jako dokumenty Ministerstva životního prostředí ČR (dále jen MŽP)<sup>27</sup>, které navazují na článek 4, směrnice Evropského parlamentu a Rady<sup>28</sup> reflektují hierarchii nakládání s odpady jakožto východisko prevence vzniku stavebních odpadů (Parlament ČR 2001; European Parliament and Council 2008; Ministerstvo životního prostředí 2017a; 2018):

- prevence,
- přípravy k opětovnému použití,
- recyklace,
- jiné využití, např. energetické,
- likvidace.

---

<sup>25</sup> z franc. Union Européenne des Producteurs de Granulats (zkráceně UPEG), anglicky European Aggregates Association, volně přeloženo jako Evropská asociace producentů kameniva.

<sup>26</sup> zejména Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů.

<sup>27</sup> dokument MŽP Průvodce předcházením vzniku stavebních odpadů

<sup>28</sup> směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008, o odpadech a o zrušení některých směrnic.

---

Z posledních statistik ČSÚ<sup>29</sup> za rok 2017, který je harmonizován s daty Eurostatu<sup>30</sup> vyplývá, že bylo v rámci ČR vyprodukováno 8,987 milionu tun SDO, z toho 81 tis. tun nebezpečného. Tendence v posledních 7 letech jsou s výjimkou roku 2017 vzrůstající. Doporučením MŽP je přechod na oběhové odpadové hospodářství, tzn. podpora opětovného využití odpadů a recyklace namísto těžby nerostných surovin (Český statistický úřad 2019a; Ministerstvo životního prostředí 2017c).

Na národní úrovni funguje společnost Česká podnikatelská rada pro udržitelný rozvoj (CBCSD), která je členem WBCSD. CBCSD vydala Vizi 2050 České republiky, ve které rozvíjí pilíř "Přírodní zdroje a rozvoj území" jako prosazování konverze průmyslu na udržitelný model hospodaření (CBCSD 2015). V oblasti recyklací aktivně působí Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice (ARSM 2019), která vzdělává v principech recyklace cihelných, betonových a asfaltových materiálů.

#### **2.1.4. Recyklační proces budov**

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. Proto je vhodné zamyslet se nad celoživotním cyklem recyklovaného materiálu a exaktně stanovit a vyhodnotit, zdali má recyklace smysl a je opravdu efektivní. Výhodnost demolice budovy je možné posoudit z hlediska technicko-ekonomického nebo z pohledu produkce různých emisí (např. NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> aj.) (Jung et al. 2015).

#### **Východiska pro recyklaci**

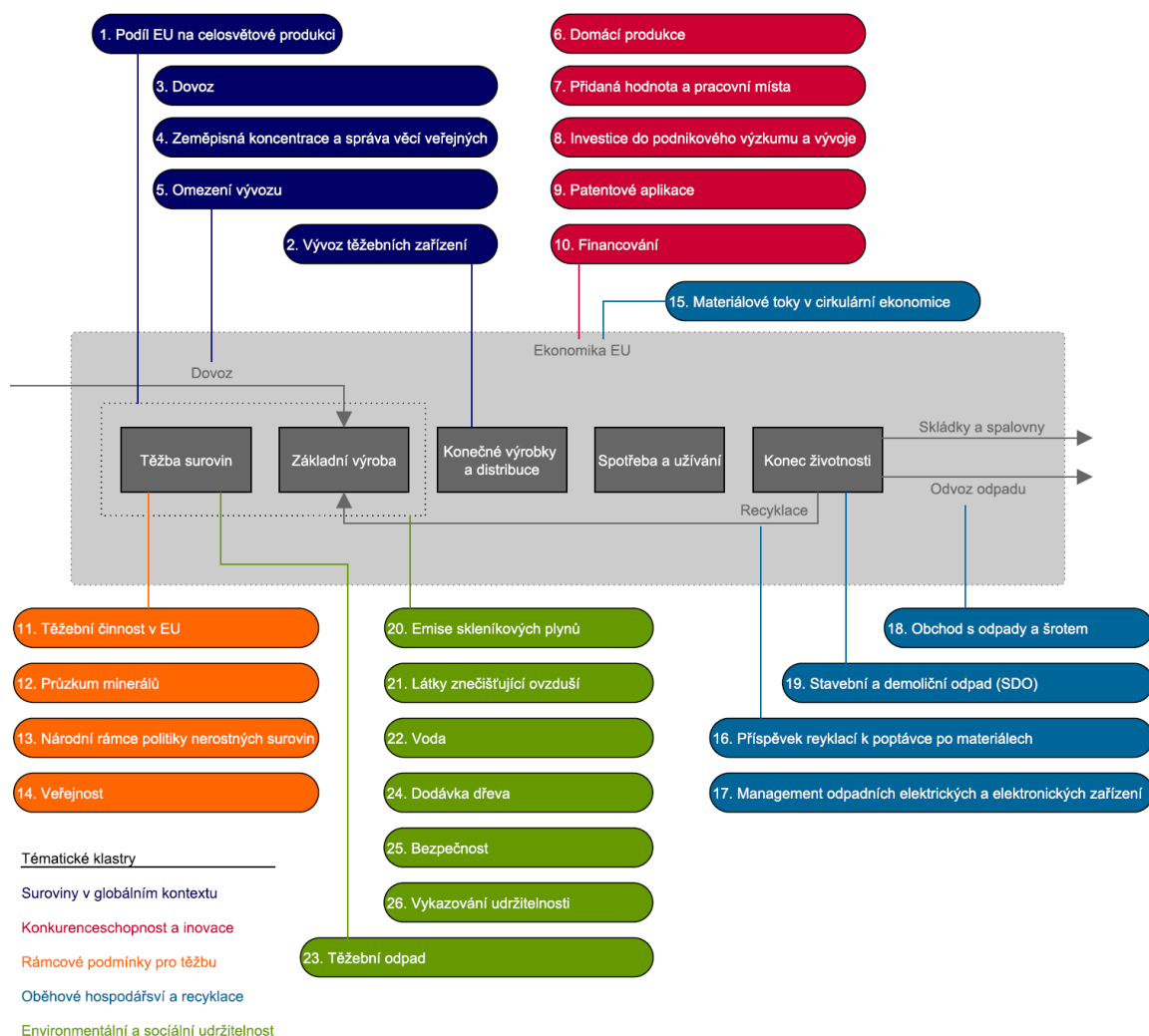
Prvním krokem před samotnou recyklací je rozhodnutí, zdali je materiál odpad, nebo se jedná o recyklovatelný vedlejší produkt. Pomocí rozhodovacího stromu na Obr. 2, který definovala Evropská komise a převzal jej také britský WRAP<sup>18</sup>, lze tento krok vyhodnotit (European Commission 2007; WRAP 2008). Evropská unie dále prezentovala surovinový přehled roku 2018, která je základním kamenem pro surovinovou znalostní bázi EU. Je vydávána každé dva roky. Z Obr. 1 je patrný proces recyklace a jeho kontext v celém životním cyklu

---

<sup>29</sup> Český statistický úřad (ČSÚ), k datu 31.12.2018 disponuje daty za rok 2017.

<sup>30</sup> Eurostat k datu 31.12.2018 disponuje pouze daty za rok 2016 (tabulka Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity)

daného materiálu, včetně návazností na další oblasti (tzv. tematické klastry) (European Commission 2018d).

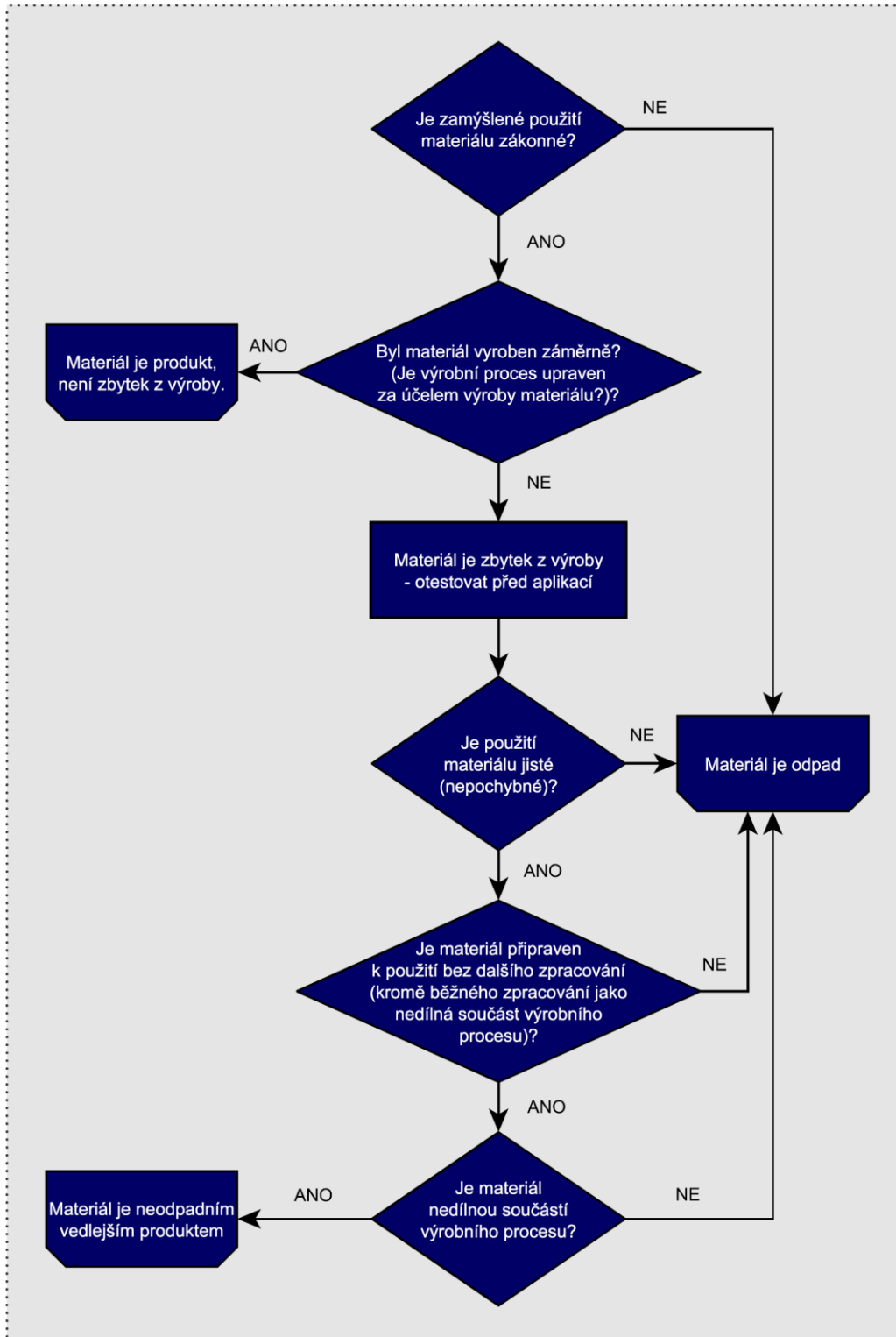


Obr. 1 Surovinový přehled EU, upraveno dle (European Commission 2018d)

Recyklované kamenivo může snadno splňovat předepsané požadavky na kamenivo do konstrukčního betonu, avšak objem využití recyklátu je velmi ovlivněn jeho vlastnostmi. Recyklace betonu je zatížena také tzv. downcyclingem<sup>31</sup> (Kay 1994), kdy nevyužití celého objemu recyklovaného materiálu způsobuje ztrátu v objemu recyklace. U betonu je to typické nevyužití nejjemnější frakce kameniva o velikosti zrna 0 až 4 mm z důvodu nepříznivých vlastností, především nasákavosti. Některé studie ukázaly, že downcycling se oproti plné recyklaci

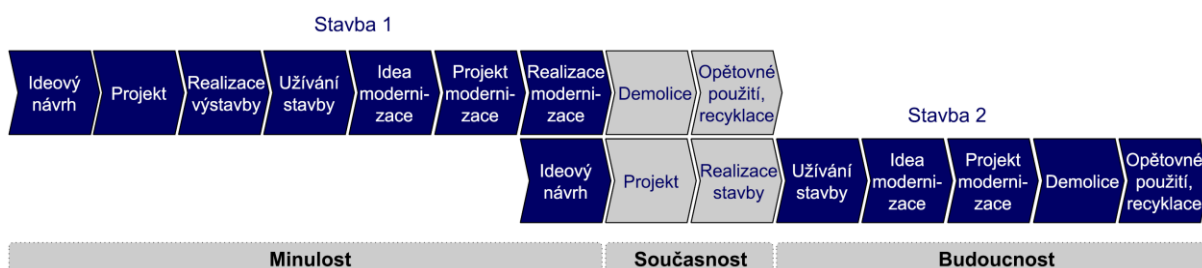
<sup>31</sup> Z angl. downcycling. Termín pro opětovné zpracování materiálu, avšak neplnohodnotným způsobem oproti typické recyklaci. Toto zpracování se vyznačuje nízkým počtem cyklů recyklací daného materiálu.

ekonomicky vyplatí jen minimálně a rentabilita je při downcyclingu velmi omezená (Weimann et al. 2003; Di Maria et al. 2018).



Obr. 2 Diagram pro rozhodování o odpadu versus vedlejším produktu (European Commission 2007)

U betonu je však nutno respektovat především konstrukční požadavky. To mělo za následek využití recyklovaných betonů pouze v betonech nižších pevností, případně v konstrukčních hutněných vrstvách vozovek. Z Obr. 3 je patrné propojení dvou stavebních záměrů v kontextu recyklace a jejího plánování.



**Obr. 3** Příklad znázornění vzniku odpadů na začátku a konci životnosti stavby (Ministerstvo životního prostředí 2017a)

Klíčovými přínosy recyklace betonu jsou (WBCSD 2009):

- redukce množství odpadů, snížení těžby půdy a s tím spojené degradace místa těžby,
- náhrada původních přírodních zdrojů a snížení související environmentální zátěže,
- snížené náklady na dopravu: beton lze často recyklovat v místě demolice nebo na staveništích v blízkosti městských aglomerací, kde bude materiál znovu využit,
- snížené náklady na likvidaci, tzn. eliminace poplatků za uložení materiálu na skládky,
- využití příznivých charakteristik některých recyklátů, kterými může být dobrá zhutnitelnost nebo vhodná objemová hmotnost (například pro podloží zpevněných ploch),
- v některých případech vznik pracovních příležitostí v odvětví recyklací, které by za opačných okolností nevznikly.

Komplikace, které mohou ovlivnit nasazení a využívání recyklací (WBCSD 2009):

- nízká cena přírodního kameniva v některých zemích,
- nepravidelná dodávka SDO, jakožto vstupní zdroj pro recyklované kamenivo,
- nutnost aplikovat recyklační plány na staveništích včetně třídících postupů,
- vysoce kvalitní beton může zvýšit náklady na jeho demolici a separaci,
- mylné představy veřejnosti, že beton získaný recyklací je nižší kvality, respektive nové materiály jsou vnímány jako lepší kvality,
- klasifikace recyklovaného betonu jako odpad může zvýšit požadavky na plnění legislativních požadavků, jako jsou evidence, hlášení a povolení,



- posouzení z hlediska environmentální zátěží v místě recyklace (hluk, prašnost, spotřeba energie),
- zvážení limitních fyzikálních vlastností recyklovaného kameniva pro použití pro některé typy betonů (např. vysokohodnotné betony apod.).

Způsoby, jak lze recyklovaný beton využít definuje CSI<sup>32</sup> následovně (WBCSD 2009):

- Využití jako kamenivo:
  - využití jako hrubé kamenivo pro hutněné konstrukční vrstvy (nestmelené směsi),
  - využití jako hrubé kamenivo do betonu (stmelené směsi),
  - využití jako jemné kamenivo do betonu (stmelené směsi).
- Využití betonu v původní formě:
  - betonové bloky v původní velikosti,
  - betonové bloky řezané na menší části.

### **Demoliční techniky a přístupy**

Před samotným provedením demolice je vhodné provést podrobnou rekognoskaci objektu a přilehlého prostředí. Podrobnost takového průzkumu souvisí se studiem problematiky způsobu podepření jednotlivých konstrukcí a jejich stav. Způsob, jakým jsou distribuovány vlivy zatížení mezi různými konstrukčními částmi objektu, vstupují do rozhodování o vhodném způsobu demolice a příslušných etapových fází (Chakradhara et al. 2019). Volba demoliční metody závisí na konkrétních okrajových podmínkách projektu, omezeních na daném místě, citlivosti sousedství a dostupnosti zařízení (Buildings Department 2004). Pořadí, v kterém bude budova nebo konstrukce demolována, může mít rozhodující vliv pro zdraví a bezpečnost pracovníků a široké veřejnosti (Safe Work Australia 2016).

Demoliční techniky a příslušné prostředky je možné dle Chakradhary rozdělit na (Chakradhara et al. 2019):

#### a) Neinženýrský přístup

a.1.) Manuální demolice (ručního náradí: kladiva, bourací kladiva a vrtáky).

---

<sup>32</sup> z angl. Cement Sustainability Initiative (zkráceně CSI), volně přeloženo jako Iniciativa pro udržitelnost cementu.

## b) Inženýrský přístup

### b.1.) Mechanické metody

- demoliční koule (zavěšená ocelová koule se zařízením proti otáčení),
- hydraulické nůžky (drcení hydraulickými nůžkami nebo tlakové porušení),
- termální metody (vrtání a tepelné řezání pomocí hořáků, laserů nebo plazmy, odstranění betonu tavením ocelových výztuží, odstranění povrchu betonu přímým ohřevem),
- neexplosivní demolice (tlakové rozrušení pomocí vývrtů a mechanických válců nebo rozrušení pomocí expandující kaše),
- abrazivní tlakovzdušné procesy (tryskání abrazivem z velmi tvrdých materiálů),
- řízené zřícení (podseknutí, shození tlakem, podřezání lanem),
- tlakové tryskání (vodní tlakové vymývání materiálu, např. betonu z výztuže).

b.2.) Imploze a exploze (využití výbušnin a zborcení do vlastního objemu či do okolí).

b.3.) Dekonstrukční metody (systematická pečlivá ruční demontáž).

c) Top-down demolice (sekvenční demolice s postupem od shora dolů a jasně definovanými prostředky).

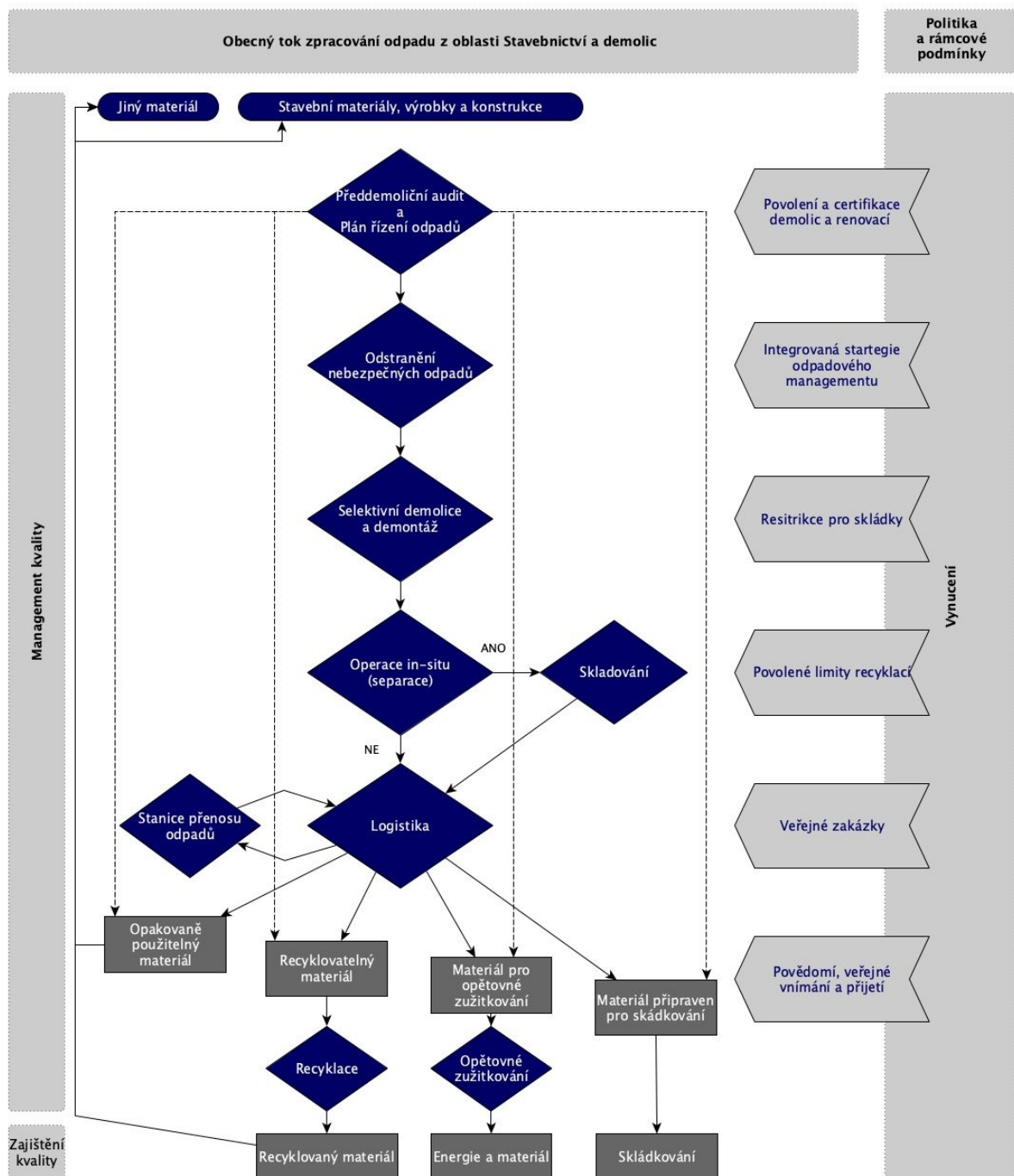
Aby bylo možné dodržet principy efektivní recyklace, tedy zabránění downcyclingu a co nejefektivnější využití daného materiálu, je nutno zpracovávat a upravovat materiál odděleně. Dekonstrukční metody demolic se tak stávají technologickými nástroji stavebních dekonstrukčních projektů. Tento typ odstranění objektu souvisí s čím dál větší nutností demontovat materiál pečlivě ručně, a tedy je tento typ demolice náročný na časovou dotaci prací. Avšak právě díky tomuto postupu lze hlavní materiálovou základnu objektu (betonové konstrukce / prvky / segmenty) separovat a přeměnit tak beton na inertní kamenivo vhodné k efektivní recyklaci. Dekonstrukce šetří nejvíce složek pro opětovné použití nebo recyklaci (Chakradhara et al. 2019).

Významný vliv na opětovné využití materiálu může mít i příprava v rámci tzv. demoličního plánu<sup>33</sup>, ve kterém je možné zohlednit následnou minimalizaci SDO, případně maximalizovat opětovné využití materiálu v dalších fázích životního cyklu budovy. Je to jakýsi odhad

---

<sup>33</sup> Ze zahraniční literatury je známo pod anglickým pojmem deconstruction project.

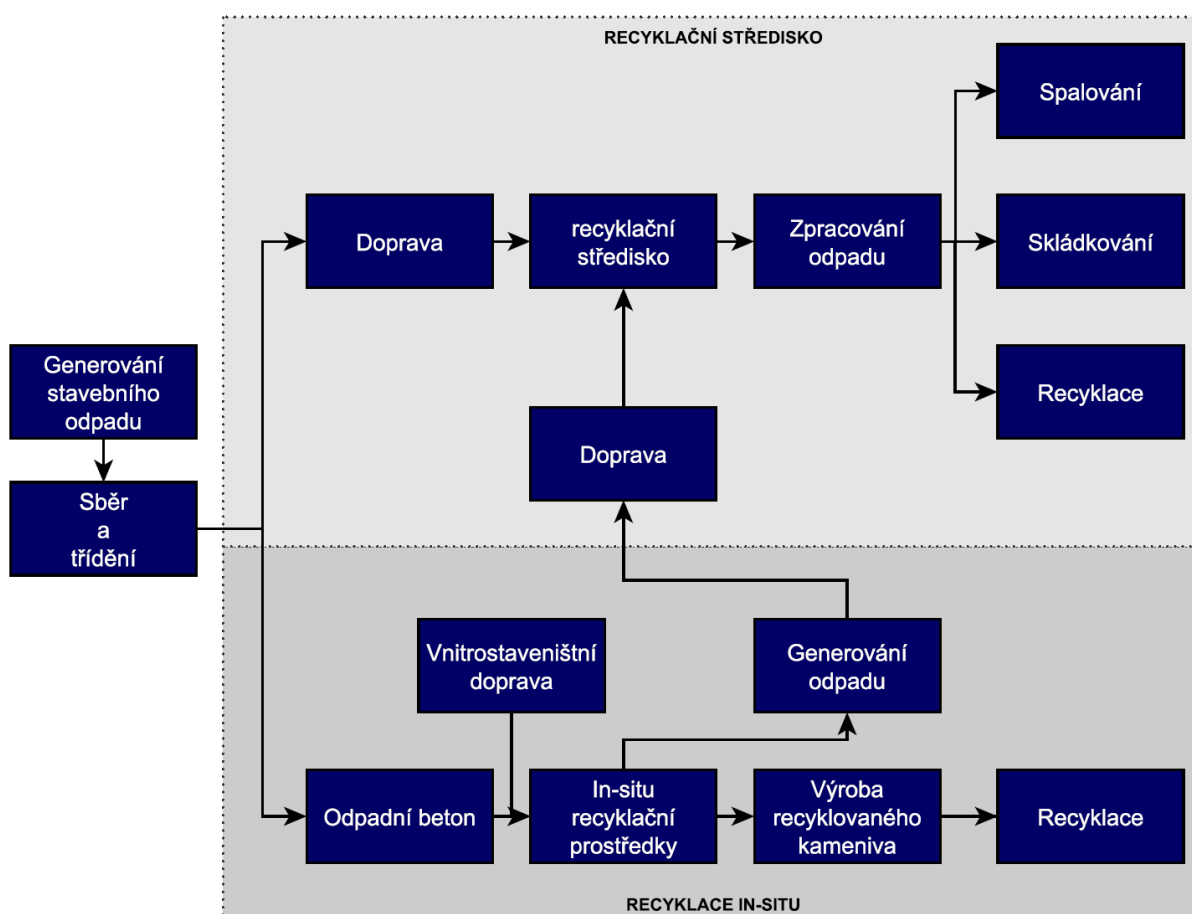
nakládání a využití objektu nebo jeho části. Minimalizace nebezpečných látek a materiálů komplikovaných pro následnou recyklaci, je základním předpokladem pro efektivní využití SDO a kvalitní recyklaci v budoucích projektech (Ministerstvo životního prostředí 2017a). Součástí takového návrhu může být i ověření potenciální kontaminace materiálů (WBCSD 2009; Ministerstvo životního prostředí 2017a).



**Obr. 4 Celkový tok zpracování stavebních a demoličních odpadů (přeloženo) (European Commission 2018a)**

V rámci české normativní a legislativní úpravy prozatím není proces demoličních plánů nijak definován, oproti zahraničním normám (Rakouské<sup>34</sup>, Německé, Švédské, Britské a další), kde jsou detaily o demoličních plánech popsány včetně doporučených postupů průběhu odstranění staveb.

Rámcově popisuje hlavní procesní toky s nakládáním SDO Evropská komise v protokolu na Obr. 4, kde je rovněž uvedeno, že toto základní schéma procesů je možné upřesnit podle stavebních a demoličních materiálů a dle konkrétní situace (European Commission 2018a).



Obr. 5 Management stavebního a demoličního odpadu (graficky upraveno a volně přeloženo) (Jung et al. 2015)

### Recyklace in-situ versus recyklační středisko

Zdánlivě přínosnou se může zdát recyklace přímo na místě demolice / dekonstrukce. Rozhodnutí, zda takto postupovat a připravit na místě podmínky pro recyklaci je nutno posoudit na

<sup>34</sup> Např. v normě ÖNORM B 3151 (GREEN Solution s.r.o., 2017).

základě kritérií environmentálních, technologických, ekonomických, případně sociálních faktorů. Je nutno brát ohled také na charakter místa demolice / dekonstrukce a respektovat legislativní rámec pro tyto činnosti (často je po takové případy vyžadováno povolení nebo licence) (European Commission 2016c).

Rozdíly dvou různých přístupů k managementu odpadů mezi in-situ a v recyklačním středisku jsou dle Junga (Jung et al. 2015) zobrazeny na Obr. 5. Pro specifický případ dvou scénářů recyklace s posouzením vlivů na životní prostředí a hlavním kritériem nejnižší výsledné ceny bylo zjištěno, že recyklace in-situ je přínosná pro množství SDO větší než 10 000 tun (odpovídá cca čtyřpatrové budově s 1800 m<sup>2</sup> podlahové plochy). Hlavním faktorem, který ovlivňuje výběr scénáře z hlediska produkce emisí je přeprava materiálu. Pokud je přeprava vzdálenější než 10 km, je vhodnější z hlediska emisí CO<sub>2</sub> in-situ recyklace.

### **2.1.5. Materiálové zdroje pro beton**

Beton je kompozitní materiál, složený z několika zdrojů, závislých na návrhových vlastnostech finálního betonového produktu. Obecně je čerstvý beton tvořen plnivem, pojivem a vodou, případně dalšími přísadami a příměsemi. Plnivo je v dosud konvenčním pojetí přírodní kamenivo a písek. Hydraulické pojivo tvoří nejčastěji cement, který spolu s vodou vytvoří potřebnou chemickou reakci pro hydrataci.

#### **Přírodní kamenivo**

Těžba přírodního štěrku a písku poškozují 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 (Weimann et al. 2003). Ročně je celosvětově vytěženo asi 40 miliard tun štěrku a písku, což odpovídá 68 až 85 % veškerých světově vytěžených hornin. Přesná data o celkové globální těžbě štěrku a písku nejsou dostupná, na rozdíl od poměrně přesných dat o těžbě cementu (Steinberger et al. 2010; Robles 2017). V globálním kontextu je těžba vykazována pod anglickým pojmem "aggregates" – kamenivo společně pro veškeré frakce kameniva i štěrkopísky. V České republice jsou lokality těžby rozděleny zvláště na stavební kámen a štěrkopísky.

V České republice je evidováno 543 ložisek těžby stavebního kamene<sup>35</sup> (z toho 218 těžebných<sup>36</sup>), ve kterých se v roce 2017 vytěžilo 14 027 milionu m<sup>3</sup> stavebního kamene<sup>37</sup>. Hmotnostně se jedná o 37 873 milionu tun kamene<sup>38</sup>. Dále je evidováno 553 ložisek těžby šterkopísků<sup>39</sup> (z toho 164 těžebných<sup>40</sup>), ve kterých se v roce 2017 vytěžilo 11 027 milionu m<sup>3</sup> šterkopísků<sup>41</sup>. Hmotnostně se jedná o 19,848 milionu tun šterkopísku<sup>42</sup>. Celkově je tedy v ČR vytěženo ročně 57 721 milionu tun, respektive 25 054 milionu m<sup>3</sup> kameniva pro stavební účely, což odpovídá cca 0,06 % světové těžby kameniva (Ministerstvo životního prostředí 2017b; Starý et al. 2017)

Globální produkce cementu dosahovala v roce 2010 přibližně 3,27 miliard tun. Do roku 2030 je předpokládán nárůst produkce na 4,83 miliard tun. Celkově se v roce 2017 celosvětově vyprodukovalo 4,1263 miliard tun cementu. Nejvíce cementu v celosvětovém měřítku produkuje Čína s velkým náskokem v odhadované hodnotě 2,4 miliard tun, následována Indií s produkcí 270 milionem tun a USA s 86,3 milionem tun. Zbytek světa dohromady pak v roce 2017 vyprodukovalo 1,37 miliardy tun. Čína tak v současné době vyrábí asi 58 % a spotřebovává cca 52 % světového cementu. Globální produkce cementu je zdrojem asi 1,45 ± 0,2 miliard tun CO<sub>2</sub>, což odpovídá 5 až 7 % světových emisí CO<sub>2</sub>. Převážná část emisí CO<sub>2</sub> (cca 66 %<sup>43</sup>) byla vyprodukována až po roce 1990 (Marinkovic 2013; Andrew 2018).

V České republice je ročně vyprodukováno 4,034 milionu tun cementu, spotřebuje se 4,039 milionu tun. Export a import zaujímá cca 0,55 milionů tun cementu (Svaz výrobců cementu ČR 2019). Lze konstatovat, že výroba cementu respektuje domácí spotřebu v ČR a roční bilance dovozu a vývozu je vyrovnaná.

---

<sup>35</sup> Součet výhradních, tj. státem vlastněných ložisek (320) a nevýhradních ložisek (223) v rámci ČR.

<sup>36</sup> Součet těžebných ložisek výhradních (176) a nevýhradních (42) v rámci ČR.

<sup>37</sup> Součet těžby ložisek výhradních (12 776 tis. m<sup>3</sup>) a nevýhradních (1 251 tis. m<sup>3</sup>) v rámci ČR. Údaj o nevýhradních ložiscích je pouze přibližný.

<sup>38</sup> Převodní poměr: 1 m<sup>3</sup> = 2,7 t stavebního kamene.

<sup>39</sup> Součet výhradních (203) a nevýhradních (350) ložisek v rámci ČR.

<sup>40</sup> Součet těžebných ložisek výhradních (69) a nevýhradních (95) v rámci ČR.

<sup>41</sup> Součet těžby ložisek výhradních (6 198 tis. m<sup>3</sup>) a nevýhradních (4 829 tis. m<sup>3</sup>) v rámci ČR. Údaj o nevýhradních ložiscích je pouze přibližný.

<sup>42</sup> Převodní poměr: 1 m<sup>3</sup> = 1,8 t šterkopísku.

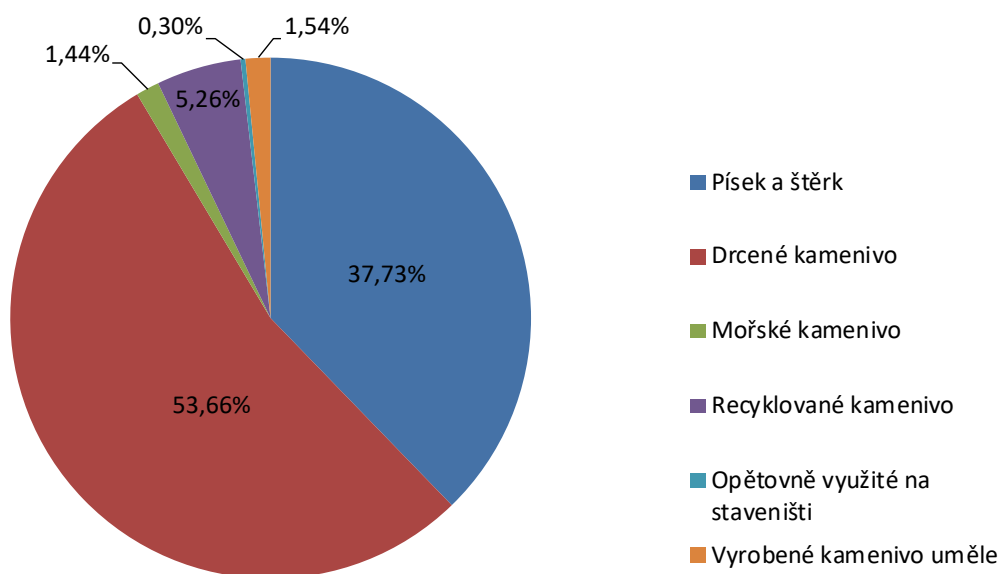
<sup>43</sup> Množství emisí CO<sub>2</sub> z kumulativní produkce cementu mezi lety 1924 až 2016.

## Recyklované kamenivo

Produkce recyklovaného kameniva je v rámci Evropy podstatně nižší než produkce kameniva přírodního. Dle statistik UPEG tvoří recyklované kamenivo podíl cca 5,26 % a znovu využité kamenivo 0,30 %, společně tedy 5,56 % z veškeré produkce všech 39 Evropských států (UPEG 2017). Země s největším podílem produkce recyklovaného kameniva ke kamenivu přírodnímu jsou uvedeny v Tab. 1 a na Obr. 6. Některé prameny uvádějí hodnotu spotřeby recyklovaného kameniva 6 % až 8 % s uvedením, že data z různých zdrojů Evropských států nejsou homogenizována, ačkoliv se z ekonomického hlediska nepředpokládá vývoz recyklovaného kameniva mimo produkční stát (Starý et al. 2017).

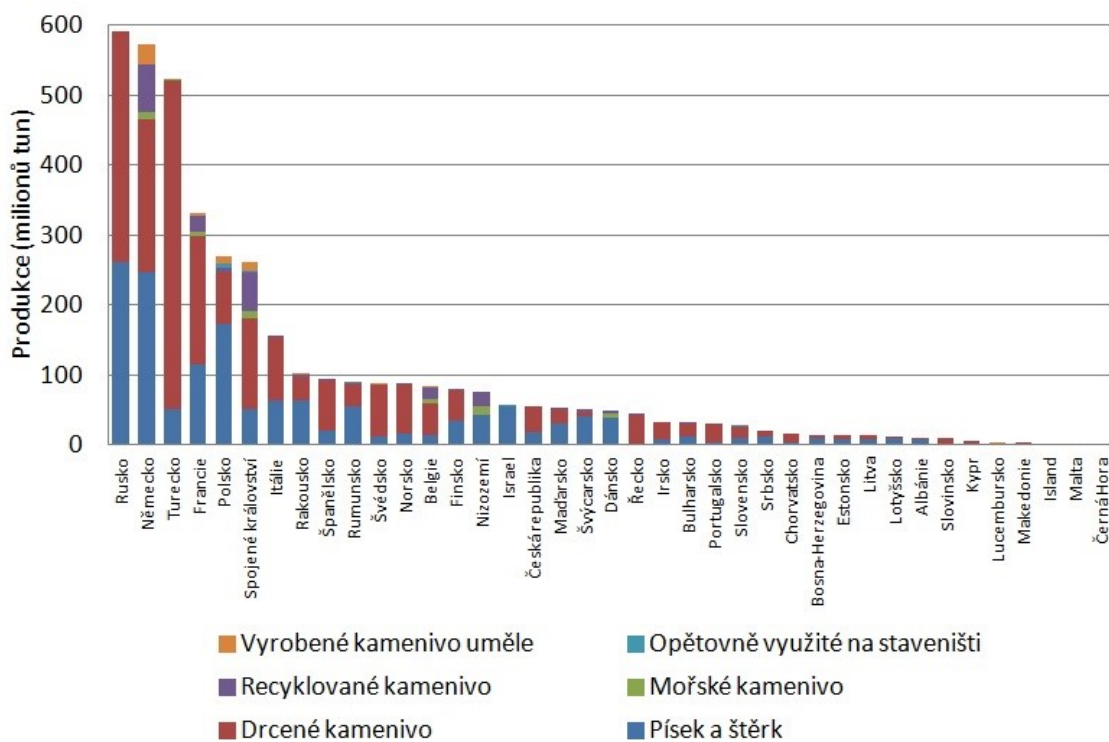
**Tab. 1 Podíl produkce recyklovaného a přírodního kameniva v EU v roce 2016, autorem upravená data (UPEG 2017)**

Stát	Celková produkce kameniva [milionů tun]	Celková produkce přírodního a uměle vyrobeného kameniva [milionů tun]	Celková produkce recyklovaného a znovu využitého kameniva [milionů tun]	Podíl recyklovaného kameniva ku kamenivu přírodnímu [%]
Nizozemí	75	56	19	33,93
Velká Británie	261	204	57	27,94
Belgie	82	67	15	22,39
Německo	572	504	68	13,49
Švýcarsko	51	46	5	10,87
Francie	331	309	22	7,12
Dánsko	48	45	3	6,67
Polsko	269	257	12	4,67
Rakousko	102	98	4	4,08
Maďarsko	53	51	2	3,92
Slovensko	27	26	1	3,85
Bulharsko	32	31	1	3,23
Itálie	157	153	4	2,61
Finsko	80	78	2	2,56
Řecko	43	42	1	2,38
Israel	56	55	1	1,82
Norsko	86	85	1	1,18
Rumunsko	89	88	1	1,14
Španělsko	93	92	1	1,09
Rusko	592	592	0	0,00
Turecko	522	522	0	0,00
Ostatní státy – součet	330,3	330,3	0	0,00
EU (39 států)	3951,3	3731,3	220	5,56



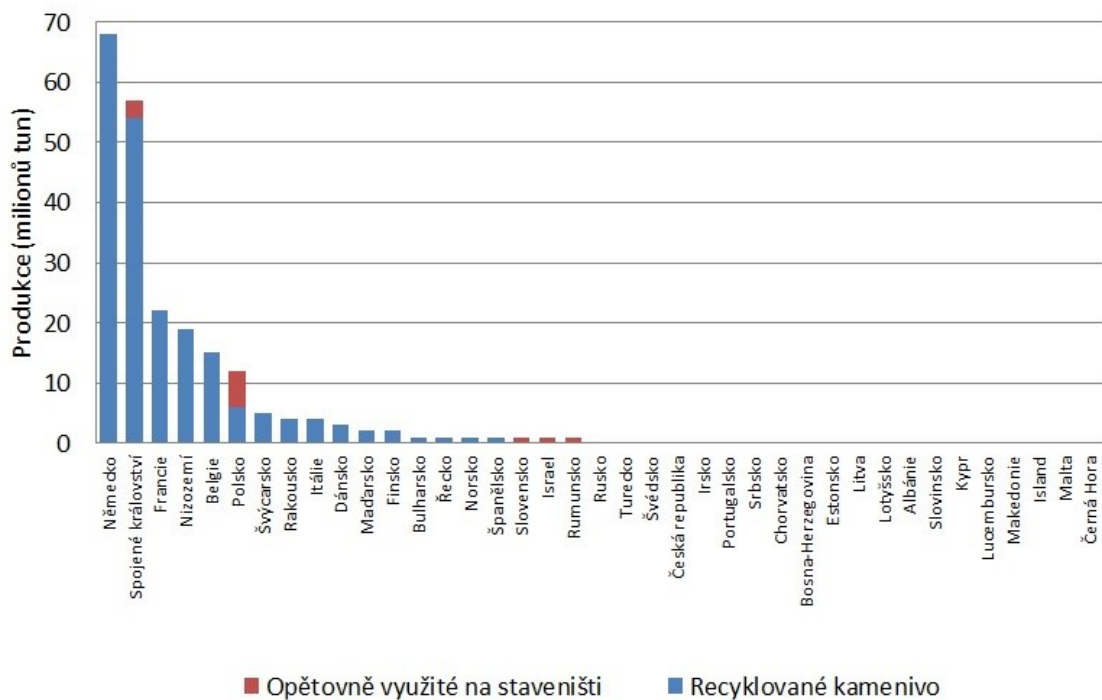
**Obr. 6 Podíl typů kameniva v rámci produkce 39 států EU, upraveno (UEPG 2017)**

Celkové statistiky produkce přírodního a recyklovaného kameniva dle UEPG jsou zobrazeny na Obr. 7 a Obr. 8 (UEPG 2017).



**Obr. 7 Národní produkce kameniva Evropských států v roce 2016, upraveno (UEPG 2017)**



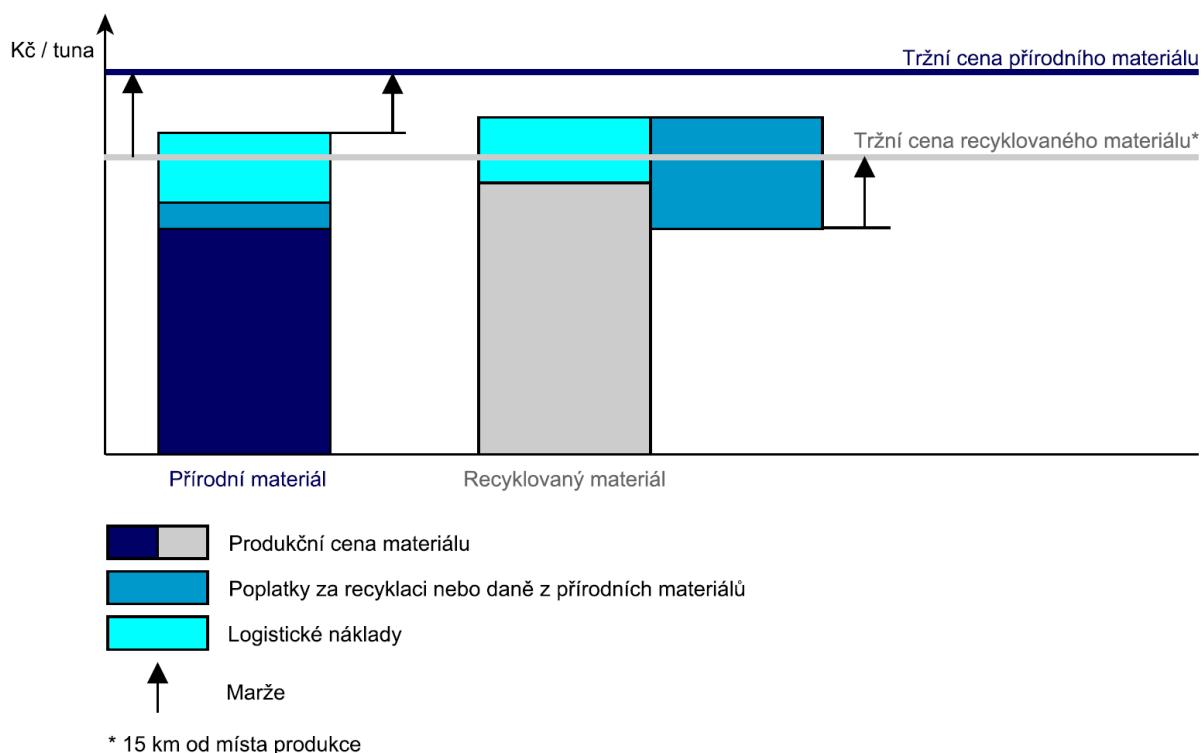


**Obr. 8 Národní produkce recyklovaného kameniva Evropských států v roce 2016, upraveno (UPEG 2017)**

Ačkoliv v Evropských statistikách figuruje Česká republika s nulovou hodnotou produkce recyklovaného kameniva, z jiných zdrojů vyplývá, že recykláty pokrývají cca 14 % spotřeby kameniva. Přitom v období let 2007 až 2011 dosahoval poměr produkce recyklátů k produkci přírodního kameniva a štěrkopísků hodnoty cca 4 %. Jedná se tedy o nárůst na cca tříapůlnásobek (Škopán 2019).

Významným faktorem, ovlivňující výše zmíněné statistiky jsou rovněž daně z dobývání nerostných surovin v jednotlivých státech, které mohou motivovat či demotivovat producenty k recyklaci. Obecně je vyjádřen vztah mezi tržními jednotkovými cenami na Obr. 9.

V České republice je daňová sazba složena z úhrady z dobývacího prostoru (300 až 1000 Kč / hektar) a z úhrady z vydobytých nerostů, která činí max. 10 % z tržní ceny za jednotku. Pro těžbu stavebního kamene je to 2 %, pro štěrkopísek 3 %. V porovnání s Itálií (cca 4 %), Švédskem (cca 12 %) či Velkou Británií (cca 20 %) jsou české hodnoty na velmi nízké úrovni (Starý et al. 2017; Parlament ČR 2016).



**Obr. 9** Vliv tržní hodnoty recyklovaného kameniva v závislosti na tržní hodnotě přírodních zdrojů dle UPEG (UEPG 2006)

### 2.1.6. Normové a legislativní požadavky pro beton z recyklovaného kameniva

V důsledku zmíněných statistik jsou napříč státy definovány legislativní a normové požadavky na vlastnosti recyklovaného kameniva a jeho poměrné zastoupení v celkové kompozici betonu. Zde pochopitelně platí, že normové požadavky jednotlivých zemí jsou zpravidla konzervativnější oproti studiím a experimentům ve výzkumné sféře a stanovují maximální podíl recyklátu současně s požadavky a limity na vlastnosti fyzikálně-mechanické, chemické a petrografické. Synoptický přehled normativních požadavků recyklovaného kameniva (vhodných pro zhotovení betonu) je uveden v příloze práce v Kapitole 13.1

#### Normové požadavky pro recyklované kamenivo do betonu ve světě

Většina norem států EU specifikující možný podíl kameniva v betonu a plnou náhradu kameniva recyklátem nepovolují. Rozdílnosti normativních přístupů vybraných zemí jsou uvedeny v následujících odstavcích.

**Asociace RILEM**<sup>44</sup> doporučuje rozdělovat hrubé recyklované kamenivo do třech typů (s maximálním podílem jemné frakce 5 %, zbytek kameniva o průměru větším než 4 mm). Kamenivo Typu I je vyrobeno drcením cihelných materiálů (až 100 % hmotnosti). Typ II je vyroben drcením betonových materiálů a typ III je mixem přírodního kameniva (min. 80 % hmotnosti) a ostatních dvou skupin (max. 10 % typu I). Pro typ II je povolena až 100 % náhrada kameniva recyklátem pro pevnosti do C50/60. (RILEM 1994; BRE Ltd. 1998; Pepe 2015b).

**Velká Británie** povoluje ve své normě<sup>45</sup> až 20% náhradu hrubého kameniva (s maximálním podílem jemné frakce 5 %) recyklátem s označením RCA pro pevnostní třídy do C40/50 a pro stupně vlivu prostředí X0, XC1 až XC4, XF1 a DC-1. Takto vyrobený beton může být využit jako nevyztužený nebo beton pro interiérové použití. V exteriéru lze beton použít pouze tam, kde není vystaven chloridům a rozmrazovacím solím, to znamená, že pro stupně vlivu prostředí XS, XD, XF2 až XF4 není náhrada povolena. Druhý typ recyklátu, označen RA, je určen pro využití v betonech do pevnosti C16/20, a pro nenáročné třídy prostředí a může obsahovat až 100 % cihelného recyklátu (RMA<sup>46</sup>) (de Brito a Nabajyoti 2013; Pellegrino a Faleschini 2016; Dodds et al. 2017; Rao et al. 2019a).

Ve Velké Británii funguje rovněž Institut, zabývající se výzkumem ve stavebnictví, který rozděluje kamenivo do tří skupin dle relativního obsahu cihelné a betonové složky. Typ RCA (I) je recyklát s až 100% obsahem cihelné části, typ RCA (II) je betonový recyklát s obsahem až 10 % cihelné části a typ RCA (III) je směsný recyklát předchozích skupin s obsahem až 50 % cihelné části. Jedná se tedy o obdobný přístup, jako doporučuje RILEM (Rao et al. 2019a).

**Německé normy**<sup>47</sup> umožňují za specifických podmínek<sup>48</sup> vyrábět 4 typy recyklovaného betonu s limitem pevnosti C30/37. Je možná až 45% náhrada pro stupně vlivu prostředí X0 a XC1 až XC4, až 35% náhrada pro stupně vlivu prostředí XF1 a XF3, případně až 25% náhrada

---

<sup>44</sup> z franc. Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages (zkráceně RILEM), angl. International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, volně přeloženo jako Mezinárodní unie laboratoří a expertů v oblasti stavebních materiálů, systémů a konstrukcí.

<sup>45</sup> britská norma BS 8500-2. (2015). Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206-1. Specification for constituent materials and concrete.

<sup>46</sup> z angl. Recycled Masonry Aggregates (zkráceně RMA).

<sup>47</sup> německé normy DIN 1045-2 a DIN EN 206-1; DIN 4226-100 a DAfStb (1998) Code.

<sup>48</sup> dle německé normy DIN 4226-100 obsahuje kamenivo Typu 1  $\geq 90$  % a kamenivo typu 2 obsahuje  $\geq 70$  % drceného kameniva.

pro stupně vlivu prostředí XA1. Pouze Typ 1 a Typ 2 mohou být využity pro konstrukční beton. Typ 1 musí obsahovat alespoň 90 % přírodního kameniva, max. 10% podílu cihelného, max. 2 % ostatních minerálů, max. 1 % asfaltu a max. cizorodých materiálů (sklo, kov apod.) max. 0,2 %. Typ 2 musí obsahovat alespoň 70 % přírodního kameniva, max. 30% podílu cihelného, max. 3 % ostatních minerálů, max. 1 % asfaltu s cizorodých materiálů max. 0,5 %. Typ 3 je kamenivo z cihelných recyklátů a typ 4 je kamenivo namícháno z cihelného a betonového recyklátu (Peck et al. 2014; Pellegrino a Faleschini 2016; Rao et al. 2019a).

**Italská norma**<sup>49</sup> uvádí množství substituce dle pevnostní třídy a stupně vlivu prostředí. Je možná max. 5% náhrada pro C45/55 a větší, max. 15% náhrada pro pevnosti do C45/55, max. 30% náhrada pro pevnosti do C30/37, max. 60% náhrada pro pevnosti do C20/25 a až 100% náhrada pro pevnosti do C8/10. Tato norma však neuvádí hodnoty pro mechanické a fyzikální požadavky. Ty jsou uvedeny v normě evropské<sup>50</sup> (Pepe 2015b).

**Belgické normy**<sup>51</sup> stanovují 3 typy hrubého recyklovaného kameniva (>4 mm): recyklované betonové kamenivo (RCA), recyklované cihelné kamenivo (RMA) a mix dvou předchozích. Je možné vyrábět betony pro stupně vlivu prostředí X0 a XC1 a betony s belgickou environmentální třídou E0 a E1 s maximální pevností do C25/30. Vyšší pevnosti lze vyrábět pouze po předchozím experimentálním ověření. Maximální náhrada je stanovena na 20 % objemu hrubého kameniva. Vlastnosti recyklátů se posuzují dle dvou tříd kameniva – GBSB-I a GBSB-II, které téměř odpovídají RILEM klasifikaci Typu I, resp. Typu II. Oba typy GBSB-I a GBSB-II je možné použít pouze pro interiérové betony a v neagresivním prostředí (Tam a Tam 2008; Pellegrino a Faleschini 2016).

Nizozemí reguluje využití recyklovaného kameniva normou<sup>52</sup>, ve které definuje dva typy kameniva v závislosti na jejich složení. Pro využití v betonu pro předpjaté a vyztužené konstrukce by měla směs kameniva obsahovat minimálně 95 % betonové drtě, neměla by obsahovat více než 5 % cihelné složky, maximálně 0,1 % organických materiálů a 1 % nečistot (v této definici není zahrnut asfalt). Obsah chloridů musí být menší než 0,05 % a obsah síranů menší než 1 %. Při náhradě do 20 % hmotnostního obsahu přírodního kameniva za recyklát je možné

---

<sup>49</sup> italská norma DM 14/01/ 2008 Norme Tecniche per le Costruzioni (Technical Standards for Construction).

<sup>50</sup> evropská norma EN 12620:2008 Aggregates for concrete.

<sup>51</sup> belgická norma COPRO (2012) PTV 406: Technical Prescription: Recycled aggregates from construction and demolition waste a norma CRIC TRA 550: Toepassingsreglement beton, versie 2.1.

<sup>52</sup> Nizozemská norma NEN 5905: Dutch supplement to NEN-EN 12620+A1: Aggregates for concrete.

považovat beton za konvenční a lze jej aplikovat v konstrukcích s maximální třídou pevnosti C40/50 v neagresivním prostředí. Pro nekonstrukční beton (třída pevnosti nižší než C16/20) lze použít smíšené kamenivo, kdy složení obsahuje max. 65 % cihelné složky a max. 1 % organických reziduí. Recyklované kamenivo v Nizozemí musí mít certifikát o shodě dle standardu BENOR v souladu s Belgickou normou PTV 406 (de Brito a Nabajyoti 2013; Pellegrino a Faleschini 2016).

**Norská** betonová asociace<sup>53</sup> stanovila podmínky pro využití recyklátů v publikaci<sup>54</sup> a na základě výsledků výzkumného projektu RESIBA. Doporučení obsahují především klasifikaci recyklátu z hlediska procentuálního zastoupení cihel a jiných cizorodých materiálů v betonové drti a jsou definovány dva druhy recyklátů. Typ 1 je betonový recyklát (min. 94 % betonové drti nebo přírodního kameniva) s nasákavostí do 10 % a Typ 2 je směsný recyklát (min. 90 % směsi musí být betonová nebo cihelná drť) s nasákavostí do 20 %. Množství náhrady přírodního kameniva recyklovaným nebylo stanoveno (Karlsen et al. 2002; de Brito a Nabajyoti 2013).

Dánská betonářská společnost<sup>55</sup> ve směrnici<sup>56</sup> rozlišuje tři skupiny recyklátů:

- GP1 testované: je kamenivo o objemové hmotnosti větší než  $2200 \text{ kg/m}^3$ , které obsahuje betonovou drť z recyklačních zařízení frakce 0–32 mm. Pokud pochází z jiných zdrojů než z recyklačních linek, je povolena pouze frakce 4–32 mm.
- GP1 netestované: je kamenivo identické s GP1 s tím rozdílem, že pochází z jiných zdrojů než recyklačních zařízení, ale může obsahovat frakci 0–32 mm.
- GP 2: je kamenivo o objemové hmotnosti větší než  $1800 \text{ kg/m}^3$ , zpravidla směs betonového a cihelného recyklátu, pocházející z demoliční suti.

Při využití betonů pro konstrukční účely se předpokládá, že modul pružnosti betonu, vyrobeného z kameniva GP1, dosáhne alespoň 80 % předepsaných hodnot pro konvenční beton. Pro beton vyrobený z kameniva GP2 je to alespoň 50 % konvenčního modulu pružnosti. Alternativně lze stanovit skutečný modul pružnosti experimentálně (Hansen a RILEM TC37 1992; de Brito a Nabajyoti 2013).

---

<sup>53</sup> volně přeloženo, z norštiny Norsk Betongforening, (zkráceně NB).

<sup>54</sup> Publication no. 26 (2003): Materialgjenvinning av betong og murverk for betongproduksjon.

<sup>55</sup> volně přeloženo, z dánštiny Dansk Betonforening (zkráceně DBF).

<sup>56</sup> DBF nr. 34 (1989) + nr. 34 (1995): Anvisning for genanvendelsesmaterialer i beton til passiv miljøklasse.

---

**Švýcarská** technická norma<sup>57</sup> definuje dva druhy betonů. Takzvaný „klasifikovaný beton“ může mít až 100% náhradu betonovým recyklátem za předpokladu, že budou dodrženy kvalitativní požadavky na recyklát dle normy<sup>58</sup>. Druhý, tzv. „neklasifikovaný beton“ je rovněž beton se 100% náhradou kameniva za recyklát betonový a /nebo cihelný. Obsah cementu v betonové receptuře neklasifikovaného betonu musí být větší než 150 kg/m<sup>3</sup>. Cihelný recyklát může být použit jen v případě aplikací do betonových potěrů a betonů s nízkým obsahem cementu. Aplikční podmínky těchto betonů jsou charakterizovány v normě třemi druhy scénářů (de Brito a Nabajyoti 2013):

- Scénář A: dodavatel betonu specifikuje poměr náhrady kameniva tak, aby byl schopen dodržet požadavky na vlastnosti a zpracovatelnost betonové směsi.
- Scénář B: Maximální poměry náhrad kameniva jsou stanoveny dle normových limitů a zajišťují, že beton vyrobený z recyklovaného kameniva bude mít vlastnosti obdobné vlastnostem běžného betonu, a to jak v čerstvém, tak ve ztvrdlém stavu. Tento scénář zajišťuje, že při návrhu konstrukcí nejsou nutné žádné změny.
- Scénář C: Jedná se o využití při nenáročných aplikacích. Realizace by měla zohledňovat rozdíly mezi přírodním a recyklovaným kamenivem, a to jak v čerstvém, tak ve ztvrdlém stavu. Pro tento scénář je nezbytné testování dle norem SIA 162, SIA 162/1 a SIA 162/4, zejména modul pružnosti, smrštění, konzistence či karbonatace betonu.

**Portugalské** požadavky na recyklované kamenivo je obsaženo v příručce<sup>59</sup> národní laboratoře pro stavebnictví<sup>60</sup> již od roku 2006 (poslední vydání je z roku 2009), která je provázána s normou<sup>61</sup>. Rozlišují tři třídy kameniva. Třída ARB1 a ARB2 obsahují především betonovou drť a třída ARC obsahuje betonové a cihelné drtě. Maximální náhrada je v případě třídy ARB1 25 % hmotnosti s možností využití pevnostní třídy až do C 40/50 a pro stupně vlivu prostředí X0, XC1 až XC4, XS1, XA1. Pro ARB2 platí maximální náhrada 20 % hmotnosti s možností

---

<sup>57</sup> Švýcarská technická norma OT (Objectif Technique) 70085 (2006): Instruction technique. Utilisation de matériaux de construction minéraux secondaires dans la construction d'abris.

<sup>58</sup> Švýcarská norma SIA 162/4 (1994): Béton de recyclage.

<sup>59</sup> E 471 (2009): Guide for the use of recycled coarse aggregates in hydraulic binder concrete.

<sup>60</sup> Volně přeloženo z angl. National Laboratory of Civil Engineering, z portugalského Laboratório Nacional de Engenharia Civil (zkráceně LNEC).

<sup>61</sup> Portugalská norma NP EN 12620 (2002) + A1(2010): Agregados para betão.

---

využití pevnostní třídy až do C 35/45. Třída ARC je určena pouze pro nekonstrukční aplikace. Minimální obsah betonové drtě je stanoven pro ARB1 a  $ARC \geq 90 \%$ , pro ARB2  $\geq 70 \%$ . Nasákavost se posuzuje pro celou směs kameniva, proto se může lišit nasákavost recyklátu, ale vzhledem k možnostem různých poměrů přírodního kameniva vůči recyklovanému je možné s nasákavostí operovat do výše součtového limitu  $\leq 7 \%$  (de Brito a Nabajyoti 2013).

**Španělská příručka**<sup>62</sup> v příloze č. 15 určuje užití recyklátů pro betony pevnostních tříd do 40 MPa a zcela zakazuje užití pro předpjaté betonové prvky. Pro náhradu do 20 % hmotnosti kameniva platí požadavky příručky, ale pro náhradu větší než 20 % musí recyklované kamenivo splňovat požadavky obdobné, jako konvenční kamenivo za předpokladu, že redukce objemové hmotnosti oproti konvenčnímu kamenivu se může pohybovat v rozmezí 5–15 %. Hrubé kamenivo pro nenosné konstrukce může být až 100 % nahrazeno recyklátem. Příručka rovněž udává široké spektrum požadavků pro různé kombinace fyzikálně mechanických vlastností kameniva a stanovuje také tzv. Index environmentální sensitivity betonové konstrukce<sup>63</sup>, ve které zohledňuje recyklované kamenivo samostatnými váhovými faktory (Ministry of Public Works 2010; Rao et al. 2019a).

**Čínská technická norma**<sup>64</sup> pro recyklované kamenivo rozděluje recykláty do dvou typů, Typ 1 a Typ 2, které jsou charakterizovány dle nasákavosti, objemové hmotnosti ve vysušeném stavu a dle obsahu cihelné složky. Další normy specifikují požadavky<sup>65</sup> na recyklované jemné kamenivo a požadavky<sup>66</sup> pro aplikace těchto kameniv požadavky Hrubé kamenivo je normou<sup>67</sup> děleno na tři úrovně (Level 1 až Level 3). Na základě obsahu složek recyklátu je možné dle těchto úrovní stanovit využití pro betony návrhových pevností od C25 (pro Level 3), přes C40 (pro Level 2) až po Level 1, pro který není žádné pevnostní omezení stanoveno. Recyklované kamenivo nesmí být užito v předpjatých betonech (Rao et al. 2019a).

**Hong Kong** disponuje technickou příručkou pro autorizované osoby a registrované stavební inženýry<sup>68</sup>, která stanovuje, že betony se 100% náhradou hrubého kameniva mohou být

---

<sup>62</sup> EHE-08: Code on Structural Concrete.

<sup>63</sup> z angl. Environmental sensitivity index (ISMA) of the concrete structure.

<sup>64</sup> Čínská norma DG/TJ07-008 (2007): Technical code for application of recycled aggregate concrete.

<sup>65</sup> Čínská norma GB/T 25176 (2010): Recycled fine aggregate from concrete and mortar.

<sup>66</sup> Čínská norma JGJ/T 240 (2011): Technical specification for application of recycled aggregate

<sup>67</sup> Čínská norma GB/T 25177 (2010): Recycled coarse aggregate for concrete.

<sup>68</sup> APP-129: Practice Note for Authorized Persons and Registered Structural Engineers, Use of Recycled Aggregates in Concrete.

využity pouze jako nekonstrukční betony s nárůstem pevnosti ze 14 MPa (7denní pevnost) na 20 MPa (pevnost po 28 dnech). Příručka také doporučuje předepsanou proporcí složek betonu (se 100% obsahem recyklovaného hrubého kameniva): 100 kg portlandského cementu, 180 kg jemného kameniva, 180 kg hrubého kameniva (20 mm) a 90 kg hrubého kameniva (10 mm). Další možností je beton s 20% náhradou hrubého kameniva recyklátem s pevností v rozmezí 25 MPa až 35 MPa. V obou případech musí být hrubé kamenivo drcené a splňovat další požadavky, např. minimální objemová hmotnost kameniva  $2000 \text{ kg/m}^3$ , nasákavost maximální 10 %, maximální obsah dřevěných prvků 0,5 %, maximální obsah ostatních materiálů (kovy, plasty, sklo) 1 %, maximální obsah jemné frakce 4 %, maximální objem písku (<4 mm) 5 %, maximální obsah síranů do 1 % a index plochosti kameniva<sup>69</sup> do 40 %. Jemné frakce kameniva jsou pro receptury betonů striktně zakázány. Norma<sup>70</sup> obsahuje podrobné požadavky na procentní propad sítý při rozboru recyklátu (de Brito a Nabajyoti 2013; Rao et al. 2019a).

V USA se problematice věnuje Americký betonářský institut (ACI)<sup>71</sup> a Americká společnost pro testování a materiály (ASTM)<sup>72</sup>. ACI ve svém vzdělávacím dokumentu (American Concrete Institute 2007) uvádí možnost využití jak hrubého, tak jemného kameniva do nových betonů. Až 100 % hrubého kameniva může být vyrobeno z recyklovaného materiálu. Procento jemného kameniva je však obvykle omezeno na 10–20 %, zbytek musí být přírodní materiál. Jako důvod uvádí ACI vyšší nasákavost, tedy 2 % až 6 % pro hrubé frakce a pro jemné frakce kameniva ještě vyšší a tím horší zpracovatelnost betonu. ACI udává informace<sup>73</sup> o způsobu získávání recyklovaného kameniva a popisuje kroky pro výběr betonového odpadu a postup zpracování pro dosažení vhodné kvality. V USA neexistuje žádná regulace, která by bránila využití recyklovaného kameniva v konstrukčním betonu. Norma z roku 1982<sup>74</sup> definuje drcený hydraulický cementový beton jako hrubé kamenivo. Norma z roku 2014<sup>75</sup> povoluje využití i

---

<sup>69</sup> Index plochosti zrna kameniva, z angl. Flakiness index.

<sup>70</sup> CS3:2013 Aggregates for Concrete

<sup>71</sup> z angl. American Concrete Institute (zkráceně ACI).

<sup>72</sup> z angl. American Society for Testing and Materials (zkráceně ASTM).

<sup>73</sup> ACI 555R-01: Removal and reuse of hardened concrete

<sup>74</sup> Americká norma ASTM C33/C33 M: Standard specification for concrete aggregates

<sup>75</sup> Americká norma ASTM C125-14: Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates

---



recyklované jemné kamenivo, tedy drcený hydraulický cementový beton jako "vyrobený písek". I přes uvedená fakta je využití recyklovaného betonu pro konstrukční účely omezeno (Pellegrino a Faleschini 2016).

**Japonsko** rozlišuje tři typy recyklovaného kameniva v závislosti na kvalitě a fyzikálních vlastnostech. Původní norma<sup>76</sup> z roku 2005 byla novelizována normou<sup>77</sup> v roce 2011. Recyklované kameniva nejvyšší kvality typu H se vyrábějí pokročilým zpracováním, včetně drcení, broušení a třídění betonů vzniklých při demolicích konstrukcí a musí splňovat přísnější limity týkající se složení, obsahu kontaminantů a fyzikálních vlastností oproti středně kvalitní kamenivo typu M a méně kvalitní recyklované kamenivo typu L. Kameniva typu H, které jsou charakterizovány nejvýše 3 % obsahem cizorodých a nepřirodních materiálů, mohou být bez omezení používány v konstrukcích o jmenovité pevnosti nižší 45 MPa. Kameniva typu M mohou být použity v prvcích, které nejsou vystaveny působení mrazu a kamenivo typu L může být využito jako zásypový, výplňový či jiný vyrovnávací materiál a je podmíněno použitím směsných cementů typu B, jakožto opatření proti alkalicko-silikátové reakci<sup>78</sup> (Pellegrino a Faleschini 2016).

**Australský** institut pro beton a cement<sup>79</sup> vydal zprávu o stavu produkce recyklovaného kameniva, ve kterém popisuje pět druhů kameniva (RCA, RCM, RA, RAP a RAA) a požadavky na ně. Recyklované kamenivo uvádí pod známou zkratkou RCA. Australská příručka pro recyklované kamenivo<sup>80</sup>, kterou vydává australská organizace pro vědu a průmysl<sup>81</sup> rozděluje recykláty do dvou tříd (Class 1 a Class 2). Class 1 obsahuje další podtřídy (1A a 1B) a Class 2 se věnuje recyklovaným kamenivům pro účely silničního stavitelství a dělí se na další podtřídy (2A1, 2A2, 2B, 2C, 2D a 2E). Dále se kamenivo, určené pro konstrukční betony zařazuje do dvou jakostí (Grade 1, Grade 2). Kamenivo, splňující jakostní podmínky Grade 1, umožňuje náhradu max. 30 % hmotnosti kameniva pro využití v betonech o pevnostech do 40 MPa. Pro kamenivo spadající do jakosti Grade 2 je možná až 100% náhrada pro betony o pevnostech do

---

<sup>76</sup> Japonská norma JIS A 5021 (2005): Recycled aggregate for concrete-class H.

<sup>77</sup> Japonská norma JIS A 5021 (2011): Recycled aggregate for concrete-class H.

<sup>78</sup> Známo z angl. alkali-silica reaction (zkráceně ASR)

<sup>79</sup> Volně přeloženo, z angl. Cement Concrete & Aggregates Australia (zkráceně CCAA).

<sup>80</sup> Australská norma H155-2002: Guide for specification of recycled concrete aggregate for concrete production.

<sup>81</sup> Volně přeloženo, z angl. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (zkráceně CSIRO).

---

20 MPa. Ačkoliv institut CSIRO uvádí, že nejkvalitnější kamenivo Class 1A, jakosti Grade 1, má potenciál pouze pro využití v nekonstrukčních betonech (CCAA 2008; Pepe 2015b; Martinelli et al. 2017; Rao et al. 2019a).

**Brazilská norma**<sup>82</sup> umožňuje použití hrubého i jemného recyklovaného kameniva pouze v nekonstrukčních betonech. Jsou vyhrazeny čtyři třídy SDO (Class A, B, C, D) s tím, že betonové recyklované kamenivo, zahrnuje v Class A, může být využito pro beton. Class A se dále člení na dvě podkategorie:

- Recyklované betonové kamenivo (ARC) – recyklát obsahující více než 90 % betonové drtě či přírodního kameniva.
- Smíchané kamenivo (ARM) – recyklát obsahující méně než 90 % betonové drtě či přírodního kameniva.

Dále platí, že pro rozlišení ARC a ARM, je SDO rozdělen do čtyř skupin podle jejich složení:

- skupina 1: SDO, obsahující z více než 50 % objemu vytvrzený cement,
- skupina 2: SDO, obsahující z více než 50 % objemu horninové části,
- skupina 3: SDO, obsahující červenou nebo bílou keramiku s leštěným povrchem, avšak max. 50 % objemu,
- skupina 4: SDO, obsahující neminerální organické materiály jako dřevo, plast, bitumen, sklo, keramické dlaždice nebo sádra.

Pokud je podíl prvních dvou skupin více než 90 %, pak může být SDO definován jako ARC. V opačném případě to je ARM (Alaejos et al. 2013; de Brito a Nabajyoti 2013; Rao et al. 2019a).

## **České normové požadavky pro recyklované kamenivo do betonu**

Evropská norma ČSN EN206+A1<sup>83</sup>, harmonizovaná pro České prostředí, doporučuje požadavky na hrubé recyklované kamenivo. Norma rozlišuje dva typy hrubého recyklovaného kameniva dle Tab. 2. Typ A je kamenivo ze známého zdroje, s maximální náhradou 30 % až

---

<sup>82</sup> Brazilská norma ABNT NBR 15116 (2005): Recycled aggregate of solid residue of building constructions – Requirements and methodologies.

<sup>83</sup> ČSN EN 206+A1 (2018): Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.

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. Požadavky na drobné recyklované kamenivo norma nespecifikuje.

**Tab. 2 Maximální procento nahrazení hrubého kameniva (% hmotnosti), dle (ČSN EN 206+A1: Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, 2018) + vlastní úpravy**

Druh recyklovaného kameniva (uvedeny pouze složky Rc a Ru, viz Tab. 3)	Stupeň vlivu prostředí			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	všechny ostatní stupně
Typ A (Rc <sub>90</sub> , Rcu <sub>95</sub> )	≤ 50 %	≤ 30 %	≤ 30 %	0 %
Typ B (Rc <sub>50</sub> , Rcu <sub>70</sub> )	≤ 50 %	≤ 20 %	0 %	0 %

Harmonizovaná evropská norma pro kamenivo ČSN EN 12620+A1<sup>84</sup> obsahuje specifikaci recyklovaného kameniva, ale v předmětu normy je rovněž poznámka, že zkušební metody jsou teprve v pokročilé fázi příprav. U neznámých kameniv stanovuje povinnost splnění požadavků, které platí pro běžné kamenivo a zároveň uvádí, že konkrétní požadavky je možné specifikovat pro každý daný případ samostatně formou smluvních dokumentů. Kategorizace recyklovaného kameniva musí být deklarována dle normy<sup>84</sup> viz Tab. 3.

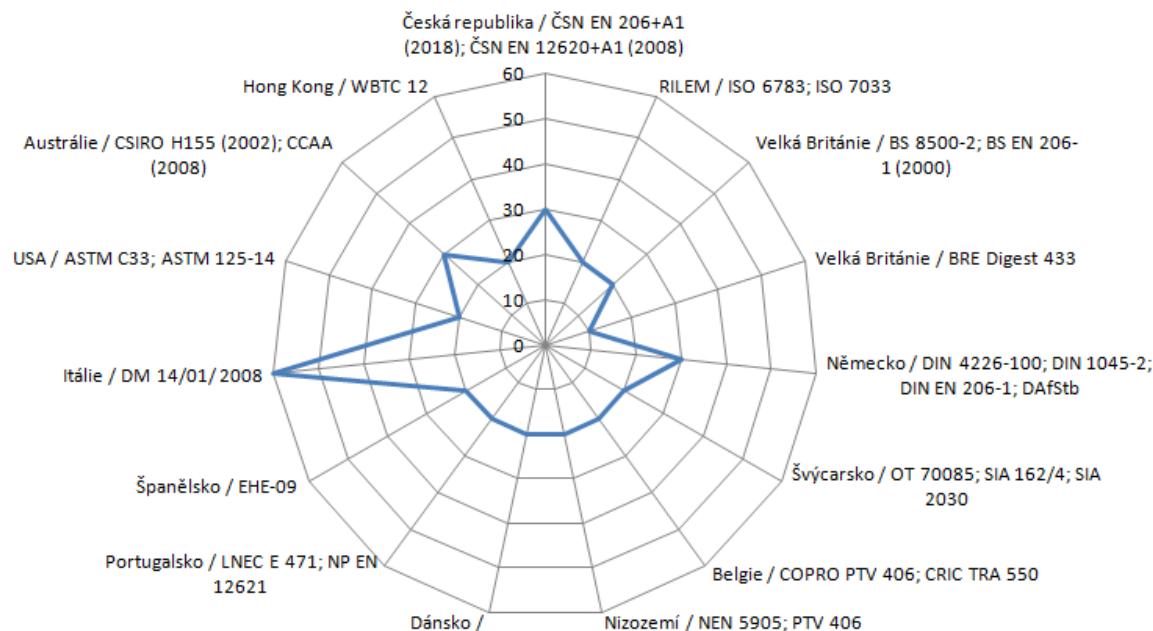
**Tab. 3 Kategorie složek hrubého recyklovaného kameniva, upraveno dle (CEN 2008)**

Složka	Obsah	Kategorie
Rc	≥90	Rc <sub>90</sub>
	≥80	Rc <sub>80</sub>
	≥70	Rc <sub>70</sub>
	≥50	Rc <sub>50</sub>
	<50	Rc <sub>deklarovaná</sub>
	Bez požadavku	Rc <sub>NR</sub>
Rc + Ru	≥95	Rcu <sub>95</sub>
	≥90	Rcu <sub>90</sub>
	≥70	Rcu <sub>70</sub>
	≥50	Rcu <sub>50</sub>
	<50	Rcu <sub>deklarovaná</sub>
	Bez požadavku	Rcu <sub>NR</sub>

Pozn.: Rc: beton, betonové výrobky, malta, betonový zdící prvky; Ru: nestmelené kamenivo, přírodní kámen, směsi kameniva stmelené hydraulickými pojivy.

<sup>84</sup> ČSN EN 12620+A1(2008): Kamenivo do betonu.

Poměr složek v recyklovaném kamenivu musí být stanoven dle samostatné normy ČSN EN 933-11<sup>85</sup>. Chemické vlastnosti a obsah neorganických složek kameniva, které by mohly ovlivnit dobu tuhnutí a tvrdnutí betonu musí být zkoušeny dle normy ČSN EN 1744-6<sup>86</sup>.



**Obr. 10** Normově povolená náhrada (% hmotnosti) hrubého přírodního kameniva recyklovaným ze známého zdroje pro beton C 20/25, XC1 v jednotlivých státech

### Dílčí závěry z rešerše normových požadavků na RCA

Dle normativních dokumentů a příruček jednotlivých států je možné rozdělit požadavky do třech charakteristických skupin. První skupinou jsou normy, které striktně určují obsah maximální náhrady kameniva v betonu, bez ohledu na další vlastnosti. Tato skupina je nejméně početná a zpravidla se jedná o normy pro kameniva určených do betonů nekonstrukční povahy. Druhou skupinou jsou normy, které náhradu nestanovují, ale také nezakazují. Tyto normy se odkazují na výsledky jednotlivých zkoušek a nutné posouzení materiálu při konkrétní aplikaci. Třetí skupinou jsou normy, které kombinují předchozí dvě skupiny. Česká republika patří do této třetí kategorie, kdy rozmezí náhrady přírodního kameniva je stanoveno, nicméně je nutno

<sup>85</sup> ČSN EN 933-11 (2009): Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva.

<sup>86</sup> ČSN EN 1744-6 (2006): Zkoušení chemických vlastností kameniva - Část 6: Stanovení vlivu výluhu z recyklovaného kameniva na počátek tuhnutí cementu.

zohlednit také další výsledky normativních zkoušek materiálu. Povrchně jsou v českých normách řešeny konkrétní zkoušky recyklovaného kameniva.

Ty byly původně stanoveny pro testování kameniva přírodního, nyní jsou povoleny (formou dodatku normy) i pro kamenivo recyklované, avšak konkrétní normativní zkušební postupy pro jasné kvalitativní definici recyklovaného kameniva by byly jistě přínosné. Z Obr. 10 je viditelné srovnání pro modelový příklad betonu C20/25, XC1, a sice maximální procentuální náhrady přírodního kameniva recyklovaným dle normových požadavků jednotlivých států. Z hlediska maximální náhrady se Česká republika, společně s Německem a Austrálií řadí ke státům s vyšším normovým respektem k náhradám za recyklované kamenivo. Lídrem pro modelový příklad je Itálie.

### **2.1.7. Fyzikální a mechanické vlastnosti recyklovaného kameniva**

Vlastnosti kameniva jsou funkční hodnotou složení recyklovaného kameniva, která je proměnlivá dle použitého zdroje. Obecně lze konstatovat, že se recyklované kamenivo skládá ze složek původního, tzv. matečního betonu<sup>87</sup>, a sice původního přírodního kameniva a ztvrdlého cementového tmele. Přibližně 70 % až 80 % objemu betonu zaujímá kamenivo (Rao a B 2019).

#### **Vliv matečního betonu na recyklované kamenivo**

Vliv na kvalitu betonového recyklátu má rovněž proces recyklace, tedy drcení matečního betonu a fakt, zda se jedná o jednofázové nebo vícefázové drcení (Pedro et al. 2015). Podle Padminiho (2009) jsou dány tyto základní důležité faktory, které ovlivňují vlastnosti recyklovaného kameniva:

- způsob rozdrčení matečního betonu má významný vliv na recyklované kamenivo,
- tvar částic recyklovaného kameniva je nepravidelnější oproti přírodnímu kamenivu a vykazuje hrubší povrch,
- recyklovaný beton vyžaduje více vody pro stejnou zpracovatelnost oproti konvenčnímu betonu z přírodního kameniva,
- objemová hmotnost, pevnost v tlaku a modul pružnosti jsou u recyklovaného betonu relativně menší oproti matečnímu betonu,

---

<sup>87</sup> z angl. Parental Concrete nebo Parent Concrete, zkráceně PC

- pro daný poměr vody ku cementu jsou propustnost betonu, rychlost karbonatace a riziko koroze výztuže vyšší.

Kvalita recyklátu závisí na typu konstrukcí a na kvalitě matečního betonu, který se může lišit v závislosti na místě stavby nebo také na vnitřní struktuře materiálu. Proto jsou poměrně velké rozdíly v kvalitě různých recyklovaných kameniv. Xiao (2018) prezentoval, mateční beton, především jeho návrhová pevnost a okolní podmínky, ve kterých byl vystaven, má vliv na mechanické vlastnosti kameniva a následně nově vyrobený recyklovaný beton. V experimentu porovnával vzorky matečního a nově namíchaného betonu s přibližně stejnými proporcemi. V případě recyklovaného betonu byl nižší modul pružnosti v tahu<sup>88</sup>, nižší pevnost a vyšší poměrné přetvoření. Na druhou stranu, Katz (2003) prokázal, že doba drcení matečního betonu, z něhož je vyráběn recyklát, příliš neovlivňuje nasákavost recyklovaného kameniva. Zega et al. (2010) studoval vliv různých typů hrubého kameniva a poměr vody ku cementu matečního betonu na vlastnosti recyklovaného betonu a zjistil, že poměr frakcí recyklovaného kameniva nezávisí na poměru vody a cementu, ani na tvaru a struktuře kameniva v matečním betonu. Další testy (Padmini et al. 2009; Pedro et al. 2014) prokázaly, že čím je vyšší pevnost matečního betonu, tím nižší je objemová hmotnost recyklátů. To může být způsobeno tím, že v betonech vyšších pevností se na kamenivo navázalo menší množství starého pojiva s nízkou objemovou hmotností. Kou a Poon testovali hrubé recykláty, které byly získány z betonů o pevnostech v rozmezí 30 až 100 MPa. Recykláty nevykazovaly žádné významné specifické vlastnosti v průběhu navyšování pevnosti matečního betonu (Kou a Poon 2015).

### **Zrnitost, tvar zrn a povrchová struktura recyklátů**

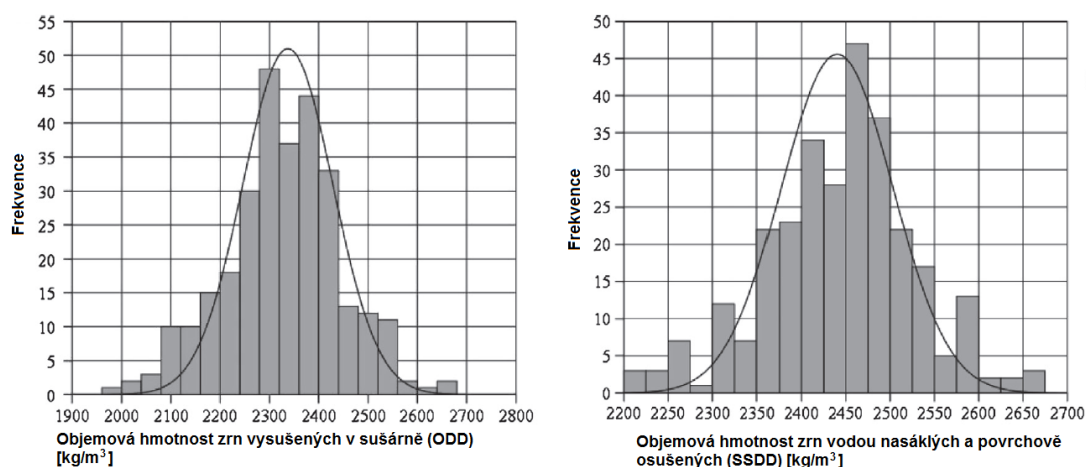
Recyklované kamenivo z drceného betonu je dle Salem et al. (2003) bez větších problémů použitelné a shoduje se společně s Zaharieva et al. (2003) na hrubším povrchu recyklátu a drsnější struktuře, oproti přírodnímu drobnému kamenivu, a to z důvodu přítomnosti staré malty mezi zrny, která má tendence štípat se na ostřejší tvary zrn. Rao (2010) pomocí křivek zrnitosti recyklovaného a přírodního kameniva prokázal, že hrubé recyklované kamenivo je jemnější než hrubé přírodní kamenivo. Obsah jemných částic (menších než 4,75 mm) byl přibližně totožný.

---

<sup>88</sup> Youngův modul

## Objemová hmotnost

Tento parametr je užitečný při dávkování betonových směsí podle objemu. U kameniva rozlišujeme objemovou hmotnost zrn vysušených v sušárně ( $\rho_{rd}$ )<sup>89</sup>, objemovou hmotnost zrn vodou nasáklých a povrchově osušených ( $\rho_{ssd}$ )<sup>90</sup> a objemovou hmotnost zrn předem vysušených ( $\rho_p$ )<sup>91</sup>. Obecně platí, že z důvodu nižší objemové hmotnosti staré malty (cementového tmele), přítomné v rámci zrn recyklovaného kameniva, je objemová hmotnost recyklovaného kameniva nižší, než tomu je u přírodního kameniva (Rao a B 2019). Starší výzkumy (Building Contractors Society of Japan 1978; Hasaba et al. 1981; Hansen a Narud 1983) prokázaly, že se  $\rho_{ssd}$  se pohybuje v rozmezí 2290 až 2510 kg/m<sup>3</sup>. Hodnota se zvyšuje zpravidla v závislosti na velikosti jednotlivých zrn. Nováková a Mikulica (2016) však naměřili objemové hmotnosti  $\rho_{ssd}$  recyklátů od 2160 do 2350 kg/m<sup>3</sup>, kde frakce 8–16 mm vykazovala nižší  $\rho_{ssd}$ , oproti frakci 4–8 mm. Z dalších výzkumných testů (Silva et al. 2014) bylo nalezeno hodnot  $\rho_{ssd}$  a  $\rho_{rd}$  hrubého kameniva 2158, resp. 2442 kg/m<sup>3</sup>. Na základě obsáhlé rešerše mnoha výzkumných příspěvků pak Silva definoval normální rozložení průběhu  $\rho_{ssd}$  a  $\rho_{rd}$  viz Obr. 11.



Obr. 11 Normální rozložení ODD (vlevo) a SSDD (vpravo) (Silva et al. 2014)

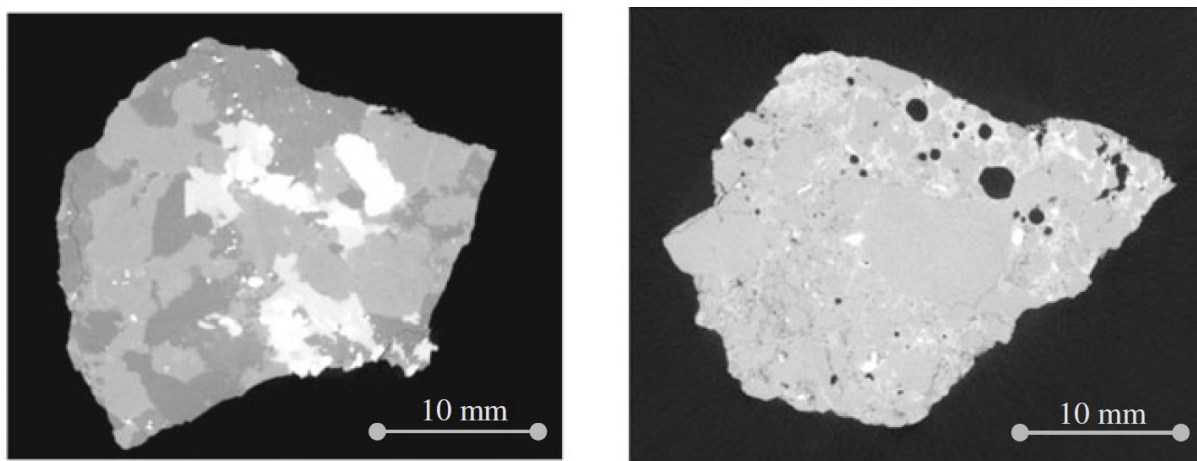
Pepe (Pepe 2015a) provedl testy na vnitřní morfologii přírodního a recyklovaného kameniva pomocí 3D CT scanneru, kde je podle barevných rozdílů z 2D řezů, viz Obr. 12, možné pozorovat vnitřní kolísání hutnosti, tedy i objemové hmotnosti (tmavší oblasti vykazují vyšší

<sup>89</sup> z angl. oven-dried particle density, zkráceně ODD.

<sup>90</sup> z angl. saturated and surface-dried particle density, zkráceně SSDD.

<sup>91</sup> z angl. pre-dried particle density.

hutnost a světlejší nižší hutnost). Dále bylo zjištěno, že recyklované kamenivo má výrazně vyšší procento porézních skvrn a mikrotrhlin, způsobených pórovitostí starého cementového tmele, připojeného k zrnům původního přírodního kameniva.



Obr. 12 CT 3D scan analýza kameniva (2D řezy): přírodního (vlevo) a recyklovaného (vpravo) (Pepe 2015a)

### Nasákavost

Jedním z hlavních rozdílů přírodního a recyklovaného kameniva je nasákavost, která je pro recyklát mnohem vyšší vzhledem k přítomnosti starého cementového tmele, vázaného na zrna kameniva. Rao (2010) zjistil, že recyklované kamenivo má 2,7 až 3,5násobně vyšší nasákavost oproti přírodnímu. Katz (2003) prezentoval hodnoty pro hrubé a jemné kamenivo v intervalu od 3,2 % do 12 % dle jednotlivých frakcí. Poon et al. (2004) publikovali, že nasákavost recyklátů je vyšší v případě matečního betonu, získaného z běžného betonu, oproti vysoko hodnotným betonům (HPC), kde je nasákavost kameniva nižší. Xuan et al. (2016) deklarovali závislost mezi nasákavostí a množstvím starého cementového tmele, vázaného k zrnům a autoři De Juan a Gutiérrez poté vztah definovali jako:

$$y = 0,18x + 0,36 \quad (R^2 = 0,5) \quad (1)$$

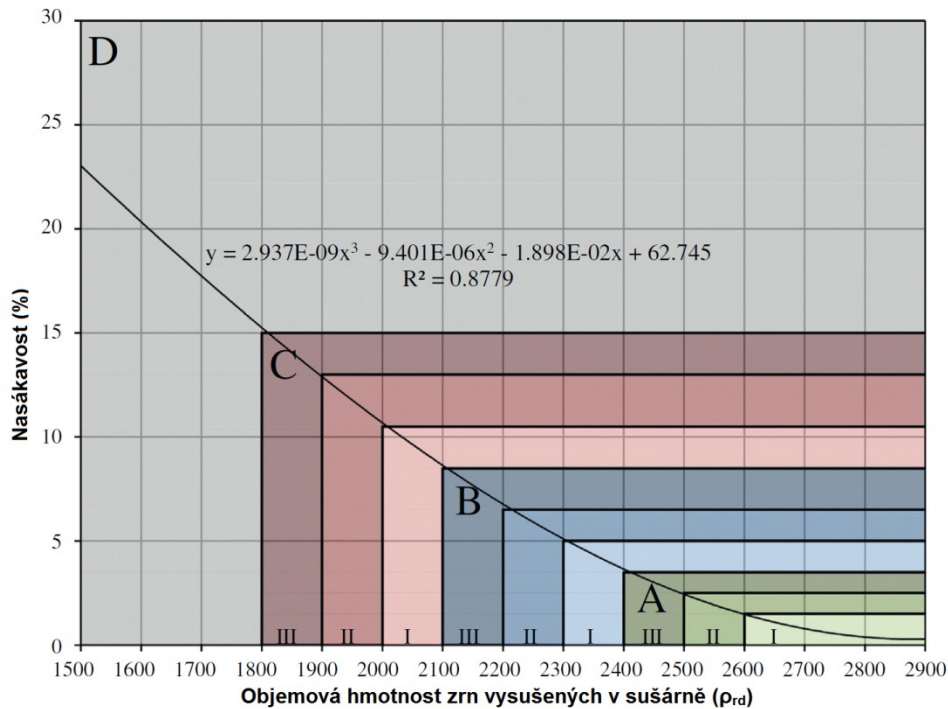
, kde  $y$  je nasákavost a  $x$  je množství vázaného cementového tmele (Sánchez De Juan a Gutiérrez 2009).

Nasákavost rovněž ovlivňuje objemová hmotnost, kde při nižší objemové hmotnosti je recyklát více nasákový. Vzájemný vztah stanovil Silva na základě podrobné rešerše na 589 typech kameniv (Silva et al. 2014):



$$WA = A_3 \times \rho_{rd}^3 + A_2 \times \rho_{rd}^2 + A_1 \times \rho_{rd} + A_0 \quad (R^2 = 0,8779) \quad (2)$$

, kde WA je nasákavost a ODD je objemová hmotnost  $\rho_{rd}$ . Hodnoty  $A_0$  až  $A_3$  lze nalézt v Obr. 13. Graficky pak zařídil kamenivo do skupin A až D, kde Skupina A je nejkvalitnější a skupina D je nejméně kvalitní recyklát.



Obr. 13 Klasifikace kameniva na základě vztahu mezi nasákavostí a objemovou hmotností (Silva et al. 2014)

Nasákavost tedy závisí hlavně na pevnosti betonu, z něhož pochází recyklované hrubé kamenivo a na velikosti zrn hrubého kameniva. Kamenivo získané z betonu s vyšší pevností bude mít vyšší množství cementového tmele a tím i vyšší absorpci vody (Rao 2019).

### Odolnost proti drcení metodou Los Angeles

Recyklované kamenivo má odolnost proti drcení (někdy též otlukovost) závislou na pevnosti matečního betonu. Čím větší je pevnost původního betonu, tím menší je Los Angeles (dále jen LA) index (Hansen a Narud 1983). Shayan a Xu (2003) zjistili hodnotu LA pro recyklované kamenivo 32 %, Rao (2019) zjistil hodnoty 33,5 %; 34,4 % a 36,7 %. Z uvedeného vyplývá, že hodnoty drcení recyklovaného hrubého kameniva jsou téměř dvojnásobné, než je tomu u přírodního kameniva, u kterého kde bylo dosaženo hodnoty 17,37 %. Autoři Sánchez De Juan a

Gutiérrez (2009) prezentovali vztah mezi LA a obsahem cementového tmele. Naopak, dle Zegy a kol. (2010) nemá poměr cementu a vody matečního betonu na LA index žádný zásadní vliv.

### **Tvar zrn (index plochosti a tvarový index)**

Sledovaným parametrem nejen recyklovaného kameniva, ale kameniva do betonu obecně, je index plochosti<sup>92</sup> dle normy ČSN 933-3<sup>93</sup> a tvarový index<sup>94</sup> dle normy ČSN 933-4<sup>95</sup>. Výsledky zpravidla ukazují, že recyklovaná hrubá kameniva vykazují lepší tvar zrn ve srovnání s přírodními kamenivy. To je způsobeno použitím metod drcení, především v případě ručního drcení.

### **2.1.8. Dílčí závěry z rešerše vlastností recyklovaného kameniva**

Z výše prezentované rešerše je patrné, že recyklované kamenivo má v mnoha směrech horší fyzikální a mechanické vlastnosti než kamenivo přírodní. Jedním z hlavních faktorů, který má omezující potenciál, je kvalita matečního betonu, a sice přítomnost pórovité složky původního cementového tmele na zrnech recyklovaného kameniva. Vztahy mezi různými fyzikálními a mechanickými veličinami a cementovým tmelem však byly již v minulosti experimentálně stanoveny a tento fakt zvyšuje možnost predikovat vlastnosti recyklovaného kam. Pro empirické deklarování vlastností recyklovaného kameniva však bude nutno četnost experimentů ještě navýšit.

---

<sup>92</sup> z angl. Flakiness Index (zkratka FI).

<sup>93</sup> ČSN EN 933-3 (2008) Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 3: Stanovení tvaru zrn – Index plochosti (Český normalizační institut 2008b).

<sup>94</sup> z angl. Shape Index (zkratka SI).

<sup>95</sup> ČSN EN 933-4 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index (Český normalizační institut 2008c).

### 2.1.9. Sledované parametry recyklovaného betonu

Parametry čerstvého a ztvrdlého betonu, tvořeného recyklovaným kamenivem, ovlivňují parametry původního matečního betonu, ze kterého pochází recyklát, poměr vody ku cementu (vodní součinitel), velikost zrn (frakcí) a vlhkost recyklátu a další vlastnosti. Mnoho výzkumných pracovníků studovalo vliv různých vlastností recyklovaného hrubého kameniva s různým podílem přírodních a recyklovaných kameniv na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu (Rao a B 2019). Složení čerstvé betonové směsi, tedy kombinace kameniva, vody, přísad a příměsí musí být určena tak, aby byla splněna veškerá kritéria požadovaných vlastností jak pro čerstvý beton, tak pro ztvrdlý beton (Dočkal 2005).

Zpracovatelnost čerstvého betonu závisí na vhodném dávkování složek betonu a umožňuje provedení zamýšleného způsobu namíchání, dopravy, umístění a zhutnění čerstvého betonu bez segregace jednotlivých složek. Zpracovatelnost mohou ovlivnit různé faktory, jako např. druh a vlhkost recyklovaného kameniva, nasákavost, maximální velikost zrna, hmotnostní poměr vody a cementu, pevnost matečního betonu, nebo také fyzikální vlastnosti kameniva (Dočkal 2005; Behera et al. 2014; Rao a B 2019).

Vzhledem k výše zmíněnému faktu, že recyklované kamenivo disponuje vyšší hodnotou nasákavosti, ovlivňuje zpracovatelnost směsi. V literatuře je možné setkat se v konjunkci s návrhem betonové směsi s praktikami přidání vody na ovlhčení recyklovaného kameniva, případně s předběžnou úpravou kameniva kyselinami<sup>96</sup>, které mohou redukovat nasákavost až o 7,27% až 12,17% (Tam et al. 2007). Grabiec a kol. (2012) využili pro docílení poklesu nasákavosti biodepozice zrn recyklovaného kameniva bakterií *Sporosarcina pasteurii*<sup>97</sup>.

Pro dosažení stejné konzistence jako při použití přírodního kameniva, je nutno přidat až o 15% více vody, určené na ovlhčení zrn recyklovaného kameniva (Sagoe-Crentsil et al. 2001). To však může mít za následek úbytek finální pevnosti a trvanlivosti recyklovaného betonu (Rao 2019). Obdobný vliv na zpracovatelnost má vlhkost kameniva. Bylo zjištěno, že směs z recyklovaného kameniva, které bylo vysušeno v sušárně, mělo v prvních 15 až 30 minutách výrazný úbytek hodnot sednutí kužele z důvodu vsaku vody do zrn kameniva. Naopak směs z vlhkého

---

<sup>96</sup> Využívají se kyseliny HCl; H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nebo H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

<sup>97</sup> *Sporosarcina pasteurii*, dříve známa jako *Bacillus pasteurii* je bakterie, která má schopnost vysrážet kalcit a zpevnit tak strukturu betonu (Lauchnor, a další, 2013).

recyklovaného kameniva vykazovala větší sednutí kužele, než stejně proporční směs z přírodního kameniva (Mefteh et al. 2013).

Pevnost betonu v tlaku se zvyšuje se stářím betonu. Rychlost vývoje pevnosti v tlaku závisí především na hydratačním procesu cementu, který závisí na jemnosti a povrchové ploše cementu, resp. přítomnosti trikalciumpilikátu ( $C_3S$ ). Čím více je  $C_3S$ , tím je rychlost hydratace rychlejší a zvyšuje se i vývoj pevnosti. Kromě toho, pevnost v tlaku recyklovaného betonu závisí také na poměru vody a pojiva (cementu), různých vlastnostech a množství recyklovaného kameniva, množství cementového tmele navázaného na zrna recyklovaného kameniva, pevnosti matečního betonu, přídavku sekundárních cementových materiálů a dalších faktorech (Rao a B 2019). Pevnost v tlaku recyklovaného betonu je obecně menší, než betonu z přírodního kameniva (Rao a B 2019). Katz (2004) kamenivo ultrazvukově vyčistil a následně povrchově impregnoval 10 % hmotnosti kameniva pěnou z mikrosiliky, poté byl zaznamenán 23–33% nárůst 7denní pevnosti a 15% nárůst 28denní pevnosti. Ultrazvukové čištění vyvolalo 7 % zlepšení pevnosti bez jasného rozdílu mezi zlepšením v počáteční či konečné pevnosti.

### **2.1.10. Dílčí závěry z parametrů recyklovaného betonu**

Z výše uvedené rešerše je možné stanovit východiska pro další práci. V rámci metod této práce budou využity normové požadavky na ověření kvality recyklovaného kameniva prostřednictvím série testů na odebraných vzorcích. Bude kladen důraz především na české normy, ačkoliv zahraniční standardy by mohly napomoci větší substituci kameniva pro nové recyklované betony. Rovněž pro stanovení receptur bude užito českých norem a užita hmotností rovnice společně s Fullerovými křivkami stanovení poměrů hrubého a jemného kameniva.

## 2.2. PROBLEMATIKA PREFABRIKOVANÝCH PANELOVÝCH BUDOV

Pro definování stávající materiálové základny prefabrikovaných panelových budov byla provedena rešerše, ze které je možné uvést základní historická fakta o vývoji panelových konstrukčních soustav, dimenzích, technologii výstavby a způsobech montáže. Důraz v rešerši konstrukčních soustav je kladen především na materiály nosných prefabrikovaných prvků. Jsou podrobně rozebrány faktory, které ovlivňují stavebně technickou kondici a vývoj degradací materiálů, užitých v panelových budovách. Následuje problematika životního cyklu budov a s ní související způsoby dodávky výstavbových projektů. Ty mají vliv na náklady po celý životní cyklus budovy.

Rozsah problematiky panelových budov v centrální a východní Evropě dán především některými statistickými údaji. Dle Českého statistického úřadu (ČSÚ)<sup>98</sup> je v České republice 214 760 bytových domů. Z tohoto počtu je 65 641<sup>99</sup> bytových domů ze stěnových panelů, což je 30,56 %. V bytech panelových domů bydlí 26,79 % obyvatel ČR, což je přibližně 2 760 142 osob. V těchto budovách se nachází celkem 1 218 788 bytů, což je 29,69 % ze všech bytů v ČR. Počet bytů je se sníženou kvalitou bydlení je 66 831, což odpovídá přibližně 5,5 % všech bytů (Český statistický úřad 2019b).

### 2.2.1. Historie panelových budov

Počátek prefabrikované panelové výstavby pro účely bydlení je datován ke konci druhé světové války, kdy bylo nutno podstatnou část zničených obytných budov levně, a především rychle nahradit. První realizace montovaných objektů se však objevovaly již před válkou. Americký vědec a vynálezce Thomas Alva Edison<sup>100</sup> nechal postavit kolonii dělnických domů panelovou technologií již počátkem 20. století v Haworthu (Collins 2004). Především možnost rychle zrealizovaných bytů v prefabrikovaných domech, oproti tradiční zděné výstavbě, dala

---

<sup>98</sup> Data ČSÚ ze sčítání lidu, domů a bytů ze dne 26. 3. 2011.

<sup>99</sup> Dle statistiky ČSÚ bylo postaveno celkem 65 464 bytových domů ze stěnových panelů s uvedením doby výstavby. U 177 domů nebyla zjištěna doba výstavby. Ostatní doložené hodnoty vycházejí z hodnoty 65 641.

<sup>100</sup> Thomas Alva Edison, \*11. 2. 1847; +18. 10. 1931; americký vynálezce a podnikatel, zakladatel prestižního vědeckého časopisu Science.

---

po únoru 1948 v Československu za vznik státním organizacím<sup>101</sup>, které se touto technologií začali zabývat naplno.

V této době byla definována nová terminologie, která byla s prefabrikovanou výstavbou úzce spojena. Jedná se o unifikaci, normalizaci a typizaci modulovou koordinaci rozměrů, následnou prefabrikaci. V souvislosti se samotnou realizací byl kladen důraz na hospodárnost, zvýšení produktivity práce, řešení plynulosti a zkracování celkové doby výstavby. Prvním pokusem částečné prefabrikace je tzv. kvádrový systém, který byl realizován v letech 1948 až 1955. Jednalo se o klasický zděný systém s podélnými stěnami, avšak ty byly sestavovány z předem vyzděných kvádrů o výšce nejprve 1/3 podlaží, poté 1/2 podlaží z cihel CDm<sup>102</sup>. Později byly tyto kvádry nahrazeny kvádropanely ze středně těžkých a lehkých betonů – škvárového, struskopemzového, cihlového, tufového apod., a následně blokopanely. Výška blokopanelu byla rovna výšce celého podlaží. Blokopanely byly využívány pouze pro výstavbu nižších objektů do čtyř podlaží. Od roku 1957 byly užívány pórobetonové blokopanely.

Samotná industrializace a fabrikace stavebnictví, tedy idea plné mechanizace a přesunu výroby mimo staveniště však vyvodila zvýšené nároky na přesuny objemných prvků. Rovněž zvedací mechanismy podléhaly vývojem. Požadavky na komplexní mechanizaci a industrializaci výroby uspokojily až plně montované celostěnové panelové systémy. Převážná část systémů využívá příčného nosného systému, ale objevují se i nosné systémy obousměrné či buňkové. Nosné stěnové panely jsou prvky vyráběné převážně z těžkého nebo lehčeného betonu (Jehlíková Janečková 2008).

Kromě téměř celého bývalého východního bloku Evropy, byly v zemích západního bloku rovněž budovány panelové domy, ačkoliv četnost nedosáhla tak masivní výstavby ve východní Evropě. Z mnoha příkladů lze uvést v tehdejší západní Německu sídliště Neuperlach (1974 až 1980) v Mnichově (Hartard 2003), sídliště Neue Vahr (1956 až 1962) v Brémách (Bremer Zentrum für Baukultur 2019) nebo sídliště Mümmelmannsberg (1972 až 1979) v Hamburku (Architekturmuseum der TU München 2019). Dále pak sídliště Alt-Erlaa (1973 až 1986) ve Vídni (Architectuur 2019), sídliště Fittja (1966 až 1972) v Tensta (Botkyrka kommun 2019) a

---

<sup>101</sup> Hlavní projektovou a inženýrskou organizací byl Stavoprojekt. V roce 1949 měl 4 500 zaměstnanců, v roce 1953 měl Stavoprojekt již 11 000 zaměstnanců a stal se tak největší stavební organizací v Evropě a pravděpodobně i na světě. Pod ním působila celá řada krajských projektových ústavů (KPÚ). Realizaci staveb zajišťovaly lokální organizace Pozemní stavby a další národní podniky (Zarecor 2011).

<sup>102</sup> CDm – cihla děrovaná maloformátová.

Rinkeby (1968 až 1971) ve Stockholmu (City of Stockhom 2019), sídliště Rosengård (1967 až 1972) v Malmö (Morell 2007), sídliště Bijlmermeer (1968 až 1975) v Amsterdamu (Helleman a Wassenberg 2004) nebo budovy v Heath Town (1967 až 1969) v části města Wolverhampton v Anglii (Brassington 2018). V zámoří se pak objevují sídliště St. James Town (1959 až 1965) v kanadském Torontu, sídliště v Chicagu (1949 až 1968) nebo sídliště Pruitt-Igoe (1954 až 1956) v St. Louis v USA, které bylo v roce 1976 zdemolováno z důvodu vzniku ghetta. V Asii pak např. sídliště Jongin v Jižní Koreji nebo Cheung Sha Wan Estate (1963 až 1964) v Honk Kongu. V některých zemích (např. Indie, Malajsie nebo USA) se realizují prefabrikované panelové systémy obytných domů dodnes (Bommi et al. 2014; Lentzkow 2017).

### 2.2.2. Konstrukční soustavy panelových budov

Panelové systémy byly v Československu (ČSR) vyvíjeny jako ucelené systémy, tzv. konstrukční soustavy. První zárodek konstrukční soustavy je systém zděných cihelných typových domů z kvádropanelů a blokopanelů, označován písmenem T<sup>103</sup>. Byly to domy s označením T1, T5, T11 až T17, T20, T22, T42, T52, T 01 B až T 03 B (Šála a Machatka 2002). Unifikace rozměrů soustav byla hlavním omezujícím faktorem, co se týče rozponů, a tím i vnitřních dispozic panelových domů. Dimenze panelů, tzn. jejich tloušťka a převažující rozměry předdefinovaly rozpon dané konstrukční soustavy. Obvodové panely postupem vývoje soustav respektovaly lokální surovinové a klimatické podmínky. V pokročilejších variantách byla také jedním z faktorů dimenzování i sendvičová skladba obvodových panelů s vloženou tepelnou izolací. Nosné stěny jsou zpravidla tl. 140 až 150 mm, stropní panely pak 100 až 150 mm (Čechová 2015). Vývoj soustav probíhal nepřetržitě od roku 1954 až do roku 1989 a realizace některých 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. Dle lokalizace a místních variant pak lze konstrukční soustavy rozdělit do základních kategorií dle Tab. 4.

---

<sup>103</sup> T – typový (dům). Označení vycházela z typizačního sborníku (1946–1950) bývalého ministerstva techniky (Skřivánková 2017).

**Tab. 4 Lokalizace typů panelových soustav - rozdělená podle krajů ČSR (Barták 1997)**

Název soustavy	Praha	Střední Čechy	Západní Čechy	Severní Čechy	Jižní Čechy	Východní Čechy	Severní Morava	Jižní Morava	Poznámka
G40	•	•						•	
G56, G58, G59 G55							•	•	Pouze prototypy G55 = rohová varianta G40
G57	•	•	•	•					
G 32		•	•						Varianta G 57 pro Karlovarsko, se sedlovou střechou
G 57 OL							•	•	
B 60 (G57)								•	Obdoba G 57 pro Jižní Moravu
G OS 64, 65 (G 57)							•		Obdoba G 57 pro Ostravsko
T 05 B (T 06 B)			•						
T 06 B	•	•		•					
T 06 B – U, E, KV, KD, OS, OL...			•	•		•	•	•	Včetně krajových modifikací byla realizována v celé ČSR
T 07 B									
T 08 B	•	•		•					
T 09 B		•							Soustava určena pouze pro svépomocnou výstavbu o 2 až 3 NP
PS 61		•	•			•			
HK 60, 65						•			
B(B2, B4)					•				
PS 69			•	•	•				
VM-OS, V-OS, VP-OS							•		
Larsen-Nielsen	•								
BANKS I/1L				•					
HKS – 69, 70, HKS -G				•		•		•	
B70 – R, 360, SČ, OS				•			•	•	
VVÚ – ETA	•	•							
OP 1.11, 1.21, 1.31	•						•	•	OP 1.21 určena od r. 1984 pro celou ČSR

### 2.2.3. Faktory, ovlivňující stav panelových budov

Kapitola shrnuje základní poznatky o faktorech, které stavbu ovlivňují. Pojmy stáří, životnost, spolehlivost, degradace či kvalita jsou úzce spjaty s dalšími rozhodovacími proměnnými,



kteřé mohou pomoci určit, zda je vhodné objekt částečně či kompletně opravit (udržovací práce), upravit (revitalizace, regenerace apod.) nebo zlikvidovat (demolice). Toto rozhodnutí je v praxi často podloženo kombinací ekonomických, ekologických a technologických důvodů. Fyzický stav bytových domů je kombinací ovlivňujících faktorů. V počátcích výstavby chyběly zkušenosti s montovanými technologiemi, což se projevilo v nedostacích projektových řešení. Výběr stavebních materiálů ovlivnila také tehdejší cenová regulace, kdy se často využívaly materiály nižší kvality. Kvalita vyrobených dílců byla nedostatečná a nezlepšovala se ani po letech realizací a vývoje technologických zařízení. Významný vliv na životnost má u prefabrikovaných domů nedodržování technologických postupů, nerespektování projekčních parametrů, nevhodné zjednodušování konstrukčních detailů a pracovních postupů nebo zrychlování doby výstavby na úkor kvality provedení. Roli zde hraje také nekvalifikovaná a zanedbávaná údržba v průběhu užívání panelových objektů, kdy obyvatelé objektů neměli k budově vlastnický vztah (Sternová et al. 2001; Witzany et al. 2010).

Nedostatky panelových domů lze dle závažnosti kategorizovat do třech celků (Sternová et al. 2001).

- Nedostatky, které ohrožují bezpečnost užívání (např. pokles základů a vznik trhlin v nosných konstrukcích, odpadávání částí konstrukcí vlivem ztráty součinností konstrukcí, koroze výztuže, styků panelů apod.).
- Nedostatky, které snižují užitnou hodnotu, zvyšují provozní náklady a časem mohou způsobit ohrožení zdraví (nedostatečné tepelně-izolační vlastnosti, zatékání střešní konstrukcí a obvodovým pláštěm, nedostatečné větrání, špatné akustické parametry mezibytových konstrukcí a výplní otvorů apod.).
- Nedostatky, které jsou způsobeny končící životností stavebních konstrukcí a technického zařízení budov (instalační jádra, poddimenzované rozvody médií a elektroinstalace, výtahy nevyhovující současné legislativě apod.).

Již v roce 1969 vydala Vláda ČSR usnesení o odstranění vad panelové bytové výstavby. Toto usnesení však nebylo naplněno, z důvodu vytížení stavebních podniků výstavbou bytových domů nových a na opravy jim nezbývala kapacita (Rojík et al. 1974).

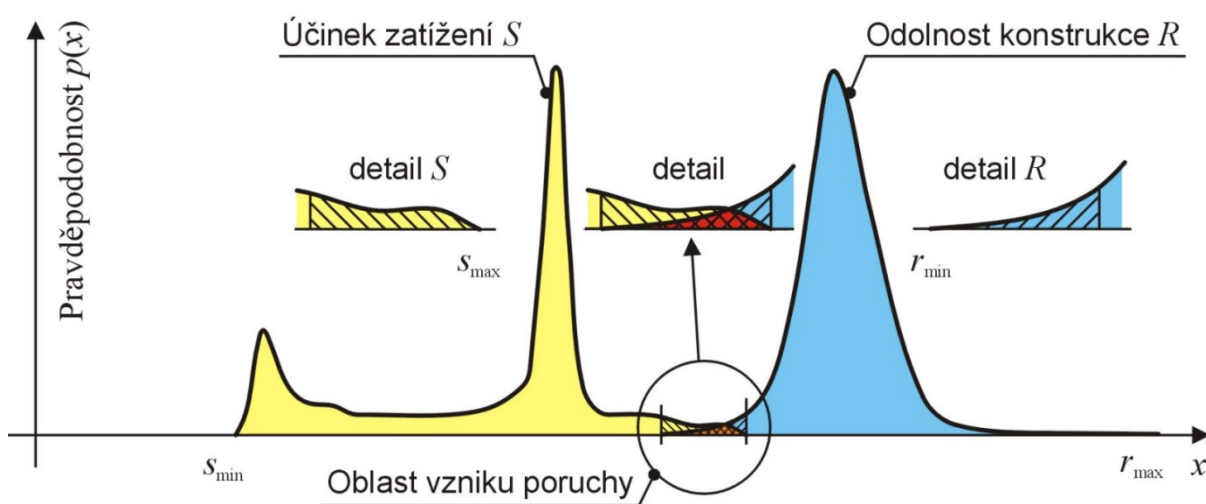
## Spolehlivost

Jedním z předpokladů zachování kvality stavby v průběhu času je spolehlivost konstrukce

či stavby. Za spolehlivou stavbu nebo konstrukci lze považovat tu, která má takové hodnoty spolehlivosti, které udržují kvalitu celého systému po celou dobu životnosti. Pro posouzení spolehlivosti a bezpečnosti stavebních nosných konstrukcí je možné použít deterministické (historické a empirické metody) nebo pravděpodobnostní metody (úroveň II a plně pravděpodobnostní metody úroveň III). U deterministických metod lze konstatovat, zda konstrukce vyhoví nebo nevyhoví. Spolehlivost stavebních konstrukcí je definována rovněž aktuálně platnou normou ČSN EN 1990<sup>104</sup> (Český normalizační institut 2004), kde jsou uvedeny požadavky na management spolehlivosti. I když norma připouští použití deterministických metod, blíže specifikuje pouze postup pravděpodobnostních metod:

- plně pravděpodobnostní metody (úroveň III) poskytují v zásadě správné řešení daného problému spolehlivosti. Metody úroveň III se však pro kalibraci návrhových předpisů běžně nepoužívají, neboť je obvykle nedostatek statistických údajů,
- metody úroveň II využívají určitých dobře definovaných aproximací a jejich výsledky lze pro ověřování většiny konstrukcí považovat za dostatečně přesné.

Míru spolehlivosti lze vyjádřit pomocí pravděpodobnostních metod, a to pomocí ukazatelů spolehlivosti (index spolehlivosti  $\beta$  a jeho vztah k pravděpodobnosti poruchy  $P_f$ ).



**Obr. 14** Křivky hustoty pravděpodobnosti účinku zatížení  $S$  a odolnosti konstrukce  $R$  s vyznačenou oblastí možného vzniku poruchy (Krejsa a Konečný 2012)

Na Obr. 14 je patrný princip pravděpodobnostních metod II a III úrovně. Konstrukce by

<sup>104</sup> ČSN EN 1990 Eurokód - Zásady navrhování (Český normalizační institut 2004)

měla být navržena tak, aby odolnost konstrukce R byla větší než je účinek zatížení S. Průnik křivek funkcí hustoty pravděpodobnosti odolnosti R a účinku zatížení S pak charakterizuje oblast pravděpodobného vzniku poruchy (Krejsa a Konečný 2012). Normové požadavky spolehlivosti konstrukcí v době panelové výstavby byly definovány v tehdejších, již neplatných normách<sup>105</sup>. Pro spolehlivost platila ČSN 73 0031 Spolehlivost stavebních konstrukcí a základových púd. Základní ustanovení pro výpočet (z roku 1977 a 1990).

## Životnost

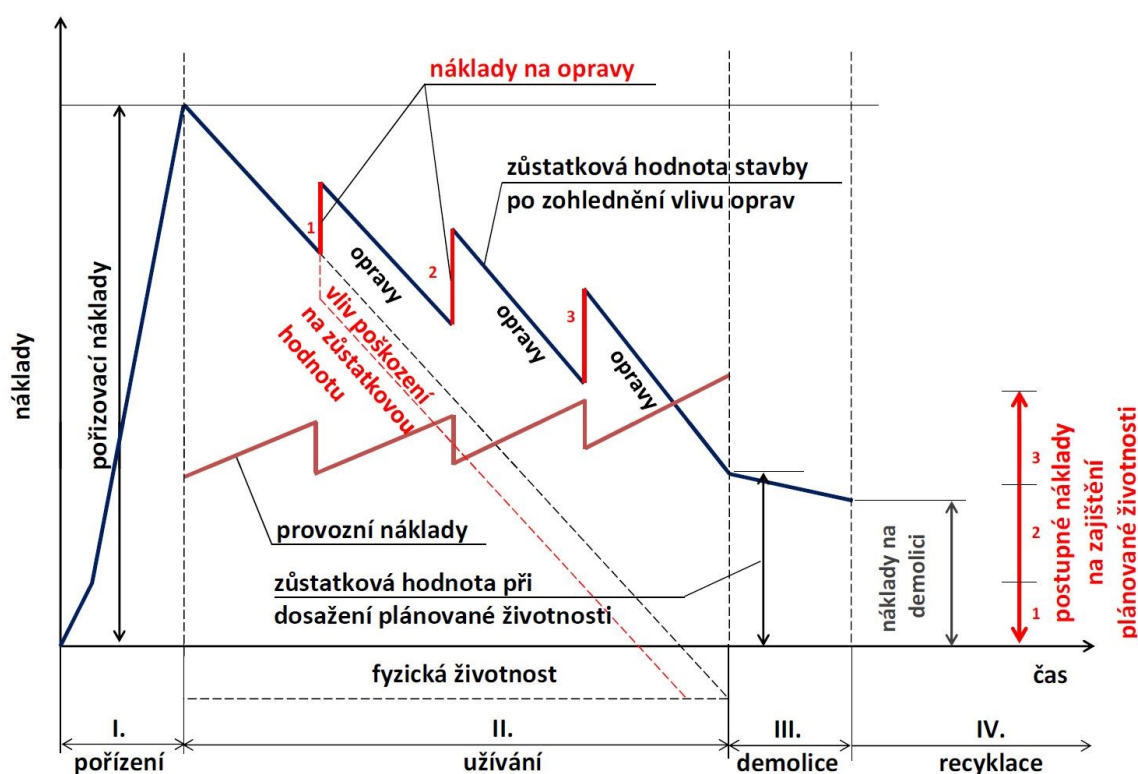
Se spolehlivostí je spjata životnost konstrukce (objektu). Životnost je vlastnost, zaručující požadovanou funkci konstrukce vzhledem k času a za požadovaných provozních podmínek. Je to tedy doba, kdy degradační procesy dosahují takové úrovně, jenž nebrání funkci a provozu. Doba životnosti je dána dosažením určité hranice spolehlivosti. Zároveň celkové náklady na opravy nepřevyšují zůstatkovou hodnotu stavby viz Obr. 15 (Šmejkal 2010; Witzany et al. 2010).

Rozeznáváme základní dělení životnosti konstrukcí (Šmejkal 2010; Witzany et al. 2010):

- **návrhová životnost (fyzická)** – je doba, po kterou je objekt funkční dle původních požadavků a lze jej bez problému užívat. Ztráta plnit tyto požadavky je dána důsledkem ztrát fyzikálně-mechanických vlastností, mechanického narušení, fyzického opotřebení, nadměrného trvalého přetvoření či deformací nebo změně technických požadavků,
- **funkční životnost (morální)** – je doba užívání konstrukce až do doby jejího funkčního zestárnutí a ztráty schopnosti plnit požadavky hygienické, provozně dispoziční nebo kvalitativní požadavky na vnitřní prostředí. Souvisí se změnou životního stylu a úrovně uživatelů a společnosti, technickým pokrokem apod.,
- **ekonomická životnost** – je doba používání konstrukce až do doby, kdy je ekonomicky výhodnější ji nahradit než ji dále provozovat. Je to doba, po kterou si stavba zachovává svou užitnou hodnotu.

---

<sup>105</sup> Od r. 1964 byly definovány druhy norem: státní norma (ČSN), oborová norma (ON) a podniková norma (PN).



Obr. 15 Schéma investičního cyklu (graficky upraveno) (Witzany et al. 2010)

Při návrhu stavby je jedním ze vstupních požadavků doba informativní návrhové životnosti. Návrhové životnosti jsou tabulkově definovány aktuální normou<sup>106</sup>, viz Tab. 5 (Český normalizační institut 2004).

Tab. 5 Informativní návrhové životnosti dle Tabulky 2.1 normy ČSN EN 1990 (Český normalizační institut 2004)

Kategorie návrhové životnosti	Informativní návrhová životnost (v letech)	Příklady
1	10	Dočasné konstrukce (1)
2	10 až 25	Vyměnitelné konstrukční části, např. jeřábové nosníky, ložiska
3	15 až 30	Zemědělské a obdobné stavby
4	50	Body a další běžné stavby
5	100	Monumentální stavby, most a jiné inženýrské konstrukce

<sup>(1)</sup> konstrukce nebo její části, které mohou být demontovány s předpokladem dalšího použití, se nemají považovat za dočasné.

<sup>106</sup> ČSN EN 1990 Eurokód - Zásady navrhování (Český normalizační institut 2004)

Životnost panelových domů nebyla ve fázi výstavby nijak podrobně řešena. Tato forma bydlení byla plánována jako dočasná 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. Životnost bytového domu obecně můžeme odhadovat na 80 až 100 let a proto i životnost panelového domu může vykazat podobnou životnost za předpokladu vhodné a pravidelné údržby (Hézl 2003; Venkrbec et al. 2012).

### **Trvanlivost**

Konstrukce objektu musí splňovat rovněž požadavek trvanlivosti. Trvanlivost je synergií působení použitelnosti, pevnosti a stability po celou dobu návrhové životnosti stavby. Dle normy musí být konstrukce navržena tak, aby degradační procesy během její návrhové životnosti, za předpokladu náležité údržby s ohledem na okolní prostředí, nenarušily její provozuschopnost více, než je přípustné (Český normalizační institut 2004). Z hlediska trvanlivosti může být u betonových konstrukcí stanovena tzv. přijatelná mez porušení, viz Obr. 16 (Šmejkal 2010). Tato mez může být porušení betonu vlivem např. působení střídavého zmrazování a rozmrazování betonu či působení agresivních látek nebo koroze výztuže (Šmejkal 2010).

Zajištění trvanlivosti je specifikováno v normě ČSN EN 1990 (Český normalizační institut 2004) jako uvážení následujících hledisek:

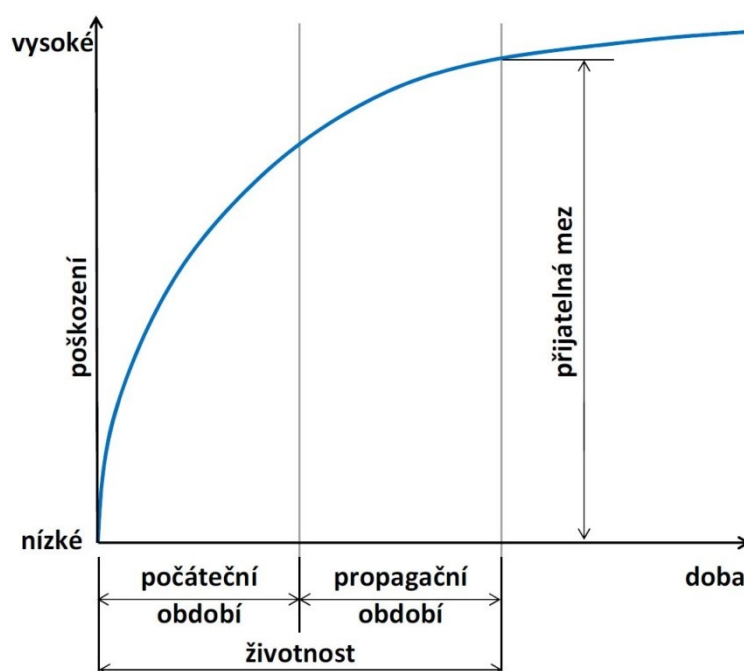
- stanovené nebo předpokládané používání konstrukce,
- požadovaná návrhová kritéria,
- očekávané vlivy prostředí,
- složení, vlastnosti a funkční vlastnosti materiálů a výrobků,
- vlastnosti základové půdy,
- volba nosného systému,
- tvar prvků a konstrukční opatření,
- jakost řemeslné práce a úroveň kontroly,
- konkrétní ochranná opatření,
- stanovená údržba během návrhové životnosti.

U panelové výstavby bylo dosaženo mnoho nedostatků v každém z těchto požadavků. Je nutno podotknout, že normové požadavky v době panelové výstavby byly odlišné. Jedním z dů-

ležitých faktorů jakosti betonových prvků je materiálová stálost při výrobě. Zabezpečení výroben ze stálých zdrojů surovin se nedařilo a běžnou praxí bylo, že do jedné výroby prvků dodávalo kamenivo 10 až 20 různých těžebních podniků. Rovněž cementové materiály byly dodávány pro jednu výrobu během roku ze zemí až dvou světadílů (Rojík et al. 1974).

## Stárnutí

Stárnutí v kontextu materiálů je přirozený a nevratný proces technické degradace a zároveň snižování ekonomické hodnoty objektu. Po uplynutí předpokládané doby životnosti, tj. v okamžiku, kdy stárnutí dosáhne mezní hranice užitelnosti resp. přijatelné mezní hranice poškození, viz Obr. 16 Model poškození konstrukce v čase (Šmejkal 2010), je potřeba provést řádný, velmi podrobný technický průzkum a na jeho základě určit potřebná opatření (Hézl 2003; Hendrickson a Au 2008).

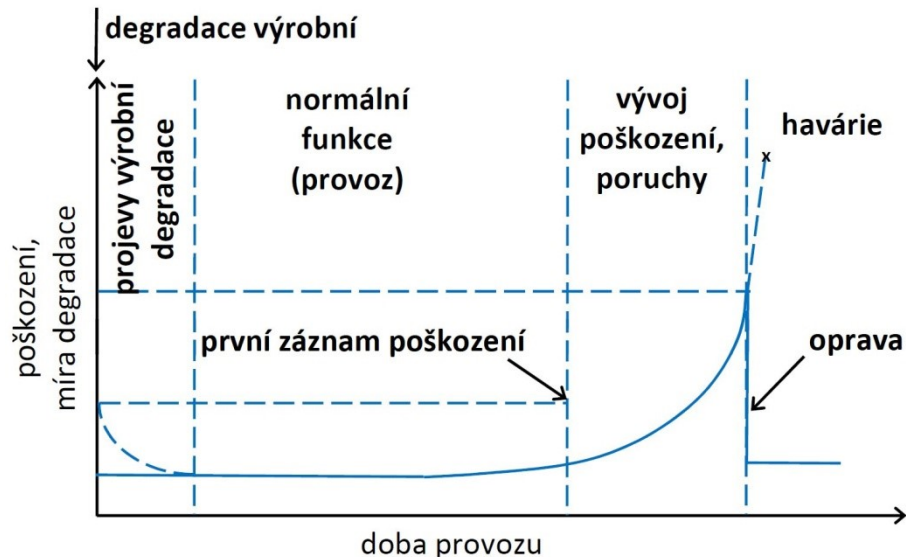


Obr. 16 Model poškození konstrukce v čase (Šmejkal 2010)

## Degradace materiálů

Každý stavební objekt se skládá z několika různých konstrukcí, které mají odlišnou materiálovou skladbu a tím i různé fyzikální a mechanické vlastnosti a chemické složení. V kombinaci se synergickým spolupůsobením vnějších podmínek (voda, teplota, agresivita prostředí

apod.) na určitý materiál dochází k degradačním procesům. Stupeň degradace může být stanoven výpočtem, experimentálně nebo z předchozích zkušeností, případně kombinací těchto postupů (Český normalizační institut 2004).



Obr. 17 Změna technického stavu v závislosti na době provozu (Lasek 2014)

Ke zhoršení vlastností materiálu vadami a defekty může dojít již v procesu výroby. Výrobek má pak odlišné technické vlastnosti, než byly původně požadované nebo předepsané. Tyto výrobní a montážní nedostatky nazýváme **degradace výrobní**. Důsledky synergie působení vnějších vlivů v době užívání stavby nazýváme **degradace provozní**. Vliv na rychlost degradace může mít i nevhodný konstrukční návrh. Následky výrobní degradace se projeví zpravidla v úvodu provozu, zatím co provozní degradace až v delším časovém horizontu. Vývoj míry degradace v čase je možné obecně znázornit křivkou degradace, viz Obr. 17 (Lasek 2014).

Podle parametrů prostředí, které degradaci urychlují, rozlišujeme základní členění degradačních procesů na (Witzany et al. 2010):

- mechanické (statické a dynamické namáhání),
- mineralogické,
- fyzikální (změny teplot a vlhkosti, mráz, požár, elektrický proud, záření),
- chemické (vliv kapalného a plynného prostředí),
- biologické (makroskopické a mikroskopické).

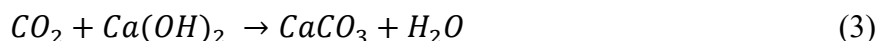
Degradační procesy, jejich intenzita a rychlost v čase, souvisí se strukturou materiálu, pře-

devším s pórovým systémem a měrnými povrchy. Tyto parametry pak ovlivňují transport vlhkosti v materiálech, která je hlavním nositelem agresivních látek, které mění chemické, fyzické či mechanické materiálové vlastnosti (Witzany et al. 2010).

Panelový objekt, stejně jako ostatní stavební objekty podléhají degradaci. Některé konstrukční prvky panelových domů vykazují nižší životnost a vyšší míru opotřebení. Z důvodu zaměření disertační práce na nosné konstrukce jako zdroj kameniva do recyklovaného betonu, řešerše dále inklinuje k prezentaci degradačních aspektů betonu, které mohou mít vliv na kvalitu vzniklého recyklátu.

Mezi základní **chemické degradační procesy** betonů patří karbonatace, sulfatace, alkalicko-silikátová reakce, alkalicko-karbonátová reakce, koroze betonu a výztuže.

Karbonatace betonu vzniká jako proces reakce oxidu uhličitého se složkami cementového tmele, především s portlanditem, za vzniku uhličitanu vápenatého. Významnou roli při procesu karbonatace má vlhkost daného materiálu. Je-li vlhkost nízká, procesy karbonatace se zastavují. Rovnice karbonatace betonu:



Karbonataci betonu můžeme rozdělit na čtyři základní fáze (Witzany et al. 2010).

- Přeměna hydroxidu vápenatého na uhličitan vápenatý (dochází k dílčímu zaplnění pórů). Vlastnosti betonu jsou v této fázi kvalitnější.
- Vznik modifikací  $CaCO_3$  a amorfního gelu kyseliny křemičité (zůstávají v pseudo-morfózách po hydratačních zplodinách maltovin). Vlastnosti betonu se příliš nemění.
- Postupná rekrytalizace cementového tmele a vznik sparitu (kalcit, aragonit). Mechanické vlastnosti se zhoršují.
- Pronikání atmosférických kyselin k výztuži, pH intergranulárního roztoku se snižuje. Ocel ztrácí pasivitu a začíná korodovat.

Sulfatace betonu je proces, kdy  $SO_2$  reaguje s hydratovanými produkty cementu a rozkládají se kalciumsilikáty a kalcit. Ve vlhkém prostředí probíhají rozkladné reakce okamžitě. Sulfatace probíhá v několika stupních. Při vlhkosti do 3 % hmotnostní vlhkosti vzniká hemihydrát siřičitanu a až poté hemihydrát síranu vápenatého. Působením další vlhkosti se pak přeměňuje na dihydrát a konečným produktem je sádrovec se značnou krystalickou strukturou. Vliv na sulfataci má vliv druh cementu, resp. použitých slínek (Witzany et al. 2010).



Alkalicko-silikátovou reakci neboli reakci alkálií s kamenivem, mohou způsobit některé formy oxidu křemičitého (opál, rohovec, pazourek, chalcedon, tridymit, cristobalit či vulkanická skla) a to i v množstvích od 1% do 5% obsahu kameniva. V betonech s takovýmto druhem kameniva může dojít ke vzniku trhlin již za 10 let (Witzany et al. 2010).

Alkalicko-karbonátová reakce je reakce alkálií (z dolomitových vápenců) a má expanzivní charakter. Ke vzniku trhlin dochází již po 5 letech (Witzany et al. 2010).

**Fyzikální degradační procesy** vznikají na základě hydratačních tlaků uvnitř struktury materiálu, vyvolaných krystalizací solí v pórech materiálu. Růst krystalů je omezen velikostmi pórů a krystaly tak vyvíjí expanzní tlaky. Při odpařování vody (dehydrataci), dochází k rozpadu krystalů a při dalším nasycení solí k jejich opětovné krystalizaci. Opakovaným procesem krystalizací a rekrystalizací dochází k rozpadu struktury. Krystalizaci na povrchu materiálu nazýváme výkvěty.

### **Stáří panelových budov**

U panelových domů probíhá proces stárnutí stejně jako u jakýchkoli jiných domů, jen s tím rozdílem, že určité konstrukční prvky a části stavby vykazují nižší životnost a vyšší intenzitu opotřebení, než je tomu u jiných technologií (Hézl 2003).

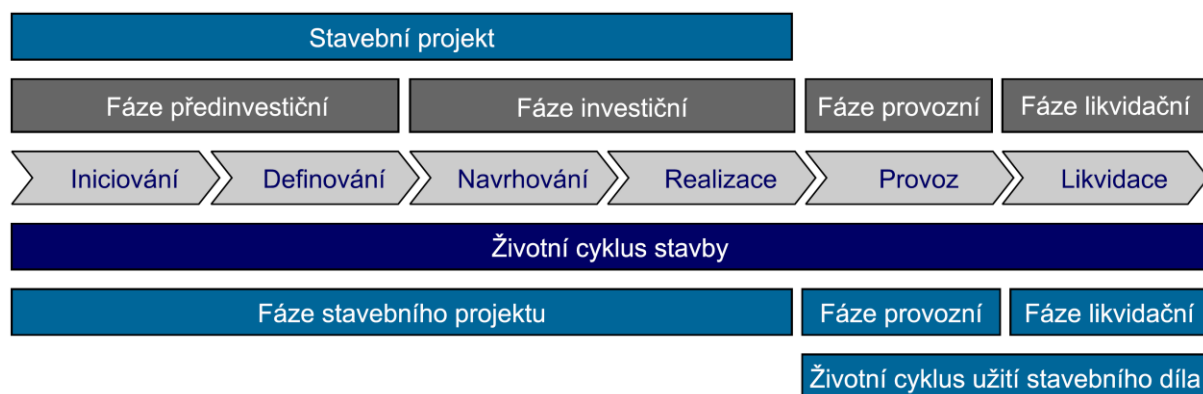
Stáří panelových domů se v závislosti na roku výstavby pohybuje od 27 do 65 let. To znamená, že v řadě případů dosahují panelové domy téměř 70–75 % předpokládané fyzické životnosti a cca 25 až 70 % předpokládané účetní životnosti. Ta byla stanovena v době výstavby na 75 – 85 let. Do roku 2025 tedy dosáhne 50 – 60 % životnosti více než polovina těchto objektů (Venkrbec et al. 2017).

V letech 1995 až 2003 probíhaly stavebně technické průzkumy cca 150 panelových objektů. Žádný z průzkumů neprokázal vizuálně zjistitelné poruchy havarijní povahy, výrazné narušení nosných systémů ani poruchy, které by ovlivňovaly celkovou statickou bezpečnost objektu s výjimkou narušení dílců lodžií a styků obvodových a lodžiových dílců s nosnou konstrukcí (Witzany et al. 2010).

## 2.2.4. Životní cyklus (panelových) budov

Každý stavební objekt prochází životním cyklem. Životní cyklus se skládá z ucelených časových úseků, nazývaných fáze. Na Obr. 18 jsou rozvedeny fáze životního cyklu stavebního objektu. Stejně jako u ostatních stavebních objektů i panelový dům prochází různými fázemi životního cyklu, které se od fází běžných stavebních objektů neliší. Životní cyklus stavebního objektu se dělí na fáze (Tománková a Čápková 2013):

- předinvestiční (iniciování a definování záměru),
- investiční (plánování a realizace projektu),
- provozní (provoz a užívání),
- likvidační (ekologická likvidace).



Obr. 18 Životní cyklus stavebního objektu (Kuda et al. 2012)

### Fáze životního cyklu budov

**Předinvestiční fáze** je iniciační fází životního cyklu stavby. Jedná se nejprve o myšlenku, která je později rozšířena prostřednictvím dalšího přesnějšího popisu rozsahu projektu<sup>107</sup> a získávání podnětů, zda je plánovaný projekt potřebný. Následuje definování projektového záměru<sup>108</sup> stavebního díla, který může být podložen poptávkou trhu, požadavkem zákazníka, nutným technologickým rozvojem, právním požadavkem, ekologickým požadavkem či sociální

<sup>107</sup> rozsah projektu – z angl. Project Scope Statement. Jedná se o popis výrobků nebo služeb, které mají být dodány předkládaným projektem. Nejčastěji jde o rozšířený popis hierarchického rozkladu WBS (Work breakdown structure (Skogmar, 2015).

<sup>108</sup> projektový záměr – z angl. Business Case. Je to komplexní souhrn, sloužící k představení projektu investorům a nadřízeným. Zahrnuje, náklady, výnosy, zdroje, rizika atd. (Project Management Institute, 2017).

nebo společenskou potřebou. V této fázi mohou být zpracovány úvodní studie, které se zohledněním kritérií ekonomických (náklady a zdroje financování projektu, předpoklad a financování celoživotních nákladů stavby), časových (harmonogram výstavbového projektu, etapizace), personálních (nároky na organizační útvary, vliv odpovědnosti účastníků a zajištění personálních zdrojů pro realizaci projektu). Rovněž by měla být brána v úvahu potenciální rizika záměru. Po definování záměru následuje rozhodnutí, zda se bude projektový záměr dále zpracovávat (studie a projekty proveditelnosti) a finálním milníkem fáze je schválení realizace projektového záměru.

V **investiční fázi**, dělené na části projektovou a realizační, jsou finanční prostředky spotřebovány a fyzicky vybudován stavební objekt. Ve stavebním sektoru se jedná především o zpracování jednotlivých stupňů projektové dokumentace ve vhodné úrovni detailu, včetně provedení nezbytných průzkumů a měření, vypořádání připomínek všech účastníků řízení, dotčených orgánů státní správy (DOSS) a místní samosprávy. Procesy povolení a odstranění staveb jsou projednávány ve správním řízení a řídí se platným zákonem<sup>109</sup> a prováděcí vyhláškou<sup>110</sup>. Výsledkem povolovacího procesu je rozhodnutí o umístění, stavebním povolení případně odstranění stavby. Následně se zpracovává dokumentace pro provádění stavby. Realizační část začíná výběrem zhotovitele na základě zadávací dokumentace, nastavení smluvního vztahu mezi zadavatelem a zhotovitelem, případně dílčími zhotoviteli. Samotná výstavba stavebního objektu je vedena a dokumentována prostřednictvím osob, které provádí tzv. vybrané činnosti ve výstavbě<sup>111</sup>. Jedná se o projektovou činnost (projektant) a odborné vedení stavby nebo její změny (stavbyvedoucí). Projektant může provádět rovněž autorský dozor projektanta pro kontrolu souladu prací s projektovou dokumentací a následné vyhotovení dokumentace skutečného

---

<sup>109</sup> Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) v aktuálním znění novely Zákona č. 225/2017 Sb. Zákon, kterým se mění zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony (Zákon č. 225/2017 Sb., kterým se mění zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony, 2017).

<sup>110</sup> Vyhláška č. 499/2006 Sb. o dokumentaci staveb, v aktuálním novelizovaném znění Vyhlášky č. 62/2013 Sb. Vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 499/2006 Sb., o dokumentaci staveb.

<sup>111</sup> dle Zákona č. 360/1992 Sb. - o výkonu povolání autorizovaných architektů a o výkonu povolání autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě v aktuálním znění novely Zákona č. 459/2016 Sb. kterým se mění zákon č. 360/1992 Sb., o výkonu povolání autorizovaných architektů a o výkonu povolání autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, ve znění pozdějších předpisů.

---

provedení stavby. V průběhu realizace je potřeba respektovat a kontrolovat technologické, legislativní, bezpečnostní, environmentální a kvalitativní požadavky na stavební dílo. Pro účely kontroly provádění stavebních prací z hlediska zájmů stavebníka slouží technický dozor stavebníka (TDS). Pro kontrolu bezpečnostních požadavků pak slouží na většině staveb koordinátor BOZP<sup>112</sup>. Stavební úřad funguje jako soustavný dozor, chrání veřejné zájmy a zájmy fyzických a právnických osob dotčených výstavbou. Realizační část stavebního projektu končí závěrečnou prohlídkou, tzv. kolaudací, které může předcházet zkušební provoz či předčasné užívání stavby. V některých případech není kolaudace povinná. Z hlediska projekčních prací v současnosti končí stavební záměr předáním projektové dokumentace skutečného provedení provozovateli stavby, kde by měly být aktualizovány veškeré změny, ke kterým došlo v průběhu realizace stavebního díla (Kuda et al. 2012; Parlament ČR 2017).

Následuje **provozní fáze** dokončené budovy, která je fází časově nejdelší. Kromě plnění funkce stavby pro daný účel mohou být prováděny udržovací práce, opravy a modernizace, které podstatně prodlužují životnost stavebního objektu. Změny dokončené stavby a demolice jsou z hlediska českého stavebního práva dalším stavebním záměrem a z pohledu životního cyklu další fází – likvidační (Kuda et al. 2012).

**Fáze likvidační** nastává v okamžiku kompletního odstranění stavebního objektu, nebo dojde k jeho podstatné změně (rekonstrukci). Důvody pro odstranění stavby mohou být stejné, jako byly důvody pro jeho inicializaci, tedy poptávka trhu, požadavek zákazníka, nutný technologický rozvoj, právní požadavek, ekologický požadavek, sociální nebo společenská potřeba. Většinou se však jedná o dosažení maximální možné životnosti konstrukčních prvků, zpravidla způsobených degradací materiálů. V případě panelových domů se často jedná také o společenský požadavek, kdy přestane být poptávka po bydlení v těchto typech domů (Kuda et al. 2012).

Fáze životního cyklu v souvislosti s implementací metodiky informačního managementu budov (BIM) do stavebního průmyslu bude nutno patřičně upravit. Z podstaty metody BIM je evidentní, že se z ostrých hranic fází stanou hranice měkké a jednotlivé fáze se tak budou moci překrývat. Například fáze provozní by měla do životního cyklu stavebního projektu vstoupit

---

<sup>112</sup> Koordinátor BOZP na staveništi se ustanoví dle Zákona č. 309/2006 Sb. Zákon, kterým se upravují další požadavky bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v pracovněprávních vztazích a o zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při činnosti nebo poskytování služeb mimo pracovněprávní vztahy (zákon o zajištění dalších podmínek bezpečnosti a ochrany zdraví při práci).

mnohem dříve, a to již ve fázi investiční, případně předinvestiční. Podstatě metodiky BIM a její implementaci je věnována kapitola 2.3.

### **2.2.5. Demolice a recyklace panelových budov**

V ČR se demolice panelových budov vyskytují zřídka, avšak četnost takovýchto záměrů narůstá. Jedná se zpravidla o neižnenýrské přístupy demolice s nedostatečně kvalitní separací materiálů. První demolice panelové budovy proběhla v roce 2011 v Havlíčkově Brodě. Jednalo se o demolici formou neinženýrského přístupu mechanickou metodou a sice hydraulickými nůžkami s následnou separací mimo staveniště. Zrecyklováno bylo cca 90 % budovy s využitím jako inertní materiál do podkladních vrstev vozovek (Lidovky.cz 2011).

V roce 2019 byl po výbuchu plynu demolován panelový dům ve slovenském Prešově. Rovněž se jednalo o využití hydraulických nůžek.

V Litvínově na sídlišti Janov byl v roce 2020 mechanickou metodou odstraněn první ze čtyř vybydlených panelových domů. Vedení města má zájem v nejbližších letech demolovat další tři bloky panelových domů s výhledem řešit i další sousední budovy, které jsou ve špatném technickém stavu (Beneš 2020; Vokurka 2020).

V Německu se od roku 2009 postupně panelové domy demolují formou dekonstrukce. Z některých prefabrikátů vyrostly rodinné domy v okolí Berlína či Chotěbuzi. Ekonomický smysl toto řešení dává do cca 300 kilometrů od místa demolice (Menzelová 2009).

O hromadné demolici zastaralých a nevyhovujících panelových domů se v České republice prozatím neuvažuje, především z důvodu potřebných výdajů na demolice a nutnosti zajištění nového bydlení, které byly v roce 2000 odhadovány na 1,5 bilionu korun.

### **2.2.6. Dílčí závěry z rešerše panelových budov a životního cyklu**

Na základě uvedené rešerše je možné konstatovat, že velké množství konstrukčních soustav panelových domů, společně s obtížně predikovatelnou materiálovou charakteristikou do jisté míry ztěžuje návrh postupu možných scénářů recyklací těchto budov. Fakt, že počet demolice panelových domů českých typových konstrukčních soustav je dosud minimální, ztěžuje odborný odhad technicko-ekonomických a environmentálních důsledků a ztížené podmínky pro erudovaný odhad možností využití betonových recyklátů, pocházejících z těchto budov. Z

těchto důvodů je nutné betonový materiál (betonovou drť a následně kamenivo) podrobit individuálním analýzám a zkouškám pro každý konkrétní případ dekonstrukčního projektu. Tato práce k tomu přispívá.

## 2.3. INFORMAČNÍ MANAGEMENT BUDOV V KONTEXTU VYUŽITÍ INFORMACÍ O MATERIÁLECH

V rámci investiční výstavby je nezbytné generovat, přejímat, aktualizovat a předávat informace. Efektivita a potenciál využití informačních dat je závislá na více faktorech, jakými mohou být například zvolená informační struktura, hierarchie účastníků a jejich oprávnění nebo nastavení společného datového prostředí apod.

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 (Galić et al. 2017). Zároveň je právě BIM jednou ze slibných technologií, kterou lze využít pro efektivnější přenos informací ve stavebním průmyslu. V současné době je již těžké vysledovat v historii podobný milník, kdy se stavební průmysl na celosvětové úrovni dohodl na potenciálu a výhodách určité koncepce, jako tomu je v případě BIM.

Mnoho autorů v posledním desetiletí prezentovalo potenciály a praktické přínosy implementace BIM do stavebnictví. Je to však už poměrně dávno, kdy Chuck Eastman (Eastman 1975) představil revoluční myšlenku BIM. Nyní je však na čase přejít od očekávání a prezentací potenciálů k reálným a proveditelným praktickým výsledkům. Mezi účastníky stavebních projektů stále existují od konceptu BIM asymetrická porozumění a očekávání. Někteří autoři definují BIM jako 3D prezentaci informací, shromážděných a komprimovaných v jednom modelu, podle kterého by měla být budova stavěna (Bazjanac, 2006, Eastman et al., 2011), pro některé je to platforma pro integraci a vizuální prezentaci projektového řízení (PM)<sup>113</sup> (Azhar a Behringer 2013; Galić et al. 2015). Jiní autoři vidí v BIM revoluční změnu koncepce stavebního sektoru v tom smyslu, že BIM slučuje fáze životního cyklu projektu za využití nástrojů projektového managementu (PM), odlišného přístupu jednotlivých zúčastněných stran, změnou v uzavírání smluvních vztahů a tím se prakticky samotný BIM stává moderním nástrojem pro PM (Succar 2009; Galic et al. 2015; Bazjanac 2004). Kromě diskrepancí perspektiv BIM, které jsou popsány různými zúčastněnými stranami a akademickou sférou, rovněž entity leaderů světového stavebního průmyslu poskytují na paradigma BIM nekonzistentní názory (např. USA, EU, Austrálie atd.).

---

<sup>113</sup> z angl. Project Management, zkráceně PM, překládáno jako projektový management nebo projektové řízení

### 2.3.1. BIM v ČR

Postup implementace BIM v České republice byl poměrně pomalý, iniciován tzv. od spodu, tzn. hlavním spouštěcím mechanismem nebyla vláda, nýbrž samotní koncoví uživatelé stavebního sektoru, především stavební inženýři a architekti. Přínosným okamžikem pro započítání diskusí o vhodnosti metodiky BIM bylo založení Odborné rady pro BIM (czBIM) v roce 2011. Byl zorganizován první ročník konference Bim Day v roce 2011 v Praze. Na této výroční konferenci poté přednášeli v letech 2011 až 2016 mezinárodní odborníci z Nizozemí, Švýcarska, Velké Británie, Norska apod. Od té doby je konference významnou každoroční událostí v oblasti BIM v ČR.

Přelomovým rokem v implementaci BIM byl rok 2017, kdy Vláda ČR podpořila koncept zavádění metody BIM do českého stavebnictví usnesením vlády č. 958, o významu metody BIM a tím potvrdila samotný pozitivní význam BIM pro český stavební průmysl. Ministerstvo průmyslu a obchodu bylo stanoveno jako koordinátor pro implementaci BIM. Cílem ministerstva je poskytnout určitý rámec provádění implementace. Byl zpracován dokument Koncepte zavádění BIM v ČR, který dává směr zavádění a prezentuje klíčová témata této oblasti, včetně doporučených opatření a časového rámce zavádění do roku 2022. Vznikají nové pracovní skupiny nejrůznějších zaměření a utváří se koncepce výuky BIM na všech stupních vzdělávání, včetně celoživotního.

Dalším milníkem bylo ustanovení České agentury pro standardizaci (ČAS) a jejího Odboru Koncepte BIM, který je pověřen realizací odborných opatření specifikovaných ve vládou schválené Koncepti 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 třech klíčových oblastech: požadavky objednatele na informace, požadavky na společné datové prostředí a nabízí také šablonu plánu realizace BIM (Klee 2021).

V rámci ČAS funguje rovněž skupina BIM EDU, která od roku 2020 aktivně pracuje na zavádění výuky BIM do všech stupňů školství. BIM EDU prosadila například obsah výuky metody BIM do rámcových vzdělávacích programů, tzv. RVP, středního odborného vzdělávání. Řada vysokých škol také přijala výzvu a metodu BIM zařadila do svých studijních programů. Vzdělávat se budou v nejbližší době rovněž státní úředníci a zaměstnanci stavebních úřadů.



### 2.3.2. Dimenze BIM

Koncept BIM pracuje kromě geometrie jednotlivých prvků (3D modelu) také s negrafickou částí modelu, využitelnou k informacím o čase (4D) (Liu et al. 2015), nákladech (5D) (Lu et al. 2016), udržitelnosti (6D) (Wong a Zhou 2015), provozních a výrobních údajích (7D) (Motawa a Almarshad 2013) atd. (Eastman a M. 2011). Pak se jedná se o tzv. **nD BIM modely** (GhaffarianHoseini et al. 2017), 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. Informační data z těchto modelů sice mohou být využita pro další výpočty, avšak bez snahy o zpětné obohacení a rozšíření původního BIM modelu novými daty. Naopak aktivní BIM přístup zahrnuje modely, které obsahují aktivní prvky, tedy tzv. analytickou část (formou plug-inů či add-onů) 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 a tyto data se tak stanou dalším datovým rozměrem BIM modelu. Pro přenos informačních dat z BIM modelu do jiných prostředí byl vyvinut **společný datový formát IFC<sup>114</sup>**, který svým otevřeným neplaceným standardem umožňuje volnou implementaci využití modelů BIM do nově vyvíjených software a poskytuje možný standard pro výměnu relevantních dat mezi různými softwarovými aplikacemi.

### 2.3.3. Dodávka výstavbového projektu při využití BIM

Kromě výše uvedených fází životního cyklu stavby hrají roli ve stavebním průmyslu také různé přístupy k dodávce projektů a související zadávání stavebních zakázek zhotoviteli. Vhodný způsob dodávky projektu může ovlivnit náklady na výstavbový projekt, a především celkové provozní náklady budovy v celém jejím životním cyklu. Nejprimitivnější dodávkou projektu je stavba svépomocí, která je ovšem možná jen u drobných a obecně nevýznamných

---

<sup>114</sup> z angl. Industrial Foundation Classes, IFC je průmyslový datový model, který představuje data o životním cyklu budov. Standard IFC, vyvinutý společností BuildingSMART, podporuje cíl reprezentovat, sémanticky popisovat a vyměňovat BIM data mezi softwarovými aplikacemi, různými zúčastněnými stranami a napříč etapami vsýtavby (Shelden et al. 2020). Podrobněji o IFC v kapitole Metody.

---

staveb (Tichý 2008).

Nejzákladnější rozdělení dodávky výstavbových projektů je na tři primární formy (Lahdenperä 2001).

- Design–Bid–Build (D–B–B)<sup>115</sup> – tradiční metoda, kde projektant přebírá odpovědnost za návrh a zhotovitel se podílí pouze na realizaci stavby.
- Design–Build (D–B)<sup>116</sup> – zhotovitel je na základě jednoho kontraktu odpovědný za projektový návrh a jeho následnou realizaci.
- Engineer–Procure–Construct (EPC)<sup>117</sup> – samostatná řídicí organizace dohlíží na vypracování projektové dokumentace a zajistí rovněž zhotovení stavby.

Uvedené formy se liší především uspořádáním smluvních vztahů mezi jednotlivými účastníky. Kromě třech základních forem existují další, zpravidla smíšené formy. Formy D–B–B a EPC se vyznačují velkou bohatostí variant (Tichý 2008). Také existují kombinační varianty s možnostmi objekt financovat (finance), provozovat (operate) a následně předat (transfer) a také dodávky typu PPP<sup>118</sup>, tedy partnerství veřejného a soukromého sektoru (Tichý 2008).

V současnosti se v České republice v souladu se zákonem o zadávání veřejných zakázek<sup>119</sup> realizují výstavbové projekty z veřejných zdrojů tradičním způsobem (D–B–B). Tento způsob je charakteristický tím, že je členěn do fází: (a) návrhová fáze, (b) nabídková (tendrová) fáze, (c) realizační fáze.

Hlavní vazbou mezi stavebníkem a zhotovitelem je u D–B–B smlouva o dílo. Projektant není se zhotovitelem nijak smluvně vázán. Potenciální problémy při využívání tohoto typu dodávky projektu může být zvýšení nákladů v souvislosti s aktualizacemi projektové dokumentace po zadání zakázky konkrétnímu zhotoviteli v důsledku jeho speciálních požadavků. Dalším charakteristickým problémem D–B–B může být filozofie „levnější je lepší“, tedy tendence silných hlavních zhotovitelů hledat nejlevnějšího subdodavatele za současně se zvyšujícího ri-

---

<sup>115</sup> z amer. angl. Design–Bid–Build (D-B-B) = vyprojektuj–nabídni–postav. Někdy též z brit. angl. Design–Tender nebo též Hard Bid (tvrdá nabídka) (Tichý 2008).

<sup>116</sup> z angl. Design–Build = vyprojektuj–postav.

<sup>117</sup> z angl. Engineer–Procure–Construct = vyprojektuj–zadej–postav (Oleríny 2005).

<sup>118</sup> z angl. Public Private Partnership = Partnerství veřejného a soukromého sektoru.

<sup>119</sup> Zákon č.134/2016 Sb., o zadávání veřejných zakázek ve znění novely Zákona 147/2017 Sb., kterým se mění zákon č. 134/2016 Sb., o zadávání veřejných zakázek, ve znění pozdějších předpisů.

zika a kompromisů na straně kvality provedení. Vzhledem k faktu, že je hlavní zhotovitel k projektu přizván až ve fázi realizace, není schopen ovlivnit fázi návrhu a existuje jen málo příležitostí, jak předkládat efektivní alternativní řešení operativy stavby. Na projektanty a architekty může být vyvíjen tlak na kvalitu projektových výstupů (kompromis hospodárnosti versus přijatelné kvality), což může vést ke sporům mezi projektovým týmem a zhotovitelem a vyústit v opoždění výstavby.

Výstavbové projekty v soukromém sektoru jsou většinou realizovány způsobem D–B. Tato forma dodávky projektu je postavena na subjektu, odpovědném za návrh a rovněž výstavbu projektu v rámci jedné dohody. Dodávka projektu D–B se vztahuje k praxi, kdy se zhotovitel podílí na fázi návrhové již v počátku projektu na základě předběžných informací od stavebníka (případně i od budoucího vlastníka či provozovatele). Podkladem může být studie proveditelnosti nebo projektový záměr (Lahdenperä 2001). Fáze projektu D-B, lze shrnout následovně (Tichý 2008):

- specifikace záměru stavebníkem,
- výběr a zaslání zadání zakázky několika vybraným uchazečům,
- uchazeči nabídnou realizaci stavby za nabídkovou cenu,
- výběr konkrétního uchazeče a uzavření smlouvy o dílo,
- uchazeč vyhledá projektanta (možné na základě dřívější zkušenosti či spolupráce již před podáním nabídky),
- stavebník a uchazeč uzavřou smlouvu o dílo na zhotovení stavby včetně projektové dokumentace (uchazeč se stává dodavatelem),
- projektant pracuje společně s dodavatelem stavby na dokumentaci (možnost preferovat oblíbené postupy dodavatele, subdodavatelské sítě apod.).

Existuje mnoho různých variant dodavatelského systému D–B, lišící se především mírou podrobnosti zadání a smluvních vztahů. V podstatě lze rozlišit dva základní druhy projektů D–B (Tichý 2008):

- volné – stavebník definuje účel a základní parametry stavby, dodavatel zhotoví stavbu podle jím opatřené dokumentace,
- vázané – stavebník popíše záměr velmi podrobně (blíží se tradičnímu projektu).

Přednosti dodávky D–B jsou v uplatnění týmové práce projektanta a dodavatele, čímž lze

dosáhnout snížení nákladů, zkrácení doby realizace a dosažení vyšší jakosti stavebního díla. Rizika D–B spočívají v případě nedostatečného řízení projektu a u extrémně náročných staveb, (tzv. gigaprojektů) v nedostatečné informovanosti o daném záměru (např. nemožnost zjistit stávající stav, dokud nezapočne výstavba) (Tichý 2008).

Za vyššího dodavatele pak lze považovat dodávku EPC, někdy též zvanou Turnkey Project. Je to tzv. zakázka na klíč<sup>120</sup> včetně projektové dokumentace, kdy projektant či projektový manažer má jednoho či více subdodavatelů. Součástí může být obstarání povolení stavby, zajištění kolaudace apod. (Tichý 2008).

Způsob dodávky projektů výstavby panelových domů, tedy centrálně (státem) plánovaná výstavba, byla z hlediska odpovědností jednotlivých účastníků příkladem hybridní dodávky D–B–B s prvky D–B. Dodávku zajišťovaly samostatné státní organizace projekční a organizace zhotovitelské. Obě organizace měly definovány své odpovědnosti (prvky D–B–B), avšak neprobíhala zde žádná výběrová řízení na zhotovitele. Výhod metody D–B, tedy možnosti zásahu zhotovitele již v návrhové fázi, nebylo využíváno i přesto, že byl od počátku zhotovitel znám. Zpětná vazba projekčním organizacím sice probíhala, ale aplikace změn byla procesem zdoluhavým. Zpětné vazby (například konstrukční změny) se zpravidla uplatnily až v dalším cyklu úprav konstrukční soustavy.

### 2.3.1. Datové a informační standardy BIM

Požadavky na dodávku datových standardů, zejména objednatelů projektových a zhotovitelských dodávek ve stavebnictví je možné ukotvit v dokumentaci datového standardu staveb (DSS)<sup>121</sup> a definovat požadavky na informační a datové standardy, což při výběru těchto dodavatelů v rámci digitalizace stavebnictví tvoří klíčovou roli. Pro tyto účely jsou v České republice zpracovány první dokumenty, které poskytují objednatelům příručky a návody, jak tyto dokumenty připravit a rovněž jak požadavky definovat. Tyto dokumenty vyvíjí Česká agentura

---

<sup>120</sup> Zakázka na klíč se v německy mluvících zemích označuje termínem „schüsselfertig“. Jedná se však o tradiční dodávku projektu. Označení definuje jakost hotové stavby, nikoliv smluvní vztah. Jde tedy o spolehlivost dodavatele, bez zásahu objednatele (stavebníka). Technický dozor stavebníka nedovolí odchylky od dokumentace (Tichý 2008).

<sup>121</sup> DSS – datový standard stavebnictví je smluvní dokument, který stanovuje požadavky objednatele na informační model stavby a v něm obsažená data (Agentura ČAS 2021)

pro standardizaci v rámci koncepce implementace BIM do českého stavebnictví. Klíčovým dokumentem datového standardu stavebnictví je tzv. BIM protokol, který by měl být vždy nezbytnou přílohou o dílo digitálně řízených projektů a měl by definovat minimálně (Agentura ČAS 2021):

- sdílení a předávání digitálních informací
- povinnosti objednatele, dodavatele a celého projektového týmu pro oblast BIM
- specifikuje požadavky na elektronickou výměnu dat

BIM protokol je český smluvní standard pro metodu dodávky D-B-B pro provádění stavby pro pilotní projekty, na základě jejichž zpětné vazby se bude tento dokument dále vyvíjet. Součástí aktuálního BIM protokolu z března 2021 jsou pak následující přílohy:

- požadavky objednatele na informace,
- požadavky na společné datové prostředí (CDE)<sup>122</sup>,
- plán realizace BIM (BEP)<sup>123</sup>.

### 2.3.2. Datové formáty pro přenos informací v rámci BIM

Příloha BIM protokolu definující požadavky objednatele na informace obsahuje rovněž obecné požadavky na dokumenty v digitální podobě. Typy dokumentů se dělí na následující části (Agentura ČAS 2021):

- soubory – dokumenty představující Digitální model stavby digitální soubory ve formátu IFC nebo v nativním formátu použitého softwaru (definovaného v BEP),
- soubory – dokumenty představující výstupy z Digitálního modelu stavby – jedná se např. o výkresy, generované z modelu stavby, které musí digitálnímu modelu stavby věcně i geometricky odpovídat,
- další soubory – dokumenty související s projektem, které je nutné předat v rámci informačního modelu stavby a které jsou podrobněji specifikovány v BEP.

---

<sup>122</sup> CDE, z angl. Common Data Environment – přeloženo jako Společné datové prostředí, je hlavní zdroj sdílených informací. Prostřednictvím CDE se shromažďují, udržují, sdílí a poskytují informace, včetně veškerých dokumentů pro členy projektového týmu (Agentura ČAS 2021)

<sup>123</sup> BEP, z angl. BIM Execution Plan – přeložen jako Plán realizace BIM je dokument, ve kterém se specifikuje plnění požadavků objednatele, případně je konkretizuje a rozvíjí. Jednou z částí BEP je v ideálním případě rovněž CDE.

BIM protokol rovněž obsahuje doporučení veškeré dokumenty v digitální podobě dodavatelem předávat a ukládat jak v nativním (zpravidla proprietárním formátu), tak i v otevřeném formátu, není-li ve smlouvě stanoveno jinak. Pro tento účel je možné využít následujících příkladů (Agentura ČAS 2021):

- Nativní formáty: \*.doc, \*.xls, \*.rvt, atd.
- Otevřené formáty: \*.pdf, \*.rtf, \*.ifc, atd.

Soubory v nativním i otevřeném formátu musí obsahovat veškerá požadovaná data informačního modelu stavby. Za správnost, obsah a integritu dat ve všech předávaných souborech ve všech formátech je odpovědný dodavatel (Agentura ČAS 2021).

### **2.3.3. Dílčí závěry z rešerše informačního managementu budov**

Z uvedené rešerše vyplývá, že pro české prostředí jsou zpracovány základní standardy pro definování přenosu datových souborů negrafických údajů, využitelných pro export a import parametrů pro recyklované betony do nově navrhovaných objektů. Nicméně konkrétní parametry je nutno převzít například ze standardů jako je např. SNIM a ty bude pravděpodobně nutno rozšířit o další parametry pro dosažení jednoznačné identifikace materiálové charakteristiky recyklovaných betonů.

## 2.4. OPTIMALIZAČNÍ METODY VE STAVEBNÍM MANAGEMENTU

Optimalizace je v průmyslové výrobě aplikována poměrně dlouhou dobu. Faktem však je, že po obrovském teoretickém růstu této oblasti v období mezi 50. a 70. lety 20. století, je optimalizace opět předmětem velmi intenzivního celosvětového výzkumu. Důvodem, proč se tato vědní oblast stále vyvíjí, je především zvýšené společenské povědomí o tom, že zdroje představují omezenou entitu a představují tak hlavní spouštěcí mechanismus, který posouvá optimalizaci na přední pozice seznamu celospolečenských kritérií. Dalšími motivátory jsou rovněž široká dostupnost výpočetních balíčků a neustále rostoucí hardwarová kapacita. Téměř zapomenuté matematické modely jsou proto v současné době revidovány, rozšiřovány, upravovány a ověřovány díky své schopnosti řešit skutečné problémy s optimalizací v průmyslové výrobě.

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, navzdory běžným opakujícím se operacím, kdy optimalizace představuje pouze jednu z fází. Pro provádění optimalizace ve stavebních procesech je v současnosti velmi důležité definovat tok vhodných informací. Proto je nezbytné v každém případě určit, která z dostupných optimalizačních technik je pro řešení určitého problému nejvhodnější.

Vzhledem ke značné diverzitě problémů, metod řešení a modelových nástrojů, je v následující kapitole prezentována rešerše takových přístupů, které se týkají optimalizace stavební výroby pro účely poskytnutí aktuálních informací o stavu tohoto oboru odborné komunitě.

### 2.4.1. Optimalizační metody

Optimalizační metody mohou řešit řadu různých technických a inženýrských problémů. I když problémy s optimalizací mohou pocházet z různých oblastí a mohou řešit zcela odlišné systémy, mohou být v podstatě formulovány překvapivě podobným způsobem. Obecně platí, že problém optimalizace může být vyjádřen ve tvaru:

$$\min. f(x) \tag{4}$$

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. Je nutno poznamenat, že účelová funkce může být v případě potřeby v reálném prostoru také maximalizována. Rozhodovací proměnné jsou obvykle počítány v rámci jejich dolní a horní mezí,  $x^{LO} \leq x \leq x^{UP}$ , mohou být spojité,  $x \in R$ , kde  $R$  je množina reálných čísel; nebo celočíselné,  $x \in Z$ , kde  $Z$  je množina celých čísel. Celočíselné proměnné se mohou také objevit jako binární rozhodovací proměnné, např.  $x \in \{0,1\}^m$ .

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

Pomocí heuristických technik je možné 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.

Nejčastěji používané jsou metody přímého vyhledávání<sup>124</sup> (Hooke a Jeeves 1961), evoluční strategie<sup>125</sup> (Rechenberg 1965; Schwefel 1965), genetické algoritmy<sup>126</sup> (Holland 1975; Turing 1950), zakázaného hledání<sup>127</sup> (Glover 1977), simulované žíhání<sup>128</sup> (Kirkpatrick et al. 1983), neuronové sítě<sup>129</sup> (Rumelhart et al. 1986), diferenciální evoluce<sup>130</sup> (Storn a Price 1997), harmonické vyhledávání<sup>131</sup> (Geem et al. 2001), dále pak techniky, využívající inteligence

---

<sup>124</sup> z angl. Direct Search, zkráceně DS

<sup>125</sup> z angl. Evolution Strategies, zkráceně ES

<sup>126</sup> z angl. Genetic Algorithms, zkráceně GA

<sup>127</sup> z angl. Tabu Search, zkráceně, TS

<sup>128</sup> z angl. Simulated Annealing, zkráceně SA

<sup>129</sup> z angl. Neural Networks, zkráceně NN

<sup>130</sup> z angl. Differential Evolution, zkráceně DE

<sup>131</sup> z angl. Harmony Search, zkráceně HS

---



hejna<sup>132</sup> jako např. hejnem částic<sup>133</sup> (Kennedy a Eberhart 1995), mravenčí kolonii<sup>134</sup> (Colomi et al. 1991) nebo optimalizace skupinového vyhledávání<sup>135</sup> (He et al. 2009). Jako rozšíření hlavních heuristických metod jsou meta a hyper-heuristické stochastické techniky většinou nakloněny k biologicky inspirovaným výpočetním algoritmům, zpravidla využívající rovněž inteligence hejna. Mezi ně patří například optimalizace včelím rojem<sup>136</sup> (Karaboga a Basturk 2007), hejnem světlušek<sup>137</sup> (Yang 2009), kukaččí vyhledávání<sup>138</sup> (Yang et al. 2009), netopýří algoritmus<sup>139</sup> (Yang 2010), algoritmus umělého rybiho hejna<sup>140</sup> (Li et al. 2002), Algoritmus inteligentních kapek<sup>141</sup> (Shah-Hosseini 2007), optimalizace bakteriálního potravního chování<sup>142</sup> (Passino 2002), algoritmus umělého imunitního systému<sup>143</sup> (Dasgupta 1999), optimalizace skákajícími žábami<sup>144</sup> (Eusuff a Lansey 2003), algoritmus opylení květin<sup>145</sup> (Yang 2012), optimalizace umělou rostlinou<sup>146</sup> (Cui a Cai 2013), vlčí algoritmus<sup>147</sup> (Fong et al. 2015) a dalšími hybridními kombinacemi výše zmíněných metod. Heuristickými algoritmy můžeme často najít bohužel pouze přibližné optimální řešení, a to až na konci procesu vyhledávání. To způsobuje občas poměrně dlouhé hledání řešení. Proto jsou matematické programovací metody široce uznávány jako výhodné a exaktní nástroje pro optimalizaci ve stavebnictví.

Hlavní výhodou matematických metod 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). Vhodnými metodami LP je

---

<sup>132</sup> z angl. Swarm Intelligence, zkráceně SI

<sup>133</sup> z angl. Particle Swarm Optimization, zkráceně PSO, inspirovaná chováním hejn ptáků a ryb.

<sup>134</sup> z angl. Ant Colony Optimizaton, zkráceně ACO, inspirován chováním mravenčí kolonií při hledání potravy.

<sup>135</sup> z angl. Group Search Optimizer, zkráceně GSO

<sup>136</sup> z angl. Artificial Bee Colony, zkráceně ABC, inspirována včelím společenstvem

<sup>137</sup> z angl. Firefly Algorithm, zkráceně FA, inspirován efektivním využitím bioluminiscence světlušek.

<sup>138</sup> z angl. Cuckoo Search, zkráceně CS

<sup>139</sup> z angl. Bat Algorithm, zkráceně BA

<sup>140</sup> z angl. Artificial Fish Swarm Algorithm, zkráceně AFSA, inspirovaný kolektivním pohybem hejn ryb.

<sup>141</sup> z angl. Intelligent Water Drops Algorithm, zkráceně IWD, inspirován procesy přírodních říčních systémů.

<sup>142</sup> z angl. Bacterial Foraging Optimization. zkráceně BFO

<sup>143</sup> z angl. Artifical Immune System Algorithm, zkráceně AIS

<sup>144</sup> z angl. Shuffled Frog Leaping Algorithm. zkráceně SFLA

<sup>145</sup> z angl. Flower Pollination Algorithm, zkráceně FPA

<sup>146</sup> z angl. Artificial Plant Optimization, zkráceně APO

<sup>147</sup> z angl. Wolf Search Algorithm, zkráceně WSA

známý simplexový algoritmus (Dantzig 1963), který je pravděpodobně nejčastěji používanou metodou pro řešení problémů LP, avšak je nutno zmínit, že metoda vnitřních bodů (Karmarkar 1984) je často považována za účinnější nástroj pro řešení úloh LP většího měřítka.

Jestliže problém spojitě optimalizace obsahuje nelineární funkce, vyžaduje se pro jeho řešení přístup NLP. Mnoho technických úkolů lze převést do problémů NLP, rovněž většina problémů v přírodě je nelineární. Vhodná metoda řešení konkrétního úkolu NLP by však měla být vybrána s ohledem na jeho velikost a vlastnosti nelinearity. V současné době neexistuje žádná standardní metoda, která by dokázala stejně dobře vyřešit všechny typy NLP problémů. Na druhou stranu existuje řada účinných algoritmů, mezi nimiž lze vybrat vhodný algoritmus pro řešení konkrétního NLP problému. Velmi často jsou při NLP využívány obecná metoda redukovaného gradientu (Abadie a Carpentier 1969), rozšířená lagrange metoda (Powell 1967; Hestenes 1969) nebo metody kvadratického programování (Powell 1978).

MILP představuje rozšíření přístupu LP. Zatímco algoritmy LP mohou řešit lineární spojitě problémy, metody MILP mohou zvládnout úlohy lineární optimalizace pomocí spojitých a diskretních rozhodovacích proměnných. V problémech MILP mohou být diskretní proměnné deklarovány jako celočíselné proměnné nebo jako binární (0-1) proměnné. Standardní metodou pro optimalizaci MILP je metoda větvení a mezí<sup>148</sup> (Land a Doig 1960), avšak také metoda sečných nadrovin<sup>149</sup> (Gomory 1958) nebo metoda větvení a řezů<sup>150</sup> (Padberg a Rinaldi 1987) mohou být v mnoha případech účinně aplikovány.

Metody MINLP jsou nezbytné pro diskretní optimalizační problémy, které ve své formulaci zahrnují nelineární termíny. Ačkoli lze od nejmodernějších metod MINLP očekávat vysoce kvalitní přesná řešení, je nutno poukázat na fakt, že pole nelineární (diskretní) optimalizace je nejsložitější a dosud nedosáhlo stavu zralosti jako lineární (kontinuální) optimalizace. Přesto je k dispozici řada účinných metod MINLP, které lze použít pro řešení nelineárních diskretních optimalizačních problémů ve stavebnictví, jako je generalizovaný Bendersův rozklad (Geoffrion 1972), nelineární metoda větvení a mezí (Beale 1977), techniky přípustnosti (Mawengkang a Murtagh 1986), sekvenční lineární diskretní programování (Olsen a Vanderplaats 1989), rozšířený algoritmus penalizace / vnější aproximace / rovnostního omezení

---

<sup>148</sup> z angl. branch and bound method

<sup>149</sup> z angl. cutting plane method, zvaná také metoda Gomoryho řezů

<sup>150</sup> z angl. branch and cut method

(Viswanathan a Grossmann 1990), metoda větvení a redukci (Ryoo a Sahinidis 1996), smíšený celočíselný alfa BB algoritmus (Adjiman et al. 2000), hybridní algoritmus (Bonami et al. 2008) a další.

### **Obecné formy optimalizačních problémů ve stavebních procesech**

Přehled a definice některých známých matematických i heuristických optimalizačních problémů, které lze identifikovat jako nejčastěji se vyskytující ve stavebních procesech, byly zpracovány v podobě tabulkových rešerší. Jejich původní název, základní popis a cíle, jakož i jejich autory v pořadí dle roku vydání publikace, jsou uvedeny v přílohové části práce v kapitole 13.2 pro matematické problémy a v kapitole 13.3 pro heuristické problémy. Matematické problémy s optimalizací jsou dále rozebrány a seskupeny podle hlavních cílů optimalizace a tvoří dvě oblasti společných úkolů pro stavební procesy: i) problémy s optimalizací zdrojů, uvedené v příloze práce v kapitole 13.4 a ii) problémy s optimalizací rozvržení a tras, uvedené v příloze práce v kapitole 13.5.

#### **2.4.2. Modelovací nástroje pro optimalizaci**

Existuje celá řada komerčně dostupných programů pro počítačové modelování optimalizačních problémů. Syntaxe algebraických jazyků pro modelování jsou často flexibilní a umožňují indexování rozsáhlých optimalizačních modelů v kompaktní formě. Tímto způsobem lze algebraické modelovací jazyky jako AIMMS (Bisschop 2006), AMPL (Fourer et al. 1990), CAMPS (Lucas a Mitra 1988), GAMS (Brook et al. 1988), LINGO (LINDO Systems Inc 2015), LPL (Hürlimann a Cardona 1993), MPL (Maximal Software Inc. 2015), OPL (Heisig a Minner 1999) nebo UIMP (Ellison a Mitra 1982) použít pro složité a jedinečné optimalizační problémy, které mohou vyžadovat několik revizí před vytvořením přesného modelu. Jsou částečně použitelné i v případech velkého počtu omezení stejného typu. Zejména algebraický modelovací jazyk je schopen formulovat veškerá omezení stejného typu a současně manipulovat s rozhodovací proměnnou každého typu. Aplikace algebraického modelovacího jazyka urychluje řadu činností při správě modelu jako je transformace dat do parametrů modelu, modifikace modelu, přístup k datům a analýza získaných výsledků z modelu.

Tabulkové editory jsou mezi uživateli také velmi populárními nástroji pro řešení optimalizačních problémů. Počítačový balíček společnosti Microsoft Excel (Visual Basic), s doplňky

jako Evolver (Nersesian 2011), Solver (Mason a Dunning 2010) nebo What'sBest (Lindo Systems Inc. 2018), stejně jako WinQSB (Yih-Long 1999), jsou často používané tabulkové software pro modelování optimalizačních úloh. Tabulkové editory jsou uživatelsky přívětivé nástroje a umožňují vývoj optimalizačního modelu formulovat ve známějším softwarovém prostředí. Na druhou stranu, optimalizační model, vytvořený tabulkovým softwarem, je méně transparentní než model vytvořený pomocí algebraického modelovacího jazyka. Tabulkové zadávání entit modelu je také časově náročnější, a proto je tabulkově orientovaný modelovací software použitelným nástrojem pro vytváření malých a středních modelů s přiměřeným počtem parametrů, které mohou být vyplněny do tabulky. Rovněž existují i samostatné specializované optimalizační software, jako např. Gurobi (Gurobi 2018), TORA (Ord a Taha 2017) nebo LIONSolver (Battiti a Brunato 2017).

Pro optimalizační modelování lze také využít interaktivní počítačové jazyky pro numerické výpočty. Softwarové balíčky jako Wolfram Mathematica (Wolfram 2003) a MathWorks MATLAB (Griebel 2016) jsou interaktivní skriptovací počítačové jazyky, které se široce používají pro optimalizační modelování, přestože to není jejich hlavní účel. Oba tyto softwarové balíčky umožňují interaktivní prostředí pro strukturování dat, modelování a řešení problémů s optimalizací a také zobrazování výsledků ve formě digitálních výstupů a grafů.

V poslední době je zvýšený zájem také o využívání internetových aplikací pro optimalizaci zdrojů. Jedním z možných způsobů optimalizace přes internet je použití otevřených programů umístěných na serveru NEOS (Czyzyk et al. 1998). Na tomto serveru je také možné využít odkazy na mnoho komerčních optimalizačních programů, příručky k jejich použití, výsledky testů a výzkumů v oblasti optimalizace, různých publikací atd.

### **2.4.3. Analýza současných matematických optimalizačních metod**

V přílohové části práce lze nalézt chronologicky seřazenou rešerši výzkumných příspěvků. Data pro rešerši byly získány z fakultních přístupů do databází Scopus a Web of Science – Core Collection. Byl kladen důraz na nejvíce citované příspěvky, tedy v dané komunitě přínosné a relevantní. Jako klíčová slova pro vyhledávání byly použity tyto anglické výrazy: fresh concrete, concrete delivery, transportation problem, optimization, algorithm a jejich kombinace. V minulosti bylo prezentováno mnoho vědeckých a odborných studií, které se zabývaly dodava-

telskými řetězci, tedy dopravními problémy. Souhrnná ucelená rešerše, která by dala jasné členění v přístupech k plánování dopravy čerstvého betonu však v renomovaných databázích nebyla nalezena. Ve vlastní publikované případové studii (Venkrbec a Klanšek 2017) bylo testováno 74 pozic betonáren a 182 tras pro jednu konkrétní stavbu. Nelevnější poskytovatel betonu včetně dopravy se umístil až na 19. místě a zároveň prvních šest nejbližších betonáren bylo o 27-33% dražší než nejlevnější, která byla vzdálena 29,48 km. Tato studie dala podnět k další práci v této problematice a rovněž si vyžádala komplexní rešerši metod heuristických, která byla rovněž publikována (Patloka et al. 2018)

Následující část práce proto vyplňuje tuto mezeru v literatuře a dává ucelený přehled této problematiky. Čerstvý beton je zboží rychle měnící použitelné vlastnosti, které musí být vyráběno na vyžádání a dodáno na staveniště v souladu s přísnými časovými požadavky specifikovanými zákazníkem, tzv. dodávkou v určeném čase<sup>151</sup> (Sugimori et al. 1977). Vzhledem ke značné různorodosti problémů, metod řešení a modelovacích nástrojů byly prověřeny ty metody, které se týkají optimalizace stavební výroby tak, aby poskytly odborné komunitě aktuální informace o stavu této problematiky.

S ohledem na složitou povahu problémů ve stavebnictví a cyklickému procesu plánování a optimalizace je často obtížné identifikovat pouze jeden typ výše uvedených specifických problémů nebo je dokonce úplně odlišit. Zdá se, že většina problémů s optimalizací ve stavebnictví je kombinací různých zmíněných specifických problémů. Proto je obtížné abstrahovat všechny použité metody řešení takových problémů.

Přehled aktuálních a nejvlivnějších (tj. nejvíce citovaných) aplikací optimalizace ve stavebnictví, jakož i použité metody a modelovací nástroje je uveden ve třech chronologicky strukturovaných tabulkách rozdělených podle jejich optimalizačních orientací v kapitole 13.3 pro heuristické problémy, v kapitole 13.4 a 13.5 pro matematické problémy.

---

<sup>151</sup> z angl. Just In Time, zkráceně JIT. Produkční metoda, kde všechny procesy produkují potřebné součásti v nezbytném čase a mají po ruce pouze minimální zásoby, potřebné k udržení procesů pohromadě. Poprvé nasazena společností Toyota Motor Company.

## 2.4.4. Optimalizace a BIM

### Obecné souvislosti mezi optimalizací a BIM

Využití optimalizace má bezesporu potenciál pro mnoho oblastí ve stavebnictví, stejně jako koncepce BIM. Základním cílem této části práce je představit zavedená propojení mezi optimalizací a BIM, která byla nedávno publikována v renomované vědecké i prakticky orientované literatuře. Podobná rešerše nebyla dosud provedena bez ohledu na skutečnost, že se týká rychle se rozvíjející oblasti. Přehled nedávných úspěchů v souvislosti s propojením optimalizace a BIM je zvláště potřebný pro identifikaci nových perspektivních témat pro výzkum a zaplnění mezery v literatuře.

Paradigma BIM je jedním z nejslibnějších rozvojų v architektuře, stavebnictví i dalších průmyslech. Nejčastěji užívanou definicí je: „*BIM je způsob spolupráce, založený na digitálních technologiích, které odkrývají efektivnější metody navrhování, realizace a údržby budov. BIM obsahuje klíčová data o produktu a trojrozměrný počítačový model, který lze použít k efektivní správě informací během celého životního cyklu projektu od nejranějšího konceptu až po provoz*“ (Isikdag et al. 2012). Informační model budovy je datově bohatá, objektově orientovaná, inteligentní a parametrická reprezentace fyzických a funkčních charakteristik, transformovaných na vícerozměrný digitální model. Všechny informace o vlastnostech konstrukcí, materiálů a dalších entit, mohou být uživateli přístupné z modelu pomocí BIM nástrojů.

Nástroje BIM lze kategorizovat podle jejich základního zaměření. Většina BIM nástrojů ručně transformuje přesná syntetická data konstrukce do virtuální reality a obvykle obsahuje 3D geometrický model s dalšími vizualizovanými informacemi (dimenzemi). Tento přístup lze označit jako pasivní BIM, protože zde chybí analytická část modelu.

Pro analýzu dat o výstavbovém procesu, jako je například optimální časový plán, rozvržení pracovního prostoru s ohledem na charakter umístění, analýzu a posouzení rizik, ochranu zdraví a bezpečnosti při práci nebo proveditelnost jednotlivých činností, jsou zapotřebí další nástroje spolu s dalšími počítačovými dovednostmi a odbornými znalostmi uživatele (např. stavbyvedoucího nebo manažera projektu).

Dokud není použita některá z exaktních optimalizačních metod, pak z hlediska přísného matematického smyslu není BIM konceptem optimalizačním. Tímto způsobem rozlišujeme nástroje a přístupy simulovaného řešení od optimalizovaného řešení. Hlavním účelem této části

práce je zaměřit se na nedávno publikované nasazení metod BIM, které jsou definovány jako „Aktivní BIM přístupy“. Jsou to takové přístupy, ve kterých modely pracují s analytickými daty pomocí algoritmů. Následující rešerše zkoumá pouze aktivní BIM studie, které využívaly optimalizační techniky a byly nejčastěji identifikovány v literatuře managementu staveb, tj. zejména aplikace pro přiřazovací problémy (AP)<sup>152</sup>, problémy rovřzení zařízení staveniště (CSLP)<sup>153</sup> a problémy časového plánování (PSP)<sup>154</sup>.

### **Rešerše optimalizací s využitím aktivního BIM přístupu**

Cílem této kapitoly je prezentovat stávající aplikace optimalizačních technik za využití aktivních BIM přístupů, vyvinutých za účelem generování optimálních výsledků. Nejčastěji identifikované aplikace jsou zejména při využití aktivního BIM přístupu pro přiřazovací problémy a problémy rovřzení. Rešerše je zpracována formou tabulky v příloze práce v kapitole 13.6 ve struktuře seřazené podle data publikace.

#### **2.4.5. Dílčí závěry z rešerše a analýzy optimalizačních metod**

Z rešerše bylo zjištěno, že moderní uživatel má k dispozici celou řadu výkonných optimalizačních algoritmů, buď heuristických, nebo exaktních matematických, a také několik možností pro modelování optimalizačního problému, kterými mohou být například algebraický modelovací jazyk, tabulkový editor s vhodným řešitelem, samostatný specializovaný optimalizační software, interaktivní počítačový jazyk nebo online (webová) optimalizační aplikace.

Prvotně využívané heuristické metody jsou zcela nebo alespoň pouze částečně kombinovány s matematickými metodami. Často použitou heuristickou kombinací je metoda GA včetně hybridizace v kombinaci s metodou ACO. Hybridní metoda GA je mnohem rychlejší než jakákoliv metoda, která používá ACO, což bylo předvídatelné, neboť složitost ACO je o jeden řád vyšší než GA. Navíc hybridní ACO metodika výslovně zvažuje optimalizaci distribučního vyhledávacího prostoru, což znamená exponenciální nárůst výpočtového času, protože problémový vyhledávací prostor tohoto problému s dodávkou je mnohem širší než výrobní problém. Po roce 2008 se objevily příspěvky GA s modifikacemi křížení. Tento hybridní algoritmus je

---

<sup>152</sup> z angl. Assignment Problem, zkráceně jako AP.

<sup>153</sup> z Angl. Construction site layout problem, zkráceně jako CSLP.

<sup>154</sup> z angl. Project Scheduling problem, zkráceně PSP.

stabilnější než původní heuristika. V jednom příspěvku bylo nalezeno využití algoritmu zakázaného hledání. Po roce 2014 se často vyskytuje využití matematické optimalizace s celočíselnými proměnnými, později v kombinaci s Lagrangianovou funkcí, Dantzig-Wolfeho dekompozicí, metodou generování sloupců a jiných.

Pro ověření potenciálu kombinace optimalizace a BIM, byly nalezeny rovněž různé optimalizační BIM implementace. Provedená rešerše odhalila, že heuristické GA představují většinu používaných optimalizačních algoritmů v AP a CSLP v souvislosti s nasazením BIM (tj. v současné době nejčastěji nalezené aplikace). V oblasti exaktního matematického programování byly identifikovány některé pokusy kombinovat optimalizaci MILP s BIM, ale stále existuje značný prostor pro další rozvoj této problematiky. Podobný závěr lze nalézt také u aplikací založených na biologicky inspirovaných optimalizačních přístupech v kombinaci s BIM přístupem. Propojení mezi BIM a optimalizačními modely se v současné době jeví jako náročný úkol, který je potřeba intenzivněji řešit.

V blízké budoucnosti lze jasně předvídat zrychlený vývoj různých rozhodovacích modelů, které kombinují optimalizační přístupy a informační systémy. Kromě toho se také očekává, že propojení mezi těmito dvěma rostoucími disciplínami povede k nové významné vlně automatizovaných procesů v managementu staveb. Stále však existuje řada NP–kompletních<sup>155</sup> a NP–těžkých problémů<sup>156</sup>, které nelze pomocí současného softwaru a hardwaru vyřešit přesnou optimalizací s přiměřenou dobou výpočtu. Očekávaný pokrok v této oblasti proto bude i nadále velmi záviset na dostupné počítačové kapacitě.

---

<sup>155</sup> z angl. NP–complete problems. Takový problém, pro který nebyl zatím objeven žádný polynomiální algoritmus, který by je řešil. Zároveň však nebylo dokázáno, že by takový algoritmus nemohl existovat (Cormen et al. 2009).

<sup>156</sup> z angl. NP–hard problem. Jsou to takové problémy, které nejsou řešitelné v polynomiálním čase (Cormen et al. 2009).



## 3. VYMEZENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

### 3.1. REFLEXE A KONTEXTUALIZACE PROBLEMATIKY

Na základě výše zmíněné motivace v kapitole 1, podložené rešeršní prací v kapitole 2, 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“.

### 3.2. 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 nejnepríznivější 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.

### 3.3. STANOVENÍ VĚDECKÝCH HYPOTÉZ

Vzhledem k výše uvedeným cílům bylo stanoveno několik vědeckých hypotéz, 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.

## 4. METODY ZPRACOVÁNÍ

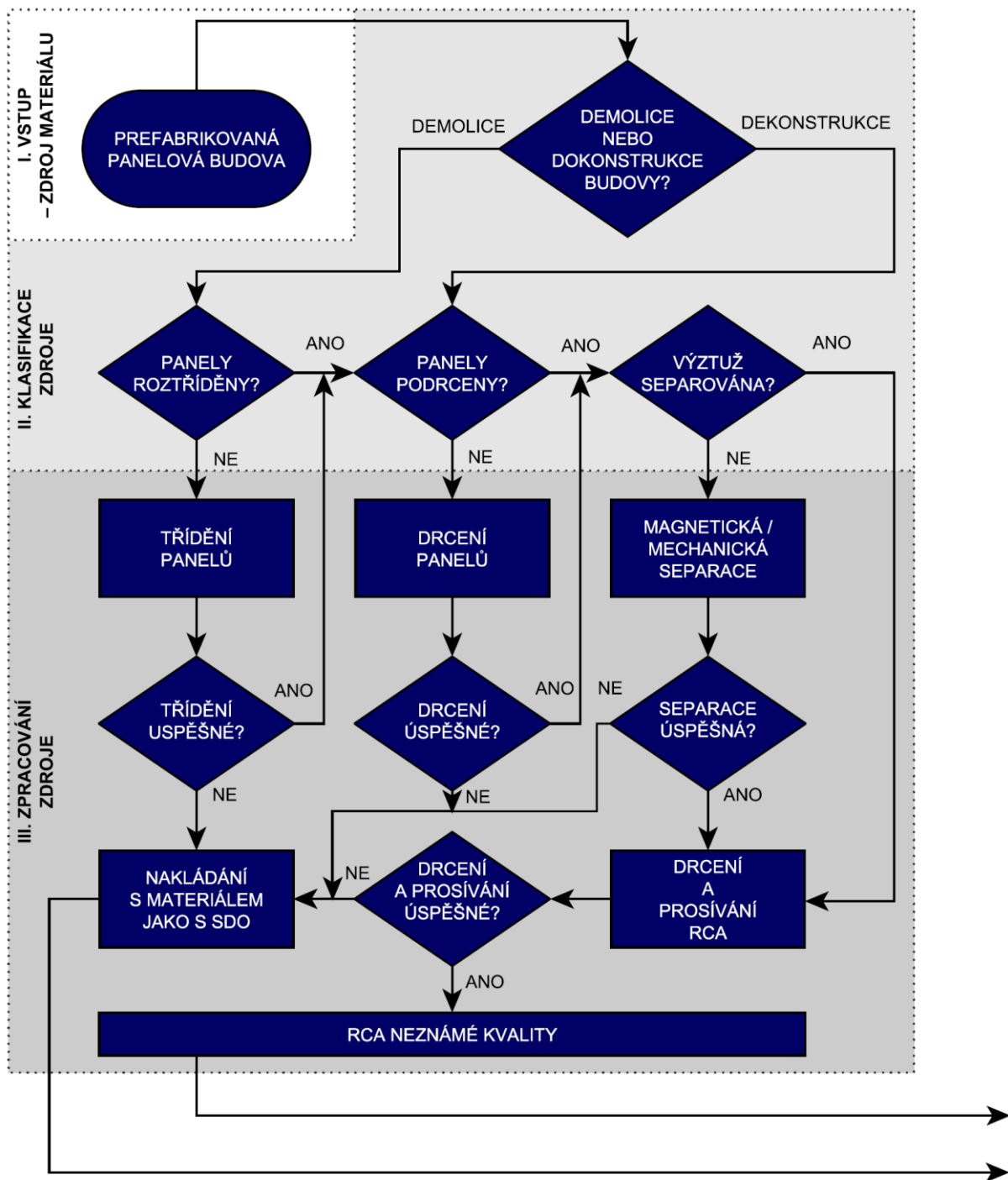
Metody, použité v práci, jsou popsány v následujících kapitolách v chronologickém členění dle logického postupu práce na tématu. Stěžejní je kapitola metodického rámce, ve kterém je zpracováno téma komplexního uchopení recyklovaného kameniva (RCA) včetně přípravy vzorků kameniva z matečního betonu (PC) 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.

### 4.1. METODICKÝ RÁMEC NAKLÁDÁNÍ S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM

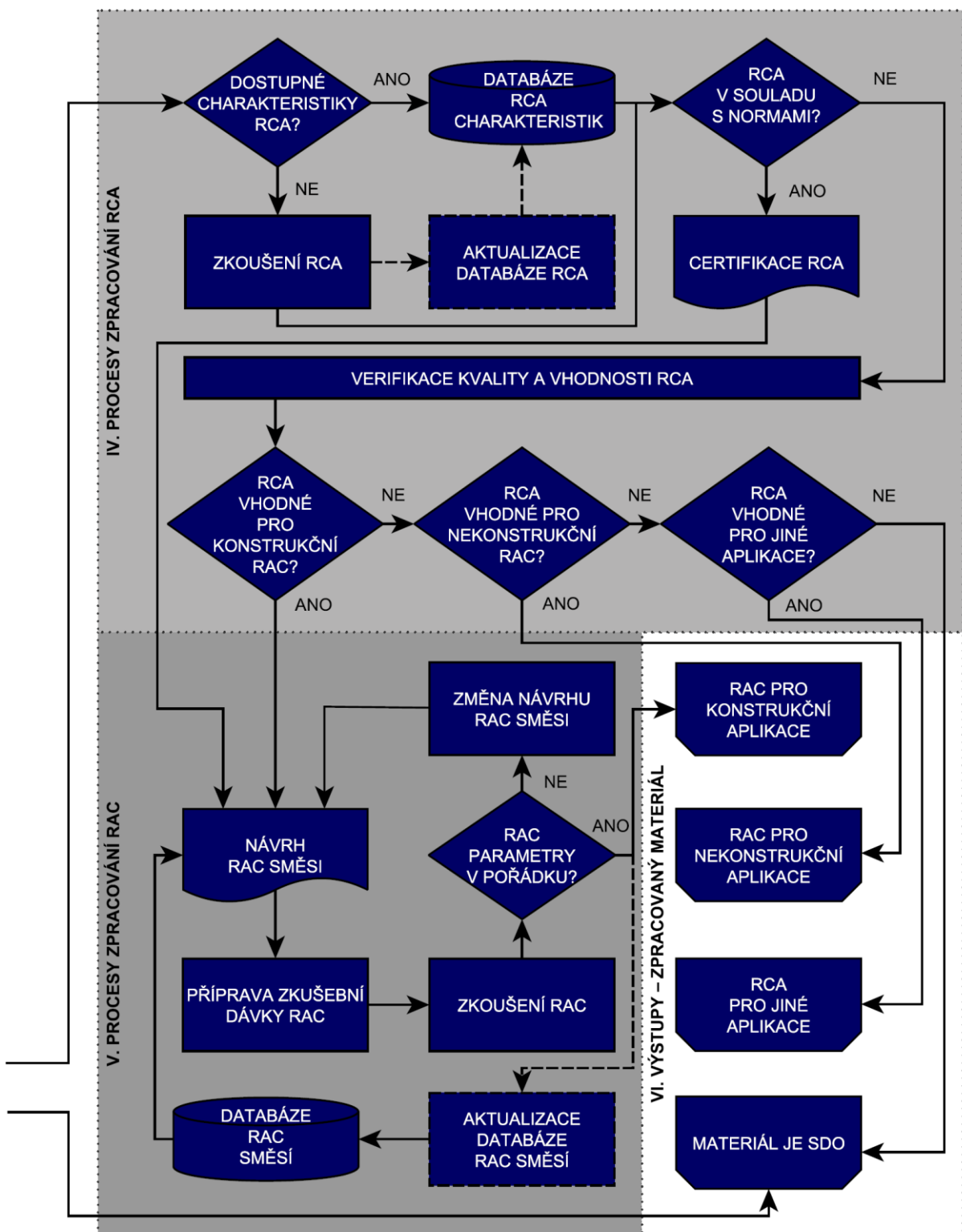
V rámci výzkumného úkolu byl vyvinut nový metodický rámec, reprezentován vývojovým diagramem, který je rozložen na Obr. 19 a Obr. 20, ze kterých jsou zřejmé následující fáze metodického rámce:

- I. fáze vstup – zdroj materiálu,
- II. fáze klasifikace zdroje,
- III. fáze zpracování zdroje,
- IV. fáze procesy zpracování RCA,
- V. fáze procesy zpracování RAC,
- VI. fáze výstupy – zpracovaný materiál.

V následujících kapitolách je podrobně rozebrána náplň jednotlivých fází metodického rámce, která je neoddělitelně spojena a smysluplná pouze s vývojovým diagramem.



Obr. 19 Vývojový diagram metodického rámce nakládání s recyklovaným kamenivem - 1. část (vlastní práce)



Obr. 20 Vývojový diagram metodického rámce nakládání s recyklovaným kamenivem - 2. část (vlastní práce)

### **4.1.1. 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.

### **4.1.2. 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 RCA i odpovídající postup odstraňování budovy, což vyžaduje specifické rozmístění a využití zdrojů a zařízení staveniště, jako jsou stroje, zaměstnanci a finanční prostředky (Volk et al. 2018). 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 (Schultmann 2005). Je však třeba mít také na paměti, že není vždy možné dekonstruovat budovy jako celek a že demolice lze kombinovat s postupy dekonstrukce (CIB 2001). 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 vytrídění odpadu (Wang et al. 2010). Tato konkrétní část může také vyžadovat rozhodnutí, zda se nasadí metoda separace betonu od jeho ocelové výztuže.

### **4.1.3. 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 matečního betonu, jako jsou kvalita původní směsi, její pevnost v tlaku a navržený stupeň vlivu prostředí (Xiao 2018). Pokud jsou panely během demolice zničeny, smíchány s jinými materiály a nejsou jasně roztrženy podle typu, výsledný materiál je degradován a stane se běžným demoličním odpadem, což vyžaduje nakládání v souladu s příslušnými předpisy (European Commission 2016c).

U velkých panelů je nutné rozpojit je pneumatickým kladivem (nebo jiným vhodným nástrojem) na vhodně velké kusy pro další zpracování (ISO 2015). 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 (Pedro et al. 2015). Poté lze provést separaci ocelové výztuže od betonu, dobře známý proces, při kterém se používá systém detekce kovů a magnetický separátor, případně mechanické třídění (Coelho a De Brito 2013). 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 síťové 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 (Garbarino a Blengini 2013). Na konci fáze III. zpracování zdroje je sice vytvořeno RCA, ale stále je třeba provést kontrolu kvality.

#### 4.1.4. 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>157</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 (Český normalizační institut 1997), ČSN EN 1097-6 (Český normalizační institut 2014), ČSN EN 933-4 (Český normalizační institut 2008c) a ČSN EN 1097-2 (Český normalizační institut 2010) 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 (European Commission 2011) a norem ČSN EN 12620+A1 (Český normalizační institut 2008a). Pro návrh směsí RAC lze obvykle využít certifikované kamenivo RCA s deklarovanými parametry. Pokud však není známa kvalita RCA, což je vysoce pravděpodobná situace 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.

---

<sup>157</sup> Databáze charakteristik RCA, dostupná veřejná či interní databáze uživatele (např. výrobce či dodavatele betonu), která obsahuje zejména mechanické a fyzikální charakteristiky využívaných kameniv. Informace mohou pocházet např. z prohlášení o shodě nebo z provedených průkazných normových zkoušek.



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

#### **4.1.5. 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 směsí 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 ČSN EN 12350-2 (Český normalizační institut 2020), ČSN EN 12350-6 (Český normalizační institut 2009b), ČSN EN 12350-7 (Český normalizační institut 2009c), ČSN EN 12390-3 (Český normalizační institut 2009d), ČSN EN 12390-5 (Český normalizační institut 2009a), ČSN EN 12390-7 (Český normalizační institut 2001) 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 směsí RAC může být aktualizována pro další využití a může být zahájena širší výroba směsí RAC pro konstrukční využití. Pokud některá z hodnot získaných pro výše uvedené parametry nesplňuje požadavky na strukturální RAC, je nutné se vrátit, zjistit důvod nesrovnalosti, změnit návrh směsi a opakovat výrobu a testování šarže RAC.

#### **4.1.6. 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 nevhodnější 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.

## 4.2. 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. Objem jádrových vývrtů zřídka dosahuje dostatečnému objemu pro objektivní posouzení celého objektu, avšak zkoušky je nutné provádět na minimálních objemech zkušebních navážek, které jsou definovány vždy příslušnou normou. Jednotlivá minimální množství zkušebních navážek jsou uvedena pro každou dílčí zkoušku dále v textu. V uváděném experimentálním případě byly zkušební vzorky (větší kusy betonových panelových 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. Dále jsou popsány jednotlivé zkoušky.

### 4.2.1. Stanovení zrnitosti kameniva – síťový rozbor

Nezbytnou charakteristikou pro stanovení nové receptury betonu z RCA je zjištění jednotlivých poměrů frakcí pomocí síťové analýzy a následné stanovení tzv. křivky zrnitosti kameniva. V prezentovaném experimentu je vycházeno z normy EN 933-1 (CEN 2012). 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 EN933-2 (Český normalizační institut 1997) 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. Byly zaznamenány hmotnosti kameniva zachyceného na každém dílčím síti a procento takto zachyceného kameniva dílčích frakcí bylo vypočteno podle vztahu dle normy ČSN EN 933-1 (CEN 2012):

$$a_i = \frac{R_i}{M_1} 100 [\%] \quad (5)$$

, kde  $M_1$  je celková hmotnost zkušební vzorku a  $R_i$  je hmotnost materiálu zachyceného

na každém dílčím 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 sítech s většími otvory použité sady normových sít a je vyjádřen vztahem:

$$A_i = a_i + a_{i+1} + a_{i+2} + \dots + a_n \quad [\%] \quad (6)$$

, kde

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

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

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

$$Z_i = 100 - A_i \quad [\%] \quad (7)$$

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

$$100k + D = 900 \quad (8)$$

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

$$k = \sum \frac{Z_i}{100} \quad (9)$$

, kde

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

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

$$D = \sum y_i = (n - k)100 \quad (10)$$

, kde

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

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

## 4.2.2. Stanovení množství jemných částic

Pro stanovení obsahu jemných částic v kamenivu byla použita norma ČSN EN933-1(CEN 2012). Po propadu navážky kameniva přes všechna síta včetně síta 0,063 mm byl tento zbytek sušen 24 hodin při  $110 \pm 5$  °C. Následně byl vzorek přirozeně ochlazen a byla zvážena hmotnost  $M_2$ . Procento jemných částic bylo vypočteno podle vztahu z normy (CEN 2012):

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} 100 [\%] \quad (11)$$

, 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. Podle Tab. 6 je obsah jemných částic vyhodnocen a roztríděn. Výsledky podílu jemných částic  $M_2$  jsou popsány v kapitole výsledky.

Tab. 6 Vyhodnocení obsahu jemných částic pro frakci 0–4mm (CEN 2012)

Frakce kameniva	Zachycené podsítné na sítu 0.063 mm	
	$\leq 3\%$	f3
	$\leq 10\%$	f10
<b>0–4 mm</b>	$\leq 16\%$	f16
	$\leq 22\%$	f22
	$> 22\%$	f declare

Výslednou křivku zrnitosti pak vyjadřuje popisná charakteristická hodnota  $F$  dle Hummela, dána vztahem:

$$F = \frac{(f_i m_i)}{100} \quad (12)$$

Logaritmický tvar křivky je dán vztahem:

$$f_i = 100 \log (10 d_i) \quad (13)$$

, kde

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

### 4.2.3. 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 (Český normalizační institut 2008c), kde  $D$  je tzv. horní velikost zrna. Podstatou zkoušky je třídění jednotlivých zrn navážky dle poměru délky k tloušťce pomocí digitálního dvoučelistového posuvného měřidla na kubická a nekubická zrna. Index byl stanoven na zrnech s poměrem rozměrů délky  $L$  ku tloušťce  $E$  větší než 3. Tvarový index  $SI$  byl vypočten dle vztahu z normy ČSN EN 933-4:

$$SI = \frac{M_2}{M_1} 100[\%] \quad (14)$$

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

### 4.2.4. 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 (Český normalizační institut 2014). Objemová hmotnost byla stanovena na navážce kameniva vysušené v sušárně při  $110 \pm 5$  °C a poté pomocí pyknometrické metody (Český normalizační institut 2014). Nejprve byla navážka ponořena do vody v pyknometru, odstraněny vzduchové bubliny a takto připravená navážka byla zvážena. Poté byla navážka vyjmuta, pyknometr naplněn vodou a zvážen. Princip této zkoušky spočívá v rozdílu hmotností pyknometru s navážkou a bez navážky a v míře saturace zrn. Zdánlivá objemová hmotnost  $\rho_a$ , objemová hmotnost  $\rho_{rd}$  (někdy též  $\rho_{odd}$ ) navážky vysušené v sušárně a objemová hmotnost  $\rho_{ssd}$  nasycené navážky a povrchově osušené, byly vypočteny dle vztahů z normy ČSN EN 1097-6 (Český normalizační institut 2014):

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad [\text{Mg} / \text{m}^3] \quad (15)$$

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad [\text{Mg} / \text{m}^3] \quad (16)$$

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad [\text{Mg} / \text{m}^3] \quad (17)$$

, 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 ponořenou 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 (Český normalizační institut 2014):

$$WA_{24} = \frac{100 (M_1 - M_4)}{M_4} \quad [\%] \quad (18)$$

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

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

Zkouška RCA odolnosti proti drcení byla otestována metodou Los Angeles dle normy ČSN EN 1097-2 (Český normalizační institut 2010) na velikosti navážky  $5000 \pm 5g$ . Součinitel Los Angeles  $LA$  byl následně vypočten dle vztahu normy:

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad [\%] \quad (19)$$

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

### 4.3. 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. Zásadními parametry 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.

### 4.3.1. 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. Mísicí poměry frakcí jemného a hrubého kameniva byly stanoveny dle Fullerovy rovnice (Fuller a Thompson 1907). Fullerova křivka je dána vztahem:

$$y = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,5} \quad [\%] \quad (20)$$

, kde

$y$  ... propad sítem o průměru oka  $d$  [%]

$d$  ... průměr oka dílčího síta [mm]

$D$  ... maximální velikost oka v normové řadě sít [mm]

### 4.3.2. 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 nasákavosti kameniva RCA bylo nutno zvýšit množství záměsové vody o tzv. přidanou vodu pro ovlhčení zrn kameniva RCA.

### 4.3.3. Stanovení dílčích složek betonové směsi

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

$$\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_p}{\rho_p} = 1 - \frac{V_z}{100} \quad [\%] \quad (21)$$

, 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 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_v$	... objemová hmotnost vody, ve výpočtech používáno $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,
$m_k$	... množství kameniva [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_k$	... objemová hmotnost kameniva [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$m_p$	... množství příměsi [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_p$	... objemová hmotnost příměsi [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$V_z$	... 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  $M$  (Českomoravský beton a. s. 2013):

$$M = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_k} \quad [\%] \quad (22)$$

, kde

$\rho_s$  – sypná hmotnost kameniva v setřeseném stavu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_k$  – objemová hmotnost zrn kameniva [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], Pokud není stanovena laboratorně, pak se použije pro přírodní kamenivo hodnota  $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

#### 4.3.4. Stanovení cen směsí recyklovaných betonů

Jednotkovou cenu recyklované betonové směsi je v současnosti obtížné stanovit, jelikož současně dostupní dodavatelé betonů takové produkty nenabízejí. Proto bylo nutné v rámci práce stanovit princip výpočtu jednotkové ceny čerstvé směsi recyklovaného betonu pro 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 všech frakcí a přičtení jednotkové ceny recyklovaného kameniva všech frakcí, tedy dle následujícího vztahu:

$$C_{RAC} = C_{EQ} - C_{NA,sub} + C_{RCA} \quad [\text{Kč}/\text{m}^3] \quad (23)$$

, kde

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

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



$C_{NA,sub}$  – jednotková cena substituce přírodního kameniva všech frakcí ve směsi [Kč/m<sup>3</sup>]

$C_{RCA}$  – jednotková cena recyklovaného kameniva všech frakcí ve směsi [Kč/m<sup>3</sup>]

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

$$C_{NA,sub} = \sum_{f=1}^n C_f V_{f,sub} \quad [\text{Kč/m}^3] \quad (24)$$

, kde

$C_{NA,sub}$  – jednotková cena substituce přírodního kameniva všech frakcí ve směsi [Kč/m<sup>3</sup>]

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

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

$f$  – frakce kameniva

$n$  – počet frakcí,

Pozn.: V této práci je uvažováno se třemi frakcemi:  $n=3$  a sice frakce 0–4, 4–8 a 8–16 mm. Substituce probíhá ve všech frakcích.

#### 4.4. RÁMEC OPTIMALIZAČNÍHO VÝZKUMNÉHO PŘÍSTUPU

Rámec optimalizačního výzkumného přístupu (dále jen optimalizační rámec) je definován a je rozdělen do třech hlavních kategorií:

- (I) data pre-processing,
- (II) diskrétní optimalizace,
- (III) segmentace výsledků a jejich grafická reprezentace.

Následující kapitola popisuje podrobné fungování diskrétního optimalizačního modelu jako nástroje pro experimentální ověření komplexního systému výroby a dodávky konvenčních a recyklovaných betonů s cílem naplnit kritérium ekonomické výhodnosti. V kontextu této kapitoly je vhodné definovat specifické užití názvosloví optimalizačního rámce v podobě definice entit optimalizačního rámce.

##### 4.4.1. Definice entit optimalizačního rámce

*inicializační rozhodnutí* – je vstupním předpokladem smysluplnosti optimalizace. Logicky navazuje na předchozí část "rámec materiálového výzkumného přístupu". Jedná se o rozhod-

nutí, zdali bude aplikována optimalizace s využitím pouze NAC nebo také s RAC a toto rozhodnutí je závislé na legislativním požadavku nebo dobrovolnosti objednatele využít recyklovaný materiál pro betonové konstrukce, pokud to technické podmínky a mechanicko-fyzikální vlastnosti materiálu umožní.

*vstupní datový zdroj (input data)* – soubor informací, potřebných pro definování ekonomického a matematického modelu. Vstupní data jsou potřebné pro definování fyzikálně-mechanických parametrů betonů (např. pevnostní třída betonu, stupeň vlivu prostředí apod.), objemových charakteristik (např. objem prvků, počet prvků, celkový objem betonu příslušné pevnostní třídy) a jejich numerické hodnoty jsou konstantami pro výpočtovou část.

*data pre-processing* – přípravná fáze před samotnou optimalizací, ve které jsou shromažďovány vstupní data, která mohou být částečně upravena do vhodnější podoby pro další práci s nimi. Může to být filtrování a třídění podle několika kritérií, např. ID betonárny, ID konstrukčních prvků atd. Podrobné vysvětlení třídění dat s příklady je uvedeno v následujících kapitolách. Například automatizovaná podoba generovaných souborů z BIM prostředí se může lišit od požadované podoby ve formě tabulkového procesoru vstupních souborů pro prostředí MATLAB. Tato fáze může být u komplexnějších modelů součástí samotného optimalizačního modelu.

*diskrétní optimalizace* – je optimalizace za využití takového optimalizačního modelu, který je samostatnou entitou. Diskretizace modelu spočívá v hledání konečného počtu přípustných řešení vzhledem k omezenému, tedy konečnému počtu vstupních dat (např. konečný počet betonáren s konečným počtem typů betonů). Výsledkem optimalizace jsou výstupní data v podobě jednotlivých optimálních a sub-optimálních řešení.

*seznam konstrukčních prvků* – je maticově uspořádaný seznam prvků s danou strukturou a rozsahem parametrů. Velikost matice je dána počtem konstrukčních prvků a jejich charakteristik. Konkrétní příklad takové matice je uveden dále ve výsledcích a v přílohové části práce.

*externí betonárny* – jsou takové betonárny, které figurují v dodavatelském scénáři jako nevlastněné dodavatelem betonu. Pro tyto betonárny není známa přesná receptura, ale pouze deklarované vlastnosti.

*ceny externích betonů* – ceny jsou zadávány jako jednotkové ceny betonů, ve kterých jsou zakomponovány přímé a nepřímé náklady. V těchto cenách se může promítnou podnikatelská strategie, lobby, smluvní slevy a další faktory, mající vliv na konečnou cenu, která může a

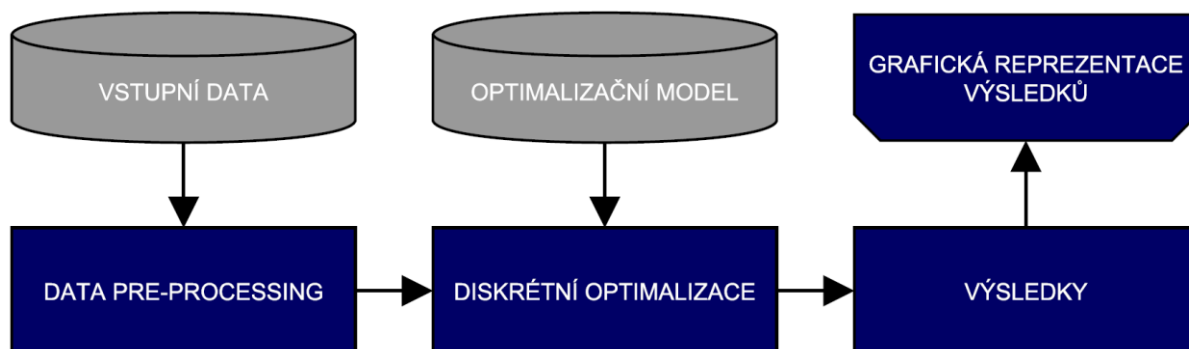
nemusí být tržně objektivní. Doprava může být kalkulována odlišnými způsoby, které jsou uvedeny níže v rámci popisu modelu.

*interní betonárny* – jsou fiktivně vytvořené betonárny, které figurují v dodavatelském scénáři jako vlastněné zhotovitelkou stavební společností, která je rovněž výrobcem, resp. dodavatelem betonu. Pro tyto betonárny je známa přesná receptura betonu a jednotkové ceny složek betonu a rovněž stanoveny jednotkové náklady na dopravu za kilometr. Těmto betonárnám bylo jako jediným v logistickém scénáři přiřazena možnost vyrábět recyklované betony. Ne vždy však zhotovitel vlastní betonárnu, a proto v optimalizačním algoritmu mohou ale nemusejí nutně figurovat.

*ceny interních betonů* – Ceny spojené s dodávkou betonu z interních betonáren, které jsou dány výpočtem viz kapitola 4.3.4. Ve své podstatě se skládají z přímých nákladů, tzn. přímých mezd, přímého materiálu, provize, výrobní dodávky a rovněž z nepřímých nákladů, jako jsou platy na kontrolu výroby, náklady na kontrolu kvality, pojištění a odpisy atd.

#### 4.4.2. Chronologická demonstrace funkce modelu

Optimalizační model je definován zdrojovým kódem v příslušném programovém prostředí (v tomto případě v MATLAB), které využívá vstupních dat, zpracovaných v tabulkovém editoru. Primární funkcí modelu je vybrat z daných možností takového dodavatele betonových směsí, který bude environmentálně i ekonomicky výhodný. Environmentální aspekt výběru je však ponechán na uživateli – nástroj pouze poskytne škálu možností, ze kterých je následně možné vybrat cenově přijatelnou variantu. Nástroj dává rovněž příležitost vybrat další (záložní) varianty dodavatelského scénáře (druhý ekonomicky nejvýhodnější, třetí, ... atd.). Vnitřní struktura modelu je členěna do chronologicky navazujících tzv. funkčních modulů viz Obr. 21.



Obr. 21 Schéma chronologického postupu funkčních modulů optimalizačního modelu (vlastní zpracování)

## (I) Data pre-processing

První část zahrnuje úpravu získaných vstupních dat, respektive parametrů. Parametry zpracování pocházejí z více zdrojů, jelikož v současné době není prakticky nasazena žádná technologie, která by byla schopna poskytnout sjednocená data, potřebná pro optimalizační výpočet. 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. Vstupní parametry je možné z hlediska dostupnosti dat rozdělit následovně.

- *Základní (primární) zdroje vstupních parametrů* – jsou takové informace, které je nezbytné obstarat od konkrétní osoby či společnosti, například datové informační zdroje od projektanta a jsou jimi například informace o konstrukčních prvcích nebo datové zdroje od dodavatele betonu (interní nebo externí betonárna). Tato data jsou jedinečná a v případě nemožnosti jejich obstarání je velmi obtížné nasadit přesnou optimalizaci, resp. výpočet může být zatížen takovými chybami a nepřesnostmi, že se modelovaný scénář stane irelevantním.
- *Podpůrné (sekundární) zdroje vstupních parametrů* – jsou informace, které je možné obstarat více různými způsoby. Může se jednat například o recepturu betonu, jejíž návrh a množství jednotlivých složek betonové směsi se může lišit dle použité metody. Tyto data je možné obstarat z veřejně dostupných zdrojů (web, osobní komunikace, užití různých mapových aplikací apod.).

### Rozbor vstupních parametrů modelu

Přehledná struktura vstupních parametrů umožňuje následnou jednodušší, a především rychlejší práci s modelem včetně bezproblémového čtení dat v rámci optimalizačního algoritmu. V tomto kontextu následuje nově definována standardizovaná struktura modelových dat a příklady jejich tabulkové podoby.

#### *Základní (primární) zdroje vstupních parametrů*

Jedním z primárních datových zdrojů je seznam konstrukčních prvků v posuzované stavbě včetně jejich umístění v rámci budovy (podlaží). Vhodným zdrojem těchto dat je informační model budovy BIM. Pokud je takový model zpracován ve vhodné struktuře a standardu, obsa-

huje kromě geometrie rovněž strukturované informace o aplikovaných betonech v řešeném objektu. Jestliže jsou využita informační data z BIM pro optimalizační výpočty a následně je zpětně model obohacen o data nová, pak můžeme tento proces definovat jako tzv. "Aktivní BIM" přístup. Datový zdroj konstrukčních prvků objektu je tedy soubor dat vygenerovaných z projektové dokumentace v digitální podobě. Minimální potřebné parametry pro optimalizační model jsou jednoznačná identifikace prvku, kterým je určitý typ ID prvku (tomu je věnována podrobněji kapitola 5.2.1 dále v práci), stupeň vlivu prostředí, objem prvku a pevnostní třída betonu. V Tab. 7 je uveden jednoprvkový příklad struktury takovýchto informačních dat v tabulkovém editoru. V případě automatizovaného generování parametrů jednotlivých prvků z 3D BIM modelu budovy je nutno exportní data vhodně předdefinovat již v projektovém prostředí (např. Autodesk Revit) a exportovat již ve vhodné struktuře pro následné bezproblémové čtení optimalizačním algoritmem.

**Tab. 7 Příklad vstupní matice konstrukčního prvku**

Název konstrukčního prvku	Stupeň vlivu prostředí *	Objem prvku	Pevnostní třída betonu
Sloup_01_01	XC2	8,5	C20/25

Pozn.: Příklad uveden pro jeden konstrukční prvek; \*dle ČSN EN 206-1

Dalším primárním datovým zdrojem je databáze dodavatelů betonů (seznam betonáren). Je nutno vybrat pouze relevantní betonárny, tzn. po zohlednění logistického scénáře a z něj plynoucí dojezdové vzdálenosti a dobu přepravy (z betonárny na staveniště) za související dopravní situace. Vygenerování betonáren a identifikace vzdáleností je bezproblémová pomocí libovolného mapového portálu. Některé mapové portály umožňují tzv. automatizované dotazování na požadovaná data pomocí technologie API<sup>158</sup>. Po zadání dotazu vrátí portál uživateli požadovaná data. Tohoto způsobu je možné využít jak pro zjištění vzdálenosti, tak pro zjištění doby přepravy se zohledněním aktuální dopravní situace ve stanoveném čase. Seznam všech betonáren v České republice i Slovenské republice je možné získat z internetového portálu. Pokud takový portál není k dispozici pro jiné státy, je nutno seznam vytvořit, což může být časově náročné. V Tab. 8 je zobrazen typický příklad struktury dat externích betonáren, která byla vytvořena pro použití v optimalizačním modelu.

<sup>158</sup> API = z angl. Application Programming Interface. API jsou programové celky, které programátor používá namísto toho, aby je sám naprogramoval.

**Tab. 8 Příklad vstupní matice seznamu externích betonáren**

ID betonárny	Název betonárny	Vzdálenost (po komunikaci) z betonárny na staveniště [km]*
01	Betonárna x	50

Pozn.: příklad uveden pro jednu betonárnu x; \*vzdálenosti získány pomocí API požadavku na mapový portál prostřednictvím skriptu Python.

Do optimalizačního modelu je možné zakomponovat rovněž vlastní dodavatele betonu a pracovat s modelem jako s nástrojem, který dává možnost porovnat uživateli dodávku betonu vlastní s relevantní konkurencí. Příklad těchto parametrů je zobrazen v Tab. 9 kde podstatná data jsou vzdálenost [km] a jednotkové náklady dopravy [Kč/km].

**Tab. 9 Příklad vstupní matice seznamu interních betonáren**

ID betonárny	Název betonárny	Vzdálenost (po komunikaci) z betonárny na staveniště [km]*	Jednotkové náklady dopravy [Kč/km]**
02	Betonárna YZ	50	40

Pozn.: příklad uveden pro jednu betonárnu; \*vzdálenosti získány pomocí API požadavku na mapový portál pomocí skriptu Python; \*\* Náklady na dopravu jsou uvedeny jako konečné vč. všech souvisejících položek kalkulačního vzorce.

Parametry ceny betonů externích betonáren, získané z veřejně dostupných ceníků, jsou v rámci dat strukturovány do souboru matic. Každá matice vyjadřuje ceník jedné externí betonárny. V Tab. 10 je zobrazena příkladná struktura těchto dat.

**Tab. 10 Příklad vstupní matice cen externích betonáren**

Pevnostní třída betonu	Stupeň vlivu prostředí								
	NS*	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	...	XA3
C08/10	1260	0	0	0	0	0	0	...	0
C12/15		1350	0	0	0	0	0	...	0
C16/20		1450	1450	0	0	0	0	...	0
C20/25		1550	1550	1550	1580	0	0	...	0
C25/30		1650	1650	1650	1650	1650	1650	...	1650
C30/37		1800	1800	1800	1800	1800	1800...		1800

Pozn.: Ceny uvedeny v Kč/m<sup>3</sup>; \*NS – stupeň vlivu prostředí není specifikován, což je příznačné u betonů nižších pevnostních tříd.

Ceny jsou přidruženy stupni vlivu prostředí (horizontálně) a druhu betonu, resp. pevnostní třídy betonu (vertikálně). Pokud betonárna daný druh betonu nevyrobí, je v cenovém poli uvedena nula. Stupně vlivu prostředí, stejně tak jako pevnostní třídy betonu jsou definovány v souladu s normou ČSN EN 206-1 (CEN 2016) a zohledňuje stupně: X0; XC1; XC2; XC3; XC4; XD1; XD2; XD3; XS1; XS2; XS3; XF1; XF2; XF3; XF4; XA1; XA2 a XA3 (Tab. 10 je v tomto směru zkrácena se zobrazením třech teček).

Parametry jednotkových cen recyklovaných betonů pro interní betonárny jsou definovány rovněž souborem matic, z nichž každá obsahuje ceník pro jednu interní betonárnu. V Tab. 11 je zobrazena struktura těchto zdrojových dat pro model. Ceník je rozdělen na vertikálně orientovaný parametr (stupeň vlivu prostředí) a horizontálně orientované parametry (typ RAC a pevnostní třída betonu).

Tabulka zohledňuje stupně vlivu prostředí: X0; XC1; XC2; XC3; XC4; XD1; XD2; XD3; XS1; XS2; XS3; XF1; XF2; XF3; XF4; XA1; XA2 a XA3 (Tab. 11 je v tomto směru zkrácena a nahrazena symbolem ...) pro tři střední nejčastěji užívané pevnostní třídy betonu se substitucí členěnou po krocích o velikosti 5 %.

**Tab. 11 Příklad vstupní matice ceníků interních betonáren (struktura listu jedné betonárny)**

Stupeň vlivu prostředí	Receptura betonu / Pevnostní třída betonu									
	RAC-02-00			RAC-02-05			...	RAC-02-40		
	C20/25	C25/30	C30/37	C20/25	C25/30	C30/37	...	C20/25	C25/30	C30/37
XC1	1387	1387	1387	1363	1363	1363	...	1203	1203	1203
XC2	1439	1439	1439	1416	1416	1416	...	1256	1499	1499
XC4	0	0	1506	0	0	1483	...	0	0	1580
XF1	0	0	1485	0	0	1462	...	0	0	1565
XF3	0	0	1540	0	0	1470	...	0	0	1571
XA1	0	0	1494	0	0	1518	...	0	0	1638

Kalkulace ceny dopravy dle jednotlivých dodavatelů betonu je poměrně komplikovaným parametrem, protože napříč spektrem dodavatelů jsou v České republice využívány tři různé přístupy:

- náklady na dopravu za km/m<sup>3</sup> betonu,
- náklady na dopravu dle dopravního pásma za m<sup>3</sup> betonu (počítá se vzdálenost z betonárny na staveniště a zpět),

- náklady na dopravu dle dopravního pásma za jeden autodomíchávač (nutno zohlednit objem bubnu).

Parametry cen dopravy jsou z tohoto důvodu koncipovány jako matice viz Tab. 12, kde vertikálně jsou zobrazeny jednotlivé betonárny dle jejich ID a názvu. Třetí sloupec definuje, jaký objem bubnu autodomíchávače betonárna nejčastěji využívá. Čtvrtý sloupec je parametr, který má proměnnou hodnotu podle typu kalkulace dopravy. Pokud je uvedena hodnota 0 (nula), znamená to, že cena je kalkulována dle dopravního pásma za jeden autodomíchávač. Pokud je uvedena hodnota 1, pak je cena kalkulována dle pásma za každý  $\text{m}^3$  betonu. Zde zároveň platí, že minimální množství, které lze kalkulovat je objem bubnu jednoho autodomíchávače. A konečně, pokud je zde uvedeno číslo větší než 0, pak toto číslo znamená cenu dopravy za  $\text{km}/\text{m}^3$  betonu. Rozhodnutí, kdy bude využit konkrétní typ dopravy, je rozhodovací schopností samotného algoritmu.

**Tab. 12** Příklad vstupní matice cen dopravy z externích betonáren (uveden příklad pro trojici betonáren 1 až 3 s různými přístupy kalkulace ceny dopravy)

ID	Název betonárny	Objem bubnu autodomíchávače	Parametr	Cena za pásmo [Kč]					
				Pásmo = vzdálenost na stavenišť a zpět [km]					
				0-5	6-8	9-10	11-13	...	96-100
01	betonárna_1	8	0	450	600	600	850	...	1250
02	betonárna_2	8	1	110	120	120	135	...	680
03	betonárna_3	8	40	0	0	0	0	...	0

Pozn.: Pásmo = vzdálenost z betonárny na stavenišť a zpět [km]

#### *Podpůrné (sekundární) zdroje vstupních parametrů*

Receptury interních betonových směsí (např. s použitím náhrady NA za RCA) byly navrženy samostatně a do výpočtů vstupuje v rámci optimalizačních zdrojových dat již konečná jednotková cena za celou směs. Způsob výpočtu je uveden v kapitole 4.3.4.

Koordinační souřadnice stavenišť a betonáren je nutno definovat v předstihu. Na základě těchto dat je pak možné generovat dopravní trasy betonu (generované na základě GPS souřadnic pomocí API zvolené mapové platformy) a případně jejich alternativy. Pro státy střední Evropy (Česká republika, Slovensko, Maďarsko) existují určité možnosti pro hledání dodavatele betonu (betonárny) pomocí online mapových aplikací, jako jsou Beton Server (AUREA INVEST a.s.



2019), Cemex (CEMEX S.A.B. de C.V. 2019), Transbeton (ZEPIKO GROUP 2019), Transportbeton (Českomoravský beton a. s. 2019) nebo Zapa (ZAPA a.s. 2019). Pouze Beton Server je komerčně nevázan na konkrétního dodavatele či výrobce betonu a poskytuje tedy informace o několika konkrétních závodech vlastněných různými společnostmi. Hledání probíhá pouze podle polohy staveniště a výsledky se zobrazují v dojezdové vzdálenosti do 50 km. Ostatní aplikace jsou propojeny vždy pouze s určitým konkrétním dodavatelem betonu. Přehled možností těchto aplikací je uveden v Tab. 13.

**Tab. 13 Platformy pro hledání dodavatelů betonu**

Aplikace	Vyhledávání			Reprezentace výsledků		
	podle pozice staveniště	podle doby dopravy	podle pevnostní třídy betonu	Cena	Vzdálenost	Čas
Beton Server	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano	Ne
Cemex	LTD **	GM*	Ne	Ne	GM*	GM*
Transbeton	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano	Ne
Transportbeton	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne
Zapa	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne

Pozn.: \* GM = přesměrování na Google Mapy; \*\* LTD = limitované hledání pouze pro menší region nebo oblast.

Vyhledávání v uvedených online aplikacích je založeno na lokalizaci staveniště a doba dopravy směsi není ve většině případů podporována jako vstupní parametr. Typ betonu jako vstupní parametr je podporován pouze ve dvou případech a výsledky jsou ve většině případů generovány pouze jako vzdálenosti. V několika případech je cena za dodávku generována, zatímco doba přepravy není generována v žádné z aplikací. Z výše uvedených důvodů (nenalezení vhodného nástroje) bylo přistoupeno k vlastnímu shromáždění vstupních dat optimalizačního modelu pomocí aplikačního programovacího rozhraní (API). API jsou sady protokolů a nástrojů pro tvorbu software a aplikací. Web mapping API (WMA) jsou online poskytované aplikační nástroje z mapových serverů jako jsou Mapy Google, Bing Maps, MapQuest, HERE, Yahoo Maps atd., užitečné pro lepší vývoj webových aplikací s geoprostorovým obsahem (GeoCMS). Tyto aplikace jsou známé také jako *Map Mashups* (Batty et al. 2010) nebo *Web Mapping 2.0* (Haklay et al. 2008). Pro efektivní rozhodovací proces je vhodné, aby pomocí API byla

vygenerována více než jedna možná dopravní trasa. Tuto možnost umožňuje rozhraní společnosti Google a proto bylo v rámci práce využito této platformy.

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. Python je objektově orientovaný programovací jazyk, srovnatelný s Perl, Ruby, Scheme nebo Java (Python Software Foundation 2019).

Geoprostorová vstupní data byla získána z veřejně dostupných zdrojů. Pozice betonáren obvykle definují vlastníci betonáren jako koordinační systém – Global Positioning System (GPS). Po následném převedení koordinátů do formátu CSV, což jsou hodnoty oddělené čárkami (Shafranovich 2005), je možné vstupní data reprezentovat dle příkladu v Tab. 14, kde je uvedena část koordinačních souřadnic GPS, převedených do formátu CSV.

**Tab. 14 Geoprostorová vstupní data (příklad)**

ID betonárny / ID staveniště	Koordináty (v souřadnicovém systému GPS)		CSV formát
	zeměpisná šířka	zeměpisná délka	
SP01	49°08'31.434"N	16°35'56.183"E	49.142065, 16.598940
CS01	49°11'45.362"N	16°36'18.856"E	49.195934, 16.605238

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. Počet získaných tras byl omezen možnostmi, resp. hustotou silniční sítě v řešené oblasti. Příklad kombinace vrácených dat je uveden v Tab. 15. Číslo tras představuje šestice číslic (první dvojice je ID číslo betonárny, druhá dvojice je ID číslo staveniště; třetí dvojice je číslo trasy).

**Tab. 15 Vrácená data z Google Maps API pomocí Python skriptu (příklad s třemi různými trasami, jejich vzdálenosti a časy pro spojnici dvou bodů)**

Trasa (spojnice bodů)	Číslo trasy	Vzdálenost [metry]	Čas dopravy [sekundy]
CP01-CS01	010101	8024	938
CP01-CS01	010102	11273	1155
CP01-CS01	010103	15234	1235

## (II) Diskrétní optimalizace

Univerzální nástroj je tvořen diskretním 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 (The MathWorks Inc. 2020). Tímto softwarem disponuje Fakulta stavební VUT v Brně. Pro vývoj byla využita verze R2017a s následujícími minimálními a doporučenými požadavky pro 64-Bitový operační systém a související hardware vybavení (The MathWorks Inc. 2017):

- operační systém: Windows 10 / Windows 8.1 / Windows 8.1 / Windows 7 Service Pack 1 / Windows Server 2016 / Windows Server 2012 R2 / Windows Server 2012 / Windows Server 2008 R2 Service Pack,
- procesor: Minimum jakýkoliv Intel nebo AMD x86-64; Doporučeno Intel or AMD x86-64 se čtyřmi jádry a podporou AVX2,
- pevný disk: Minimum 2.0 GB uložení pouze pro MATLAB, 4-6 GB pro typickou instalaci,
- RAM: Minimum 2 GB; pro Polyspace se doporučuje 4 GB na jádro,
- není nutná žádná zvláštní grafická karta. Doporučuje se hardwarově akcelerovaná grafická karta podporující OpenGL 3.3 s 1 GB paměti GPU.

## (III) Segmentace výsledků a jejich grafická reprezentace

Výsledky jsou upraveny do uživatelsky přívětivé (čitelné) podoby a následně zpracovány generátorem grafů (na základě vyfiltrovaných požadovaných informací). Grafy jsou generovány pro každý prvek (nebo skupinu prvků) objektu přímo pomocí příkazů z prostředí MATLAB. Pro reprezentaci výsledků model umožňuje použití třech typů grafů:

- graf dle ID externích betonáren a sloupcovým zobrazením celkové ceny,
- graf dle ID externích betonáren a sloupcovým zobrazením celkové ceny a se zobrazením závislosti ceny na dopravní vzdálenosti,
- graf dle ID interních betonáren se sloupcovým zobrazením celkové ceny a zohledněním % substituce RCA,
- souhrnný koláčový graf množství poměru RAC a NA v rámci optimálního řešení.

Pro výsledky v této práci byl zvolena interpretace grafů kombinovaných s ID betonárny a celkovou cenou interních i externích dodavatelů.

### 4.4.3. Podrobný popis modelu v prostředí MATLAB

Následující kapitola obsahuje ohraničené ukázky zdrojového kódu algoritmu v jazyce prostředí MATLAB a doprovodný text. Načtení zdrojových vstupních dat spočívá v příkazu `xlsread` a výpisu jednotlivých parametrů do vnitřních souborů pomocí příkazu `fprintf`. Pro vstupní data cen externích i interních betonů je definován rozsahem `i=1:length (sheets)`, který zajišťuje načtení vstupní matice s jakýmkoliv počtem listů. Výsledné dvě 3D matice zahrnují informace o stupni vlivu prostředí, pevnostní třídě betonu a ID betonárny.

```
fprintf('Načítám XLS soubory...')
tic

fprintf('Prvky...')
[num,txt,row_prvky] = xlsread('PRVKY.xlsx');

fprintf('Seznam externích betonáren...')
[num,txt,row_seznam_externich_betonaren] = xlsread('SEZNAM_EXTER-
NICH_BETONAREN.xlsx');

fprintf('Cena dopravy externích betonáren...')
[num,txt,row_cena_externi_dopravy] = xlsread('CENA_DOPRAVY_EXTER-
NICH_BETONAREN.xlsx');

fprintf('Ceník externích betonáren...')
[status,sheets] = xlsfinfo('CENIK_EXTERNICH_BETONAREN.xlsx');

for i=1:length(sheets)
    id = sheets{i};
    matice_cen_externich_betonaren(:,:,str2num(id)) = xlsread('CE-
NIK_EXTERNICH_BETONAREN.xlsx',id,'E2:V7');
end;

fprintf('Ceník interních betonáren...')
```

```

[~,txt,raw_seznam_internich_betonaren] = xlsread('CENIK_INTERNICH_BETONAREN.xlsx');

fprintf('Ceník interních betonáren...')
[status,sheets] = xlsinfo('CENIK_INTERNICH_BETONAREN.xlsx');
for i=1:length(sheets)
    id = sheets{i};
    matice_cen_internich_betonaren(:,:,str2num(id)) = xlsread('CENIK_INTERNICH_BETONAREN.xlsx',id,'B2:AB8');
end;

fprintf('Seznam interních betonáren...')
[num,txt,raw_seznam_internich_betonaren] = xlsread('SEZNAM_INTERNICH_BETONAREN.xlsx');

fprintf('Ceník interních betonáren...')
[status,sheets] = xlsinfo('CENIK_INTERNICH_BETONAREN.xlsx');
for i=1:length(sheets)
    id = sheets{i};
    matice_cen_internich_betonaren(:,:,str2num(id)) = xlsread('CENIK_INTERNICH_BETONAREN.xlsx',id,'B2:AB8');
end;

```

Dále jsou v modelu definovány množiny proměnných (pomocí řetězcového pole):

- pevnostní třídy betonu,
- stupně vlivu prostředí,
- názvy interních betonů s uvedením množství substituce RCA.

```

pevnost_externich_betonu = {'C8/10' 'C12/15' 'C16/20' 'C20/25' 'C25/30' 'C30/37'};
stupen_vlivu_prostredi_externich_betonu = {'X0' 'XC1' 'XC2' 'XC3' 'XC4' 'XD1' 'XD2' 'XD3' 'XS1' 'XS2' 'XS3' 'XF1' 'XF2' 'XF3' 'XF4' 'XA1' 'XA2' 'XA3'};

pevnost_internich_betonu = {'C20/25' 'C25/30' 'C30/37'};
stupen_vlivu_prostredi_internich_betonu = {'XC1' 'XC2' 'XC4' 'XF1' 'XF3'

```

```
'XA1'};
nazev_smesi_internich_betonu = {'RAC-02-00', 'RAC-02-05', 'RAC-02-10', 'RAC-
02-15', 'RAC-02-20', 'RAC-02-25', 'RAC-02-30', 'RAC-02-35', 'RAC-02-40'};
```

Pro zohlednění dopravní pásma pro transport z externích betonáren, byla definována v modelu matice `radius`. Na jednom řádku, se nachází kilometráž pro jedno dopravní pásmo. Navržený model pracuje s 37 pásmy, které zahrnují dopravní vzdálenost staveniště 1 km až 150 km od betonárny.

```
radius = [ 1 , 2 , 3 , 4 , 5 ;
           6 , 7 , 8 , 0 , 0 ;
           9 , 10 , 0 , 0 , 0 ;
          11 , 12 , 13 , 0 , 0 ;
          14 , 15 , 0 , 0 , 0 ;
          16 , 17 , 18 , 0 , 0 ;
          19 , 20 , 0 , 0 , 0 ;
          21 , 22 , 23 , 0 , 0 ;
          24 , 25 , 0 , 0 , 0 ;
          26 , 27 , 28 , 0 , 0 ;
          29 , 30 , 0 , 0 , 0 ;
          31 , 32 , 33 , 0 , 0 ;
          34 , 35 , 0 , 0 , 0 ;
          36 , 37 , 38 , 0 , 0 ;
          39 , 40 , 0 , 0 , 0 ;
          41 , 42 , 43 , 44 , 45 ;
          46 , 47 , 48 , 49 , 50 ;
          51 , 52 , 53 , 54 , 55 ;
          56 , 57 , 58 , 59 , 60 ;
          61 , 62 , 63 , 64 , 65 ;
          66 , 67 , 68 , 69 , 70 ;
          71 , 72 , 73 , 74 , 75 ;
          76 , 77 , 78 , 79 , 80 ;
          81 , 82 , 83 , 84 , 85 ;
          86 , 87 , 88 , 89 , 90 ;
          91 , 92 , 93 , 94 , 95 ;
          96 , 97 , 98 , 99 , 100 ;
          101 , 102 , 103 , 104 , 105 ;
```

```

106 , 107 , 108 , 109 , 110 ;
111 , 112 , 113 , 114 , 115 ;
116 , 117 , 118 , 119 , 120 ;
121 , 122 , 123 , 124 , 125 ;
126 , 127 , 128 , 129 , 130 ;
131 , 132 , 133 , 134 , 135 ;
136 , 137 , 138 , 139 , 140 ;
141 , 142 , 143 , 144 , 145 ;
146 , 147 , 148 , 149 , 150 ; ];

```

Následně je model rozdělen do dvou částí: (a) Externí betonárny a (b) Interní betonárny. Důvodem je odlišný výpočet ceny za dopravu, ale rovněž rozdíl mezi výpočtem ceny betonu externích dodavatelů a kalkulace ceny betonů dle vlastní receptury.

#### (a) Externí betonárny

Jako první je ze vstupní matice pomocí příkazu `size` zjištěn rozměr proměnné, tedy počet řádků, který odpovídá počtu externích betonáren. Označení počtu iterací tvoří parametr `r`.

```

pocet_radku_SEZNAM_EXTERNICH_BETONAREN_xls =
size(raw_seznam_externich_betonaren,1);
r=0;

```

Následuje vytvoření parametru `vzdalenost_betonarny_od_stavby`, který je načten z matice `raw_seznam_externich_betonaren`, resp. z 3. sloupce této matice. Dále je ověřeno pomocí podmínky `if`, které betonárny mají vzdálenost od staveniště větší než nula. Jejich ID je pro nenulový počet betonáren zapsáno do vnitřní matice `raw_seznam_externich_betonaren`, resp. do prvního sloupce. Pokud parametr není znám (tzn. není nalezeno číslo), pak je do třetího sloupce vrácen nedefinovaný numerický výstup `NaN` (z angl. Not A Number).

```

for x = 1:pocet_radku_SEZNAM_EXTERNICH_BETONAREN_xls
    vzdalenost_betonarny_od_stavby = round(raw_seznam_externich_betonaren{x,3});
    if (vzdalenost_betonarny_od_stavby > 0 )
        ID_betonarny = raw_seznam_externich_betonaren{x,1};
    end
end

```

Dále je nutno dekodovat řetězcové pole (množiny proměnných pevnostní třídy betonu a stupně vlivu prostředí) na číslo (toto číslo odpovídá pořadí v řetězcovém poli).

Například pro beton z externí betonárny s pevnostní třídou C20/25, a stupněm vlivu prostředí XC2 bude přiřazena souřadnice {4,3} a model bude nadále pracovat s touto souřadnicí.

Příkaz `strcmp` poté vrátí porovnání proměnných pevnostních tříd betonů (`pevnost_externich_betonu` a `pevnostni_trida_prvku`) a stupňů vlivů prostředí (`stufen_vlivu_prostredi_externich_betonu` a `stufen_vlivu_prostredi`). Porovnává se vždy údaj dostupných betonů dané externí betonárny s údajem v seznamu konstrukčních prvků. Pro aplikaci binární proměnné byla vytvořena matice nul o velikosti  $6 \times 18$  (odpovídá 6 možným pevnostním třídám a 18 možným stupňům vlivu prostředí) a do ní zapsána hodnota 1 na přiřazené souřadnici řádku a sloupce, tedy např. na výše zmíněné pozici {4,3}.

```
radek = find(strcmp(pevnost_externich_betonu, pevnostni_trida_prvku));
    sloupec = find(strcmp(stufen_vlivu_prostredi_externich_betonu,
stufen_vlivu_prostredi));

    matice_nul = zeros(6,18);
    matice_nul(radek,sloupec) = 1;
```

Binární proměnná zajišťuje, aby se ve výpočtu zohlednily pouze ty betonárny, které disponují požadovaným typem betonu. Pokud betonárna disponuje takovýmto vhodným betonem, je vrácena hodnota 1. Naopak, pokud betonárna daný beton nevyrábí, je vrácena hodnota 0. Tato hodnota je pak vložena do nově vytvořené jednotkové matice s názvem `je_cena`. Ta je sumou logického součinu (`&`) matice cen externích betonů a maticí nul pro každé `x`.

```
je_cena = sum(sum(matice_cen_externich_betonaren(:, :, x) & matice_nul), '');
```

Pokud byla nalezena jednotková cena pro požadovaný typ betonu v dané externí betonárně (tzn. v matici `je_cena` je zapsána hodnota 1), uloží se tato jednotková cena do vnitřní matice `matice_cen_externich_betonuaren`, a to pro každé `x`.



```
if je_cena
    ceny_pouzitelnych_betonu = matice_cen_externich_betonaren(radek, sloupec, x);
```

Parametr `km_nebo_radius` je binární proměnná a rozlišuje, zdali se jedná o výpočet ceny dle km nebo dle dopravního pásma. Tento parametr je uveden v matici `raw_cena_externi_dopravy` ve 4 sloupci a nabývá hodnot 0 (cena dle dopravního pásma za domíchávač) nebo 1 (cena dle dopravního pásma za m<sup>3</sup>). Ve všech dalších případech se jedná o výpočet ceny dopravy za km.

```
km_nebo_radius = raw_cena_externi_dopravy{x, 4};
```

S parametrem `km_nebo_radius` pak dále pracuje finální podmínka pro stanovení ceny. Výpočet ceny je dle parametru `km_nebo_radius` rozdělen do třech následujících typů výpočtů. Pro každé `x` (tzn. počet externích betonáren; `x > 0`) následuje sestava příkazů `if` a `elseif`, které aplikují nasazení příslušného typu výpočtu kalkulace dopravy dle ceníků každé z betonáren.

Jestliže je hodnota `km_nebo_radius` rovna 0, použije se výpočet ceny dle daného dopravního pásma za autodomíchávač. Pro správné zařazení jednotkové ceny dopravního radiusu je aplikováno vyhledávání řádku `i` z matice `vzdalenost_betonarny_od_stavby`, který se rovná indexu sloupce v matici `radius`.

```
if (km_nebo_radius==0)
    [I, J] = find(radius==(vzdalenost_betonarny_od_stavby));
```

Cena za dopravní pásma je hledána jako hodnota `I+4` (resp. sloupec), protože ceník začíná na buňce `E`, tedy pátý sloupec pro každé `x`, respektive pro každý řádek. Obecný vztah pro výpočet ceny dle daného dopravního pásma za autodomíchávač je následující:

$$CD_{rm} = UC_r \frac{V_e}{V_m} \quad (25)$$

, 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;
```

Následuje definování výpisu výpočtu ceny.

```
if vypis_vypoctu_cen
    fprintf('ID betonárny %i : Objem prvku %12.2f m3 / objem mixu %12.2f
m3 = počet mixů: %12.2f \n', ID_betonarny, objem_prvku, objem_mixu, po-
cet_mixu)
    fprintf('Cena dopravy za dopravní radius za mix %i Kč * number of mi-
xers %i = Cost of transport %12.2f Kč \n', cena_radiusu, pocet_mixu,
cena_dopravy)
end;
```

Jestliže je hodnota  $km\_nebo\_radius$  rovna 1, použije se výpočet ceny dle daného dopravního pásma za objem betonu v konstrukčním prvku. Vyhledávání ceny za dopravní pásmo je analogické jako u předchozí varianty kalkulace. Obecný vztah pro výpočet ceny dle daného dopravního pásma za objem betonu je následující:

$$CD_{rv} = (2UC_r)V_e \quad (26)$$

, 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_betonarny_od_stavby));
    cena_radiusu = raw_cena_externi_dopravy{x, (I+4)};
```

```

if (cena_radiusu > 0)
    cena_dopravy = cena_radiusu * objem_prvku;

```

Následuje opět definování výpisu výpočtu ceny.

```

if vypis_vypoctu_cen
    fprintf('ID betonárny %i : Cena dopravy za radius %i Kč * Objem prvku
%12.2f m3 = Cena dopravy %12.2f Kč \n', ID_betonarny, cena_radiusu, ob-
jem_prvku, cena_dopravy)
    end;

```

Jestliže je hodnota  $km\_nebo\_radius$  větší než 1, použije se výpočet ceny za kilometr dopravy. Obecný vztah pro výpočet ceny za kilometr za autodomíchávač je následující:

$$CD_{km} = UC_d d \quad (27)$$

, 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;

```

Následuje opět definování výpisu výpočtu ceny.

```

if vypis_vypoctu_cen
    fprintf('ID betonárny %i : Cena za kilometr %i Kč * (vzdálenost %i km *
2) = Cena dopravy %i Kč \n', ID_betonarny, km_nebo_radius, vzdalenost_beto-
narny_od_stavby, cena_dopravy)
    end;
end;

```

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

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

$$TC = (CC V_e)CD \begin{cases} CD_{rm} \\ CD_{rv} \\ CD_{km} \end{cases} \quad (28)$$

, 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 );

```

Následuje opět definování výpisu výpočtu ceny.

```

if vypis_vypoctu_cen
    fprintf('(Objem prvku %12.2f m3 * Jednotková cena betonu %i Kč) +
Cena dopravy %12.2f Kč = Celková cena %i Kč \n\n', objem_prvku, ceny_pouzitelnych_betonu, cena_dopravy, celkova_cena);
end;

```

Následuje vytvoření matice `pole_pouzitelnych_betonu`, do které jsou údaje zapisovány pro všechna  $r$ . Tato matice slouží jako souhrnný výstup kalkulace cen a obsahuje sloupce:

- ID betonárny,
- jednotková cena externího betonu,
- dopravní vzdálenost z externí betonárny na staveniště a zpět;
- kalkulované náklady na dopravu externího betonu;
- celková cena externího betonu.

```
r = r + 1;
    pole_pouzitelnych_betonu(r,:) = {ID_betonarny, ceny_pouzitelnych_betonu,
vzdalenost_betonarny_od_stavby*2, cena_dopravy, celkova_cena};
end;
```

### (b) Interní betonárny

Kalkulace ceny pro interní dodavatele betonu je v některých částech modelu definováno analogicky s kalkulací externích dodavatelů betonu. Pomocí příkazu `size` je zjištěn rozměr proměnné, a sice počet řádků, který odpovídá počtu interních betonáren. Pro označení počtu iterací je opět zvolen parametr `r`.

```
pocet_radku_SEZNAM_INTERNICH_BETONAREN_xls = size(raw_seznam_inter-
nich_betonaren,1);
r=0;
```

Parametr `vzdalenost_betonarny_od_stavby`, pracuje analogicky jako výpočet pro externí dodavatele betonu. Je tedy načten ze 3. sloupce matice `raw_seznam_internich_betonaren`. Poté je pomocí podmínky `if` ověřeno, které betonárny mají vzdálenost od staveniště větší než nula. Pro nenulový počet betonáren je zapsán do prvního sloupce vnitřní matice `raw_seznam_internich_betonaren` jedinečné číslo ID betonárny.

```
for x = 1:pocet_radku_SEZNAM_INTERNICH_BETONAREN_xls
    vzdalenost_betonarny_od_stavby = raw_seznam_internich_beto-
naren{x,3};
    if (vzdalenost_betonarny_od_stavby > 0 )
        ID_betonarny = raw_seznam_internich_betonaren{x,1};
```

Analogicky je poté dekódováno řetězcové pole (množiny proměnných pevnostní třídy betonu a stupně vlivu prostředí) na číslo (toto číslo odpovídá pořadí v řetězcovém poli).

Například, pro beton z interní betonárny s pevnostní třídou C20/25, a stupněm vlivu prostředí XC2 bude přiřazena souřadnice {1,2} (oproti souřadnici {4,3}, která byla přiřazena pro betonárny externí). Model bude nadále pracovat s touto souřadnicí.

Příkaz `strcmp` poté vrátí porovnání proměnných pevnostních tříd betonů (`pevnost_internich_betonu` a `pevnostni_trida_prvku`) a stupňů vlivů prostředí (`stufen_vlivu_prostredi_internich_betonu` a `stufen_vlivu_prostredi`). Porovnává se tedy vždy údaj dostupných betonů dané interní betonárny s údajem v seznamu konstrukčních prvků.

```
sloupec = find (strcmp(pevnost_internich_betonu, pevnostni_trida_prvku));  
radek = find (strcmp(stufen_vlivu_prostredi_internich_betonu, stufen_vlivu_prostredi));
```

Zásadní odlišnost v modelu nastává v následující části. V závislosti na struktuře vstupní matice ceníků interních betonáren (recyklovaného betonu s proměnlivou substitucí kameniva), která je horizontálně definována, je zohledněn horizontální krok pomocí následujícího parametru nulové matice:  $\text{slooupec} + (3 * (y - 1))$ .

Pro aplikaci binární proměnné byla vytvořena opět matice nul, avšak v tomto případě o velikosti  $6 \times 27$ . Tento rozměr matice odpovídá 6 možným stupňům vlivu prostředí a 27 možným kombinacím, do kterých vstupuje vždy pevnostní třída (celkem 3) a hmotnostní procento substituce kameniva (celkem 9). Pevnostní třídy byly v modelu předdefinovány s ohledem na předchozí materiálový výzkum a jsou zohledněny následující tři třídy: C20/25, C25/30 a C30/37. Hmotnostní procento substituce kameniva je zohledněno od 5 % do 40 % se skokovým intervalem po 5 %. Do matice nul je následně zapsána hodnota 1 na přiřazené souřadnici řádku a sloupce. tedy např. pro výše uvedený příklad  $\{1,2\}$ .

```
for y=1:9  
    if radek>0  
        if sloupec>0  
            matice_nul = zeros(6,27);  
            matice_nul(radek, (slooupec+(3*(y-1)))) = 1 ;
```

Binární proměnná funguje analogicky jako ta pro externí betonárny a zajišťuje, aby se v kalkulaci zohlednily pouze ty betonárny, které disponují požadovaným typem betonu. Pokud

betonárna disponuje takovýmto vhodným betonem, je vrácena hodnota 1. Naopak, pokud betonárna daný beton nevyrobí, je vrácena hodnota 0. Tato hodnota je pak vložena do nově vytvořené jednotkové matice s názvem `je_cena`. Ta je sumou logického součinu (&) matice cen interních betonů a maticí nul pro každé  $x$ .

```
je_cena = sum(sum(matice_cen_internich_betonaren(:, :, x) & nuly), '');
```

Pokud byla nalezena jednotková cena (`cena_za_km`) pro požadovaný typ betonu v dané interní betonárně (tzn. v matici `je_cena` je zapsána hodnota 1), uloží se tato jednotková cena do vnitřní matice seznamu interních betonáren, a to pro každé  $x$ .

```
if je_cena
    clear cena_za_km
    cena_za_km = raw_seznam_internich_betonaren{x, 4};
```

Jestliže je hodnota jednotkové ceny (`cena_za_km`) větší než 1 pro každé  $x$ . V modelu je pro interní betonárny aplikována pouze tato možnost), použije se výpočet ceny za kilometr dopravy. Vzdálenost je ve výpočtu opět započítána dvakrát pro zohlednění cesty tam a zpět. Obecný vztah pro výpočet ceny za kilometr za autodomíchač je totožný jako u externích betonáren, tedy ze vztahu (27). Jednotková cena betonu, je do výpočtu implementována z matice cen interních betonů za použití horizontálního kroku `sloupec+(3*(y-1))`.

```
if (cena_za_km > 0)
    cena_dopravy = vzdalenost_betonarny_od_stavby * 2 * cena_za_km ;
    ceny_pouzitelnych_betonu = matice_cen_internich_betonaren(radek, sloupec+(3*(y-1)), x);
```

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

$$TC = (CC V_e) + CD_{km} \quad (29)$$

, 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 );
```

Následuje vytvoření matice pole použitelných interních betonů, do které jsou údaje zapisovány pro všechna  $r$ . Tato matice slouží jako souhrnný výstup kalkulace cen a obsahuje sloupce:

- ID betonárny,
- jednotková cena interního betonu,
- dopravní vzdálenost z interní betonárny na staveniště a zpět,
- kalkulované náklady na dopravu interního betonu,
- celková cena interního betonu.

```
r = r + 1;
pole_pouzitelnych_internich_betonu(r,:) = {ID_betonarny, matice_cen_in-
ternich_betonu(radek,sloupec+(3*(y-1)),x), y, vzdalenost_betonarny*2,
cena_dopravy, celkova_cena };
end;
```

Jestliže výše uvedené pole použitelných betonů existuje, tzn. obsahuje alespoň jeden použitelný beton, pak se pomocí příkazu `min` a `cell2mat` vyhledají položky s nejnižší cenou externího betonu. Do matice `f` se pak zapíší nejnižší hodnoty a do matice `g` se zapíší čísla řádků, na kterých tyto nejnižší hodnoty leží v matici `pole_pouzitelnych_betonu`.

```
if ukaz_lepsi_cenu
    [f,g] = min(cell2mat(pole_pouzitelnych_betonu));
    if exist('pole_pouzitelnych_internich_betonu','var')
        [f,g] = min(cell2mat(pole_pouzitelnych_internich_betonu));
        interni_cena_betonu = pole_pouzitelnych_internich_betonu{g(6),6};
    end;
```



Následuje série kódových polí, které vybírají pomocí funkcí `if` a `elseif` neoptimalnější hodnoty pro výpis výsledků v závislosti na tom, zda je příznivější interní z matice `interni_cena_betonu` nebo externí dodavatel z matice `externi_cena_betonu`. Zároveň se vyskytí tři druhy výpisů výpočtu externích dodavatelů pomocí příkazu `fprintf` podle toho, jaký typ dopravy byl zvolen.

```
if exist('pole_pouzitelnych_internich_betonu','var')
    if externi_cena_betonu < interni_cena_betonu
        [f,g] = min(cell2mat(pole_pouzitelnych_betonu));
        externi_cena_betonu = pole_pouzitelnych_betonu{g(5),5};
        concrete_plant_No = pole_pouzitelnych_betonu{g(5),1};
        foreign_concrete_plant = raw_seznam_externich_betonaren{concrete_plant_No,2};

        fprintf('Externí cena: %12.2f Kč ID betonárny: %i %s \n', externi_cena_betonu, concrete_plant_No, foreign_concrete_plant)
        procento_betonu(1,1) = procento_betonu(1,1) + objem_prvku;

    elseif (externi_cena_betonu > interni_cena_betonu)
        [f,g] = min(cell2mat(pole_pouzitelnych_internich_betonu));
        interni_cena_betonu = pole_pouzitelnych_internich_betonu{g(6),6};
        ID_Interni_betonarna = pole_pouzitelnych_internich_betonu{g(6),1};
        Interni_betonarna = raw_seznam_internich_betonaren{ID_Interni_betonarna,2};
        Interni_beton = nazev_smesi_internich_betonu{pole_pouzitelnych_internich_betonu{g(6),3}};

        fprintf('Interní cena: %12.2f Kč ID betonárny: %i %s Beton %s \n', interni_cena_betonu, ID_Interni_betonarna, Interni_betonarna, Interni_beton)
        procento_betonu(1,2) = procento_betonu(1,2) + objem_prvku;
        end;

    else
        [f,g] = min(cell2mat(pole_pouzitelnych_betonu));
        externi_cena_betonu = pole_pouzitelnych_betonu{g(5),5};
```

```
        concrete_plant_No = pole_pouzitelnych_betonu{g(5),1};
        foreign_concrete_plant = raw_seznam_externich_betonaren{concrete_plant_No,2};

        fprintf('Externí cena: %12.2f Kč ID betonárny: %i %s \n',
externi_cena_betonu, concrete_plant_No, foreign_concrete_plant)
        procento_betonu(1,1) = procento_betonu(1,1) + objem_prvku;
    end;

else
    [f,g] = min(cell2mat(pole_pouzitelnych_betonu));
    externi_cena_betonu = pole_pouzitelnych_betonu{g(5),5};
    concrete_plant_No = pole_pouzitelnych_betonu{g(5),1};
    foreign_concrete_plant = raw_seznam_externich_betonaren{concrete_plant_No,2};

    fprintf('Externí cena: %12.2f Kč ID betonárny: %i %s \n', externi_cena_betonu, concrete_plant_No, foreign_concrete_plant)
```

V modelu byla definována možnost zobrazení všech použitelných betonů. Uživatel v úvodu modelu nastavuje hodnotu 1, pokud si přeje, nebo hodnotu 0, pokud si nepřeje zobrazit tento výpis.

```
if ukaz_vsechny_pouzitelne_betony
    pole_pouzitelnych_cizich_betonu
    if exist('pole_pouzitelnych_internich_betonu','var')
        pole_pouzitelnych_internich_betonu
    end
end;
```

Zobrazení různých výstupů a možnost či nemožnost exportovat výsledky je reprezentováno opět pomocí binárních proměnných v úvodu modelu. Nula znamená nezobrazovat, jedna znamená zobrazit.

```
ukaz_lepsi_cenu = 0;
zobraz_vsechny_pouzitelne_betony = 0;
```

```
zobraz_grafy_pro_externi_betonarny = 0;
zobraz_grafy_s_externimi_betonarnami_podle_vzdalenosti = 0;
zobraz_grafy_internich_betonaren = 0;
vypis_vypoctu_cen = 0;
zobraz_spolecne_grafy_externich_a_internich_betonaren = 1;
exportuj_graf_externich_a_vlastnich_betonaren = 1;
zobraz_souhrnny_kolacovy_graf = 1;
vygeneruj_xls = 1;
```

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.

## 4.5. METODY TVORBY NEGRAFICKÝCH DAT PRO DEFINOVÁNÍ CHARAKTERISTIK RAC V BIM

Pro efektivní implementaci výše zmíněného optimalizačního modelu do moderního stavebnictví je nezbytné určit způsob, jakým se získané nové optimalizované informace využijí. Proto je nutno stanovit jasný postup pro datovou výměnu na základě již standardizovaných konvencí – tzv. datový standard. Pro tyto účely existuje v rámci českého stavebního sektoru několik nástrojů a metod. Kapitulu metody práce s negrafickými daty lze rozdělit na tři části:

- a) obsah datových standardů,
- b) volba datového standardu pro transfer,
- c) definování jedinečnosti elementu v rámci BIM modelovacího prostředí.

Jedině správná volba a nastavení těchto třech entit vede k eliminaci možných chyb v rámci výměny negrafických dat modelovacího prostředí BIM.

### 4.5.1. Obsah datových standardů

Standardy výměny dat můžeme chápat jako soubor běžně používaných předpokladů mezi vysílačem a příjemcem informací. Při definování výměny informací, specifických pro určitou doménu, se obvykle uvažuje o aplikační a datové vrstvě. Zejména aplikační vrstva je důležitá pro standardizaci dat ve stavebnictví (Sawhney et al. 2020). Skládá se ze tří částí (Shelden et al. 2020):

- **Datový model** – tvoří jádro standardů a definuje, jak jsou strukturovány informace a

vztahy mezi jednotlivými částmi informací. Hlavním nástrojem pro definování organizace informací v rámci této struktury jsou diagramy ERR<sup>159</sup>. Totéž umožňují i Unified Modeling Language<sup>160</sup> (UML). Výsledné diagramy EER či UML pak lze využít ke strukturování dat v různých datových modelech. Takové datové modely pak mohou být hierarchické (např. XML<sup>161</sup>), dvojice názvů a hodnot (např. JSON<sup>162</sup>) nebo grafické (např. RDF<sup>163</sup>).

- **Datové schéma a objektový model** – jsou často navržena v rámci informačního modelu nebo pomocí jazykových schémat. Příkladem jazykového schématu je např. XML schéma (označované jako XSD schéma), EXPRESS, definované normou ISO 10303-11 (ISO 2004) nebo schéma OWL<sup>164</sup>, které zakódují definici entit a jejich vztahů standardizovaným způsobem, který podporuje replikovatelnost, strojové ověření a případně překlad do jiných aplikací.
- **Serializace dat instance** – je převádění dat, která popisují zájmové objekty nebo jevy do seriové, respektive sekvenční podoby dle uvedených instancí. Data takových instancí lze serializovat v různých formátech. Například ze stejného datového modelu XML lze vygenerovat různé serializace XML. V případě grafů RDF lze serializace provádět v Turtle<sup>165</sup> (Beckett a Berners-Lee 2008), N-Triples (Beckett et al. 2011), RDF / XML (Gandon a Schreiber 2016), JSON-LD<sup>166</sup> (Gregg Kellogg, Pierre-Antoine Champin 2019) atd. I když mají tyto serializace jinou syntaxi a vzhled, datový model zůstává identický. Dobře strukturovaná data instance respektují dohodnuté datové schéma (např. XSD) v rámci určitého datového modelu (např. Hierarchický XML).

---

<sup>159</sup> z angl. Enhanced Entity-Relation, zkráceně EER, volně přeloženo jako Vylepšený model vztahu mezi entitami (Bagui a Earp 2020).

<sup>160</sup> z angl. Unified Modeling Language, zkráceně UML, je grafický jazyk pro navrhování, specifikování, vizualizaci, a pro dokumentaci počítačových programů (Booch et al. 2005).

<sup>161</sup> z angl. Extensible Markup Language, zkráceně XML, je obecný značkovací jazyk pro účelné značkování různých typů dat (Clarke 2011).

<sup>162</sup> z angl. JavaScript Object Notation, zkráceně JSON, je způsob zápisu dat nezávislý na počítačové platformě, určený pro přenos dat, která mohou být organizována v polích nebo agregována v objektech (Bourhis et al. 2020).

<sup>163</sup> z angl. Resource Description Framework, zkráceně RDF, je obecný rámec dat, která popisují zdrojový dokument tak, že je jeho popis čitelný jak lidsky, tak strojově (Needleman 2001).

<sup>164</sup> z angl. Web Ontology Language, zkráceně OWL, volně přeloženo jako Jazyk webových ontologií.

<sup>165</sup> z angl. Terse RDF Triple Language, zkráceně TURTLE.

<sup>166</sup> z angl. JavaScript Object Notation for Linked Data, zkráceně JSON-LD

### 4.5.2. Volba datového standardu pro transfer

Datový standard pro transfer informací pro optimalizační výpočty byl zvolen s důrazem na co nejširší otevřenou platformu. Standard IFC je jedním z nejpříznivějších datových standardů pro popis a výměnu informací o budovách. IFC je vyvíjeno již více než 20 let a je prověřený prostředek pro výměnu informačních dat týkajících se budov, produktů, komponent a infrastruktury. Samotný IFC představuje rozšíření širšího datového standardu modelu STEP<sup>167</sup>. Schéma IFC je založeno na konzistentní reprezentaci dat pomocí jazyka ISOSTEP EXPRESS, definovaném v normě ISO 10303-11 (ISO 2004). Jazyk EXPRESS používá typy, entity, vlastnosti a pravidla pro vytvoření konkrétního schématu. Standard IFC má několik postupně vyvinutých verzí; aktuální verze IFC4\_ADD2 obsahuje 766 entit, 413 sad vlastností a 130 definovaných datových typů. Tato schémata představují informace, související s konstrukcí v objektech se vzájemně souvisejícími významy a účely, což zaručuje, že popisy v různých prostředích a platformách BIM bude možné obecně mapovat z konkrétní platformy do obecného formátu IFC. Kromě schématu IFC EXPRESS vyvinul BuildingSMART jako součást specifikace IFC (součást verze IFC2X3) schéma Definice sady vlastností (PSD<sup>168</sup>). Schéma PSD stanovuje, jak lze definovat vlastní sady parametrů a vlastností. Kromě schématu PSD, které je definováno pomocí XSD, je k dispozici řada souborů PSET XML, které se řídí schématem PSD. Tyto soubory PSET XML poskytují řadu standardních sad parametrů a vlastností, které jsou přímo propojeny s odpovídajícím schématem IFC EXPRESS (Shelden et al. 2020). Uvedené parametry datového formátu jsou relevantními ukazateli vhodnosti tohoto typu datového standardu pro využití k transferu dat mezi prostředím BIM a optimalizačním prostředím, respektive pro přenos dat zpět do prostředí BIM a naplnění principů „aktivního BIM“.

### 4.5.3. Definování jedinečnosti prvku v rámci 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.

---

<sup>167</sup> z angl. Standard for the Exchange of Product, zkráceně STEP.

<sup>168</sup> z ang.. Property Set Definition, zkráceně PSD.

---

## Globálně jedinečná identifikace

Globálně jedinečný identifikátor (GUID)<sup>169</sup> nebo též univerzální jedinečný identifikátor (UUID)<sup>170</sup> je definován normou ISO/IEC 11578: 1996 (ISO/IEC JTC 1 1996)<sup>171</sup> a nověji rovněž v doporučení ITU-T X.667 (ITU 2012)<sup>172</sup> a normě ISO/IEC 9834-8:2005 (ISO/IEC JTC 1/SC 6 2005)<sup>173</sup>. 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 s jeho implementací jako globálně jedinečný identifikátor GUID. Vygenerovaný identifikátor GUID je následně účelně komprimován pro možnou výměnu. Komprimovaný identifikátor GUID se pak nazývá IFC-GUID (buildingSMART International Ltd. 2020).

## Kompresie v rámci IFC-GUID

Pro výměnu dat na základě souborů byla vyvinuta metodika komprese těchto identifikátorů GUID, aby se šetřilo místo při fyzické výměně modelů IFC prostřednictvím různých médií. Vzhledem k tomu, že každá instance objektu IFC vyžadovala jedinečný identifikátor obsahující 128bitové číslo, bylo nově navrženo základní 64 znakové kódování viz Tab. 16.

Výsledný IFC-GUID je tedy pevný řetězec o délce 22 znaků<sup>174</sup>. Softwarové implementace

---

<sup>169</sup> z angl. Globally Unique Identifier, zkráceně GUID

<sup>170</sup> z angl. Universal Unique Identifier, zkráceně UUID

<sup>171</sup> ISO/IEC 11578: 1996 – Information technology – Open Systems Interconnection – Remote Procedure Call (RPC), volně přeloženo jako Informační technologie – propojení otevřených systémů – specifikace vzdáleného volání procedur (ISO/IEC JTC 1 1996).

<sup>172</sup> Doporučení mezinárodní telekomunikační unie: ITU-T Recommendation X.667 (10/12): Information technology – Procedures for the operation of object identifier registration authorities: Generation of universally unique identifiers and their use in object identifiers, volně přeloženo jako Informační technologie - Postupy pro fungování registračních autorit identifikátorů objektů: Generování univerzálně jedinečných identifikátorů a jejich použití v objektových identifikátorech (ITU 2012).

<sup>173</sup> ISO/IEC 9834-8:2005 – Information technology – Open Systems Interconnection – Procedures for the operation of OSI Registration Authorities: Generation and registration of Universally Unique Identifiers (UUIDs) and their use as ASN.1 Object Identifier components – Part 8, volně přeloženo jako ISO / IEC 9834-8: 2005 - Informační technologie - Propojení otevřených systémů - Postupy pro fungování registračních autorit OSI: Generování a registrace univerzálně jedinečných identifikátorů (UUID) a jejich použití jako komponent identifikátoru objektu ASN.1 - Část 8 (ISO/IEC JTC 1/SC 6 2005).

<sup>174</sup> Pozn.: Kompresie identifikátoru GUID v rámci souborů IFC byla zavedena již v roce 1996 pro verzi IFC1.0. V té době byly datové soubory stále uloženy převážně na disketách s omezenou kapacitou a tudíž bylo přistoupeno ke kompresi dat. Dnes tato komprese GUID nemá opodstatnění, avšak z důvodu zpětné kompatibility je stále vynucována (buildingSMART International Ltd. 2020).

musí kvůli dodržení specifikací IFC používat algoritmus, který převádí standardní řetězce identifikátorů GUID na IFC-GUID a zpět. V rámci této práce byl využit 22 znakový IFC-GUID generovaný v rámci formátu IFC 2x3 a to pro každý samostatně modelovaný betonový prvek v modelu budovy (buildingSMART International Ltd. 2020).

**Tab. 16 Příklad základního 64 znakového kódování IFC-GUID (buildingSMART International Ltd. 2020)**

0	1	2	3	4	5	6
01234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123						
0123456789ABCDEFGHIJKLMN	OPQRSTUVWXYZ	abcdefghijklmnopqrstuvwxyz	ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ	abcdefghijklmnopqrstuvwxyz	_\$	

### Identifikace v rámci platformy Autodesk

V rámci exportu IFC z Autodesk Revit je možné definovat rovněž identifikátory, generované v tomto SW nástroji:

- element ID,
- unique ID.

Rozdíl mezi Unique ID a běžným Element ID je především ve stabilitě, respektive nestabilitě při sdílení dat. Identifikace pomocí Element ID je jedinečná pouze v souborech, které nejsou sdílené, zatímco identifikace pomocí Unique ID je stabilní a stále jedinečná i v dokumentech, které jsou sdíleny a upravovány několika místními kopiemi a poté synchronizovány s verzí, umístěnou na serveru (Autodesk Inc. 2020b). 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 obdrženy podkladový BIM model vytvořený v aplikaci Autodesk Revit již obsahoval ve svém nativním formátu přehlednou identifikaci Element ID pro každý prvek modelu a ta byla převzata pro další zpracování, zatímco Unique ID poskytnutý model pro případovou studii neobsahoval.

## **4.6. DÍLČÍ ZÁVĚRY Z KAPITOLY METODY**

V kapitole metody byly představeny a shrnuty veškeré metodiky, normy a konvence, kterými mohou být definovány parametry pro komplexní uchopení problematiky od zpracování RCA, definování nových receptur RAC, přes následnou přípravu dat pro algoritmizaci logistického scénáře, samotného optimalizačního výpočtu až po definování charakteristik a parametrů pro obohacení dokumentace ve formě informačního modelu budovy prostřednictvím aktivního BIM přístupu. V kapitole byl kladen důraz na plný a transparentní výčet využitých metodických zdrojů.



## 5. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO PROGRAMU

Kroky experimentálního programu jsou v souladu s výše uvedeným rámcem výzkumného přístupu. Nejprve byl proveden materiálový výzkum, založen na vzorcích betonu z panelové budovy, který je podrobně popsán v kapitole 5.1. Následně byl vytvořen algoritmus pro logistickou optimalizaci dodávky betonu a ověřena funkce a přínos na vybrané případové studii v kapitole 5.3. Pro výše uvedené kroky bylo nutné rovněž definovat přenos negrafických dat mezi podkladovou projektovou dokumentací v BIM a optimalizačním prostředím. Rovněž bylo nutno vyřešit následný zpětný přenos již optimalizovaných dat zpět do BIM pro docílení obohacení informačního modelu budovy, což je prezentováno v kapitole 5.2.

### 5.1. MATERIÁLOVÝ EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM

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 těmi z NA. Nakonec byly studovány a hodnoceny vlastnosti vyrobeného čerstvého a ztvrdlého RAC za účelem posouzení vlivu zdrojového RCA na vlastnosti vyrobeného RAC.

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

Materiálovým zdrojem RCA, uvažovaným v tomto experimentálním výzkumu, je dekonstruovaná budova hotelu Dukla, dokončená v roce 1981 ve městě Blansko v České republice. V roce 2014 se město jako aktuální vlastník budovy a za podpory svých obyvatel, vyjádřené v referendu, rozhodlo hotel odstranit. Budova byla v roce 2015 dekonstruována přístupem sekvencí demolic s postupem od shora dolů, tzv. metodou top-down a všechny materiály, včetně prefabrikovaných panelů, byly pečlivě tříděny, aby se dosáhlo vysoké recyklovatelnosti materiálů viz Obr. 22 a Obr. 23.



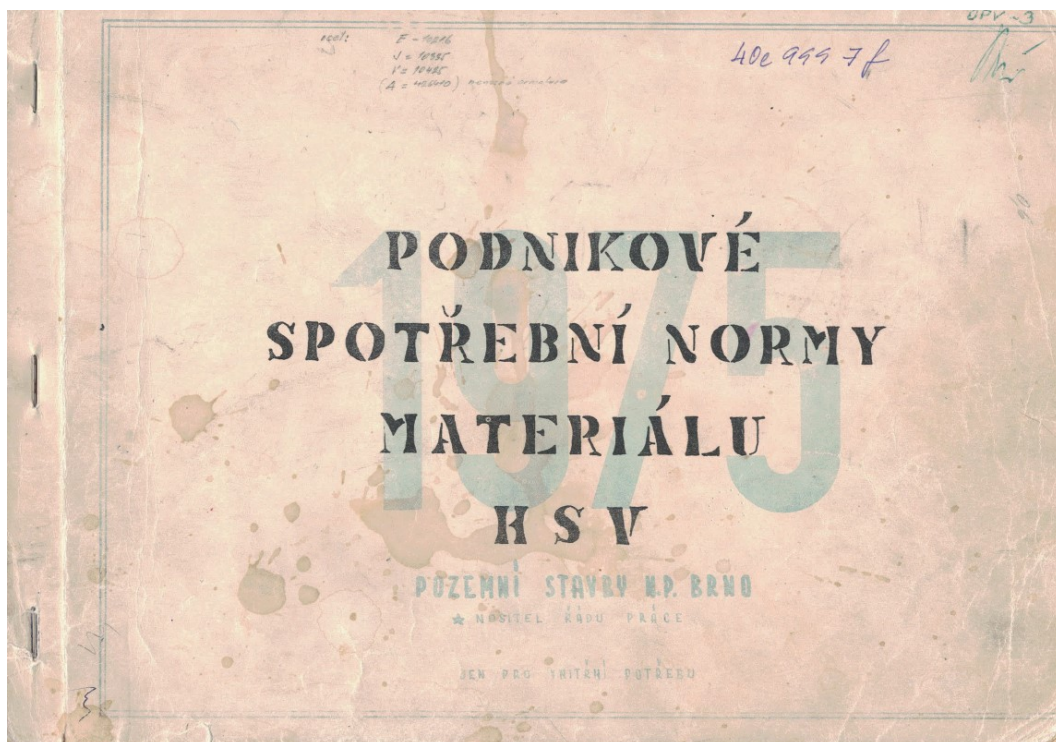
**Obr. 22 Dekonstrukce objektu hotelu Dukla v Blansku: Transport panelu při využití metody shora-dolů (top-down) (Záboj 2015)**



**Obr. 23 Dekonstrukce objektu hotelu Dukla v Blansku: Demontované a odstrojené obvodové a vnitřní stěnové panely určené k separaci (Záboj 2015)**

### 5.1.2. II. fáze – klasifikace zdroje

Pro výrobu matečního betonu (PC) pro prefabrikované panely hotelu roce 1981 byla v Blansku použita betonárna pro prefabrikáty (dále jako Prefa Blansko). Zde je třeba zdůraznit, že bylo obtížné najít původní dokumenty, obsahující hmotné složení PC, protože 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 podniků. Návrh betonové směsi byl nicméně identifikován z podnikového normového dokumentu z roku 1975 s názvem *Podnikové spotřební normy materiálu HSV* (Pozemní stavby Brno s.p. 1975) viz Obr. 24 a Obr. 25, které v té době používal státní stavební podnik *Pozemní stavby Brno*.



**Obr. 24** Ukázka dokumentu *Podnikové spotřební normy materiálu HSV* (Pozemní stavby Brno s.p. 1975)

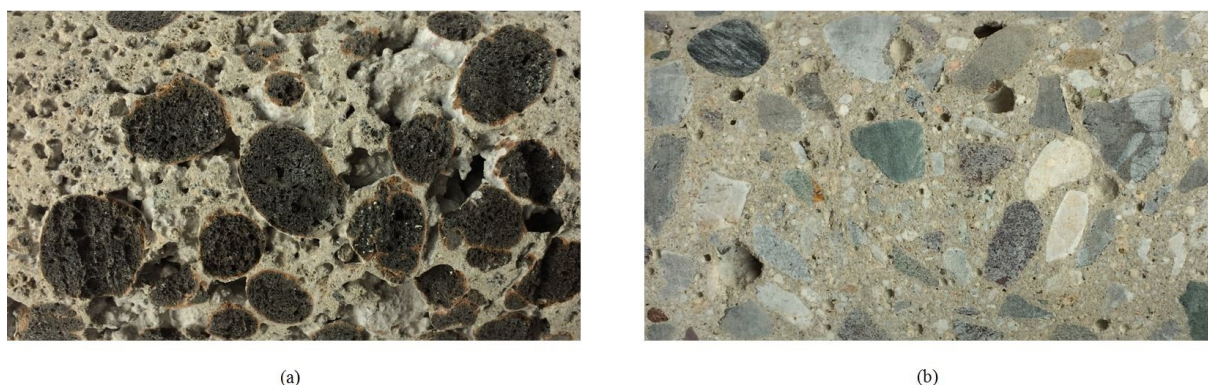
Uvedený dokument popisuje obecné požadavky, které existovaly pro stavební materiály v regionu, i když obsahuje zastaralá označení betonů a cementů, která se již nepoužívají. Například návrhy prefabrikovaných betonových směsí označené B170, B250 a B330 zhruba odpovídají dnešním C12/15, C16/20 a C25/30 (Witzany 2016). Tyto typy betonu obsahovaly cement PC400, což zhruba odpovídá dnešnímu portlandskému cementu CEM I. V betonárně Prefa Blansko byl použit písek frakce 0–4 mm spolu se štěrskem 4–8 mm a 8–16 mm, který byl transportován z lomů v Ostrožské Nové Vsi, Bratčicích a Božicích.

000 12: Montáž panelových domů T 06 B - KD (z výroben Prefy) 4g

NSM č.	Popis práce	132 99890 Ocel.bet. g	132 99890 Ocel.bet. g	133 23616 Ocel.písk. g	312 110300 Elektrody 1000 ks	583 203690 Střekopis. m <sup>3</sup>	583 305290 Písek m <sup>3</sup>	585 214500 Cement PC 400 - g	605 123690 Reziivo v použ.m <sup>3</sup>	607 028300 Izoplek 1,5 mm-m <sup>2</sup>	614 359120 Klíny buk. ks	755 300100 Voda m <sup>3</sup>	Měr.jedn.: 1 ks
1371 P	nosný vnitřní	0,0021	0,0021	0,0038	0,0003	0,030	0,010	0,118	0,001			0,008	
1372 P	Montáž stěnových příčky	0,0021	0,0021		0,0003	0,014	0,007	0,062	0,001		2	0,004	
1373 P	panelů	0,0021	0,0021	0,0038	0,0003	0,097	0,017	0,312	0,001			0,019	
1374 P	obvod. v průčelí	0,0021	0,0021	0,0038	0,0003	0,034	0,017	0,160	0,001			0,010	
1374 P	obvodový štítový.												
1375 P	podesty	0,008	0,008	0,0038	0,0007	0,022	0,004	0,072	0,001			0,003	
1409 P	Montáž schodiště ramena						0,004	0,016	0,001		2	0,001	
1376 P	podélná	0,0021	0,0021	0,0038	0,0003	0,021	0,020	0,143	0,001			0,010	
1377 P	Montáž atik štítová	0,0021	0,0021	0,0038	0,0003	0,021	0,017	0,130	0,001			0,009	
1378 P	Montáž loggiových sloupků	0,0021	0,0021	0,0038	0,0003	0,097	0,002	0,240	0,001			0,015	
1379 P	Montáž pláště tlumičí komory						0,004	0,017		0,21		0,001	
1380 P	Montáž desky tlumičí komory						0,015	0,068				0,005	
1381 P	Montáž výlezu na střechnu						0,010	0,043				0,003	
1382 P	tl. 14cm	š. do 120 cm	0,008	0,008	0,0038	0,0007	0,031	0,004	0,092	0,001		0,005	
1383 P	š. 121-240 cm	0,0095	0,0095	0,0038	0,0009	0,037	0,006	0,119	0,001			0,007	
1384 P	Montáž stropních panelů	š. do 120 cm	0,008	0,008	0,0038	0,0007	0,045	0,004	0,124	0,001		0,007	
1385 P	tl.17,5cm	š. 121-240 cm	0,0095	0,0095	0,0038	0,0009	0,047	0,006	0,143	0,001		0,009	

Obr. 25 Ukázka dokumentu *Podnikové spotřební normy materiálu HSV (Pozemní stavby Brno s.p. 1975)*

Panelová budova hotelu byla postavena ze standardizovaných panelů, používaných v konstrukčním systému T06 - B KD IV (ČKAIT et al. 2000), a proto bylo možné dohledat některé z jednotných konstrukčních charakteristik. Fasádní panely byly vyrobeny z lehkého betonu s významným množstvím materiálu *Keramzit*, umělého porézního kameniva, vyrobeného smícháním cementu, vody, přísad a expandované hlíny. Vnější povrch fasádních panelů byl pokryt povrchovou úpravou *Coulier*, která vytváří obnaženou kamennou betonovou vrstvu s nekrytou strukturou (Macut a Radivojević 2016). 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. 26. Ve směsi bylo pravděpodobně použit plastifikátor, protože tato přísada byla doporučena pro výrobu prefabrikovaných komponent ve spotřebě materiálu dle tehdy používaných standardů (Pozemní stavby Brno s.p. 1975), kde je uvedena doporučená dávka 0,735 litru/100 kg cementu.



**Obr. 26** Průřezy vzorků matečního betonu: (a) RCA-01 – průčelní lehký stěnový panel fasády; (b) RCA-02 – Nosný panel vnitřní stěny

Ve výše uvedených podnikových normách bylo složení směsí matečního betonu vypočteno v kg na jednotlivou jednotku panelu, jak je uvedeno v Tab. 17. Návrhová krychelná pevnost v tlaku matečního betonu byla 15 MPa pro vylehčené fasádní panely, 20 MPa pro stropní panely a 25 MPa pro nosné panely vnitřních stěn. Je vhodné podotknout, že jinými autory provedená analýza z 60 000 testovacích krychlí odebraných ze 132 panelových budov dospěla k závěru, že průměrná pevnost v tlaku u těchto vzorků byla často dokonce o jednu úroveň nižší než návrhová hodnota (Witzany 2016).

**Tab. 17** Složení různých typů prefabrikovaných betonových panelů vlastní zpracování na základě podnikových spotřebních norem (Pozemní stavby Brno s.p. 1975)

Typ panelu	Kvantita materiálu [kg/ks]				
	Štěrk	Písek	Cement	Voda	Celkem
Nosný panel vnitřní stěny (tloušťka 140mm)	0,030	0,010	0,118	0,008	0,166
Nenosný panel vnitřní stěny	0,014	0,007	0,062	0,004	0,087
Fasádní průčelní vylehčený stěnový panel	0,097	0,017	0,312	0,019	0,445
Fasádní boční vylehčený stěnový panel	0,034	0,017	0,160	0,010	0,221
Stropní panel (tloušťka od 121mm do 140mm)	0,037	0,006	0,119	0,007	0,169

### 5.1.3. III. fáze – zpracování zdroje

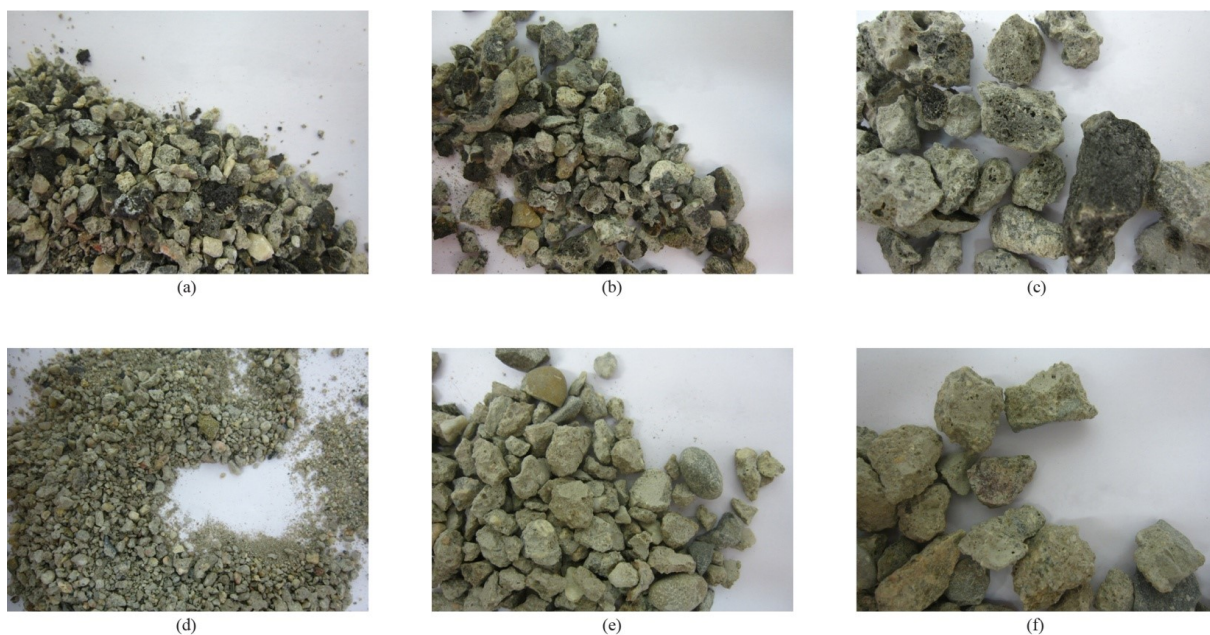
Dekonstrukce byla provedena podle projektové dokumentace bouracích prací (Zbořil 2015), včetně auditu odpadu, při kterém byla provedena inventarizace materiálů a prvků podle evropských pokynů (European Commission 2018c). Demontáž budovy probíhala krok za krokem, což znamená, že každý jednotlivý panel byl oddělen od všech připojených materiálů a konstrukcí (výplně otvorů, potrubí, zábradlí atd.). Poté byly odstraněné panely zavěšeny k věžovému jeřábu pomocí originálních (nebo v některých případech nově vytvořených) zvedacích

závěsů a následně transportovány na přilehlé staveništní skládky. 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 (společnosti Moravostav a.s. v Brně). Drcení bylo prováděno ve třech fázích. Při první fázi byl použit mobilní čelist'ový drtič za účelem získání nejhrubší frakce 0–63 mm viz Obr. 27. Poté bylo pomocí druhého a třetího drcení dosaženo frakce 0–16 mm za využití malého čelist'ového drtiče v laboratoři na Fakultě stavební VUT v Brně.



**Obr. 27 Průběh drcení na frakci 0–63 mm v areálu recyklačního střediska Moravostav a.s. v Brně**

Pomocí elektromechanické laboratorní vibrační prosévačky a normované řady sít byly oba typy RCA roztríděny do tří frakcí: 0–4 mm, 4–8 mm a 8–16 mm viz Obr. 28. Všechny materiálové zdroje vyhovovaly příslušným evropským normám, především EN 197-1 (2000) pro cement, EN 1008 (2002) pro záměsovou vodu a ČSN EN 12620 (Český normalizační institut 2008a) pro kamenivo do betonu.



**Obr. 28** 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 matečního betonu,
- přírodní kamenivo NA bylo získáno z lomů v obcích Žabčice a Bratčice, tedy od výrobců kameniva certifikovaných podle normy ČSN EN 12620: 2008 (Český normalizační institut 2008a). Pro výrobu testovacího RAC byly použity tři frakce různých velikostí. Jako jemná frakce NA byl použit těžný vodou promytý a vysušený písek frakce 0–4 mm. Receptura byla rovněž tvořena drceným štěrkem střední frakce NA frakce 4–8 mm a hrubým drceným štěrkem NA frakce 8–16 mm,
- při výrobě RAC byl použit cement CEM II / B-M (S-LL) 32,5 R, vyrobený podle normy EN 197-1: 2011. Objemová hmotnost suchého cementu byla 3,05 g/cm<sup>3</sup> a specifický povrch Blaine byl 498 m<sup>2</sup>/kg. Chemické složení použitého cementu je uvedeno v Tab. 18,
- ke snížení potřeby záměsové vody byla použita plastifikační přísada SikaPaver HC-230 v dávce 0,7 % hmotnosti cementu.

**Tab. 18 Chemické složení a typ cementu, použitého v experimentu pro výrobu RAC**

Cement	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
CEM II 32.5 R	58.9	19.8	4.8	2.7	2.1	2.9	0.053	0.71	0.19

#### 5.1.4. 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. Vzorky RCA-01 i RCA-02 prošly předběžným testováním a některé z počátečních výsledků již byly publikovány (Venkrbec et al. 2017). Rovněž byl proveden index tvaru a testy odolnosti proti oděru metodou Los Angeles. Pomocí provedených testů byly identifikovány následující charakteristiky RCA:

- stanovení zrnitosti – síťový rozbor a množství jemných částic dle norem ČSN EN 933-2 (Český normalizační institut 1997),
- objemová hmotnost částic a nasákavost dle normy ČSN EN 1097-6 (Český normalizační institut 2014),
- tvarový index dle normy ČSN EN 933-4 (Český normalizační institut 2008c),
- odolnost proti oděru Los Angeles dle normy ČSN EN 1097-2 (Český normalizační institut 2010).

Komplexní přehled fyzikálních a mechanických charakteristik jak pro RCA, tak pro NA, vycházejících z provedených testů, je uveden v Tab. 19.

S ohledem na metodický rámec a z důvodu různé tolerance parametrů vzorku dle standardních požadavků, nebylo možné uvažované czorky RCA klasifikovat jako vhodné pro přímé ověření certifikačním orgánem nebo zahrnout mezi kameniva, které jsou velmi dobré kvality. Nebylo tedy možné jednoznačně stanovit, že jsou adekvátní vzorkům NA a že jsou vhodné pro výrobu betonu. V tomto smyslu bylo před zahájením výroby betonu v plném rozsahu nutné nejprve učinit zásadní rozhodnutí, zda je možné uvažovat o zkoumaném kamenivu jako vhodném pro použití v RAC a je nutné podrobit jej dalším vícečetným zkouškám na zkušebních vzorcích či nikoliv.

V tomto konkrétním případě byly klíčové faktory pro pozitivní rozhodnutí o dalším využití vzorků kameniv RCA následující:



- zdroj obou kameniv byl uspokojivě zdokumentován a složení matečního betonu bylo částečně identifikováno v rámci dekonstrukce původní budovy,
- RCA bylo čisté (> 90% obsahu betonu a malty) a bez externích materiálů (dekonstrukce byla prováděna šetrně),
- pouze nasákavost překročila normové požadavky, což znamená, že je potřeba vzít v úvahu přítomnost další vody ve směsi, tzv. přidanou vodu pro ovlhčení zrn,
- Výsledek zkoušky na obsah jemných částic ve vzorku RCA-02 byl v souladu s normovými požadavky (přípustná hodnota je až do 10 %), ačkoliv u RCA-01 byly získány méně příznivé hodnoty.

**Tab. 19 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.

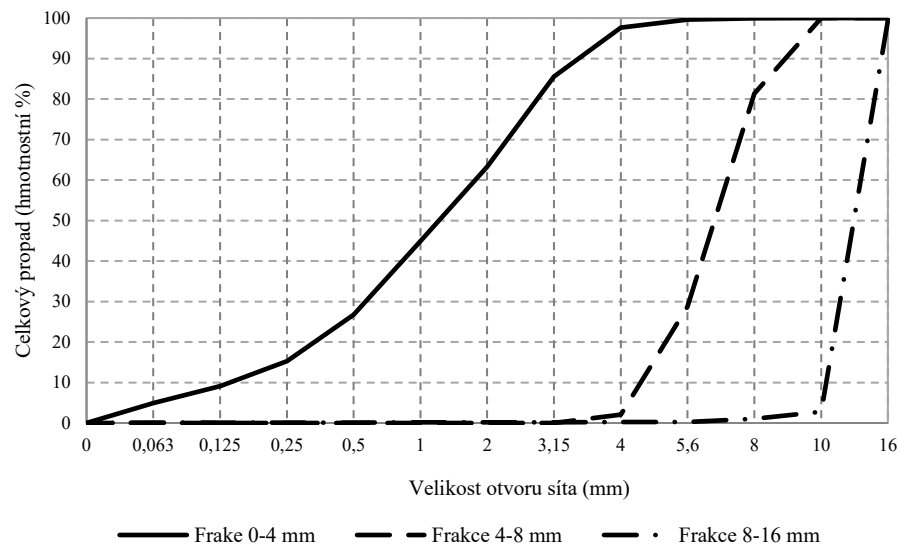
Srovnání fyzikálních a mechanických charakteristik zkoumaných RCA s těmi, které doporučují normy, je uvedeno v Tab. 20. Po vyhodnocení výsledků zkoušek a srovnání s ekvivalentním vzorkem NA, byly oba RCA klasifikovány jako vhodný zdroj pro konstrukční beton.

**Tab. 20 Porovnání fyzikálních a mechanických charakteristik hrubého RCA s příslušnými normovými požadavky (vlastní práce)**

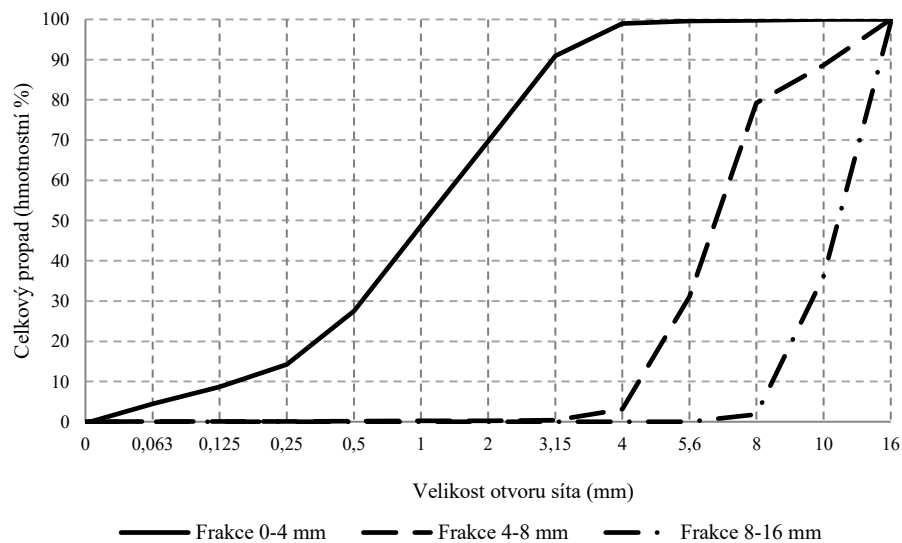
Typ kameniva	Normové požadavky		Výsledky		Vyhodnocení		Specifické požadavky	Příslušná norma
	typ A	typ B*	RCA-01	RCA-02	RCA-01	RCA-02		
Náhrada kameniva (hmotnostních %)	30	20	40	40	OK	OK	Pouze pro XC2	EN 206:2013 +A1:2016
Obsah jemných částí (%)	–	–	16,08	9,97	vyšší hodnota	OK		EN 12620:2002 +A1:2008
LA	≤ LA50	≤ LA50	LA50	LA30	OK	OK	≤ LA30 (EN 1097-2)	EN 12620:2002 +A1:2008
Objemová hmotnost ODD (kg/m <sup>3</sup> )	≥ 2100	≥ 1700	1997	2076	nižší hodnota	OK	–	EN 12620:2002 +A1:2008
Třída hrubého RCA	R <sub>c</sub> 90	R <sub>c</sub> 90	R <sub>c</sub> 90	R <sub>c</sub> 90	OK	OK	–	EN 12620:2002 +A1:2008
Tvarový index (třída)	≤ SI <sub>55</sub>	≤ SI <sub>55</sub>	SI <sub>15</sub>	SI <sub>20</sub>	OK	OK	–	EN 12620:2002 +A1:2008
Nasákavost (%)	musí být deklarováno	musí být deklarováno	9,2	9,6	OK	OK	–	EN 12620:2002 +A1:2008

Poznámka: (\*) Typ kameniva může být použit pouze pro beton pevnostní třídy > C30/37.

RCA byl klasifikován podle normy EN 13242:2002+A1:2007 jako RC<sup>90</sup> pro RCA-01 i pro typ RCA-02, což znamená, že více než 90 % hmotnosti obou RCA obsahovalo betonové části a maltu. 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. 29 a Obr. 30.



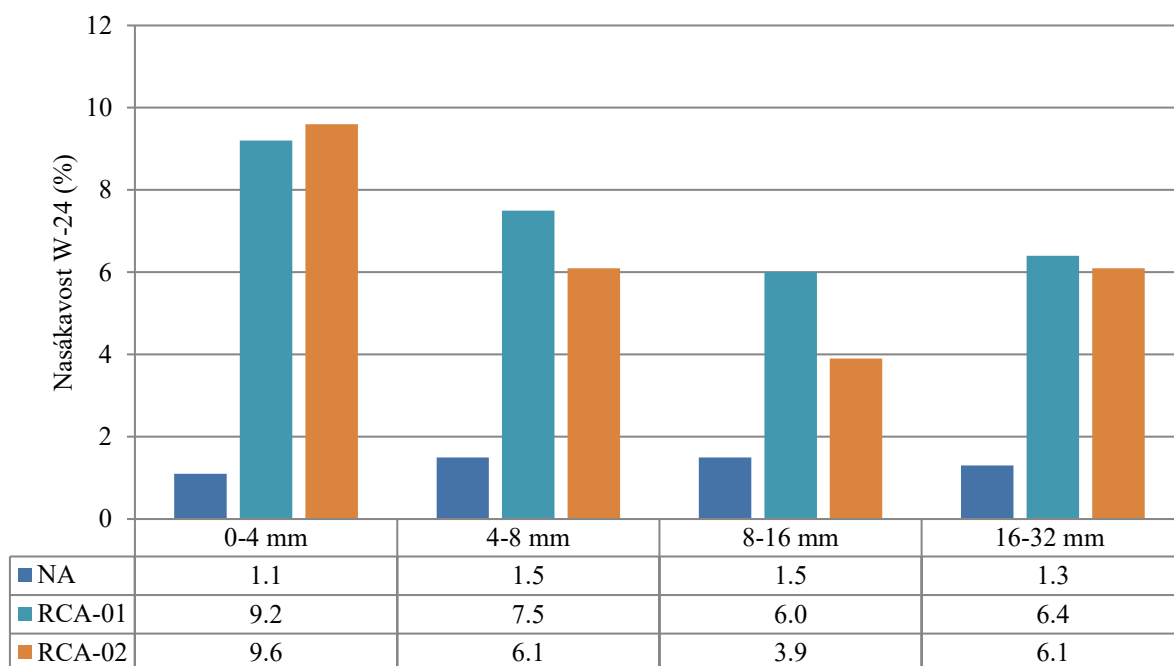
**Obr. 29** Křivka zrnitosti pro zkušební vzorek RCA-01



**Obr. 30** Křivka zrnitosti pro zkušební vzorek RCA-02

Výsledky ukazují, že RCA-01 obsahuje mnohem 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 v případě RCA-01 obsahem drceného lehčeného plniva *Keramzit*. Nasákavost RCA-01 je téměř ve všech případech vyšší než nasákavost 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. Nasákavost pro každou frakci a typ kameniva zobrazuje Obr. 31.



**Obr. 31 Grafické porovnání nasákavosti W-24 testovaných kameniv NA, RCA-01 a RCA-02**

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 %. Stanovení odolnosti proti drcení metodou Los Angeles na RCA-01 a RCA-02 byly zjištěny hodnoty 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.

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

V rámci této fáze bylo nejprve nutno připravit návrh nových betonových směsí RAC. Byly studovány dvě šarže směsí RAC s označením RAC-01-40 a RAC-02-40, s obsahem RCA v množství 40% hmotnosti kameniva 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 (Fuller a Thompson 1907), 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 obou směsí byly použity stejné hodnoty. Návrh složení betonové směsi s RCA a NA je uveden v Tab. 21, kde  $m_c$  je hmotnost cementu,  $m_w$  je hmotnost vody (obě dle normy EN 206: 2013 + A1: 2016) a  $m_p$  je hmotnost plastifikátoru podle doporučených údajů výrobce. Obsah volné vody  $m_{w,free}$  byl stanoven podle poměru  $w/c$  a byla přidána doplňková voda  $m_{v,add}$  v dávkách 35,44 % pro RAC-01-40 a 33,12 % pro RAC-02-40 pro účely dostatečného nasycení kameniva, především RCA a rovněž pro dosažení lepší zpracovatelnosti. Komplexní portfolio betonů interních betonáren včetně návrhu receptur je pak uvedeno v přílohové části práce v rámci kapitoly 14.1 a kapitoly 14.2.

Tab. 21 Návrh betonové směsi s kamenivem RCA a NA (vlastní práce)

Receptura betonu	$w/c$ *	Proporce receptury ( $\text{kg/m}^3$ )									Objemová hmotnost ( $\text{kg/m}^3$ ) **	
		Voda			Přísady	RCA			NA			
		$m_c$	$m_{w,free}$	$m_{v,add}$		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

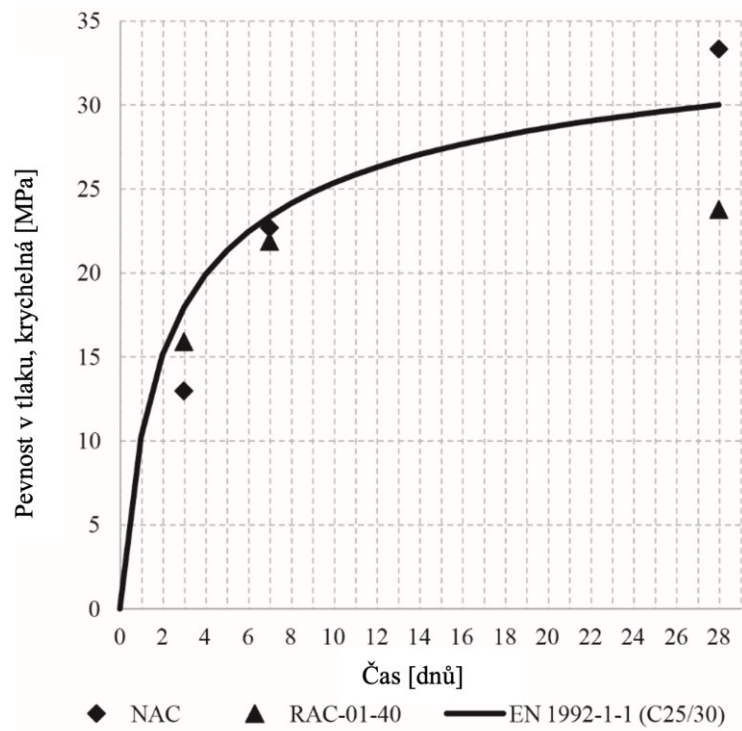
Pozn.: (\*)  $w/c$  poměr vztažen k volné vodě; (\*\*) objemová hmotnost čerstvé betonové směsi

Zkušební krychle a hranoly 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 (2009). 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.

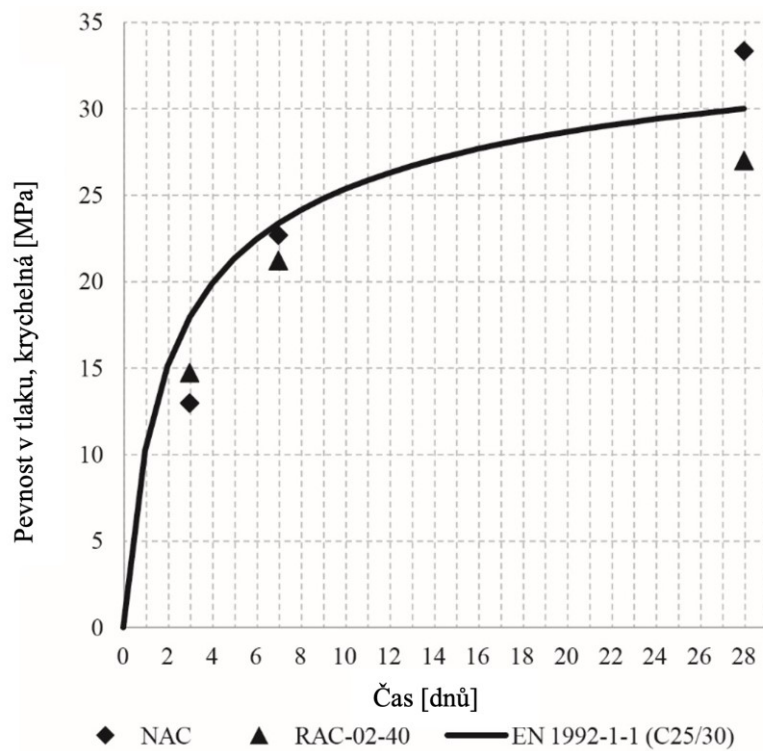
Pevnost v tlaku na krychlích byla stanovena pomocí zkoušek provedených podle EN 12390-3 (2009). Nárůst krychelné pevnosti v tlaku v čase byl porovnán s konvenčním grafem nárůstu pevnosti založeným na doporučených hodnotách normy EN 1992-1-1 (2004). Hodnoty pevností v tlaku pro každý vzorek obou směsí RAC jsou uvedeny v Tab. 22. 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 normě EN 1992-1-1 (2004) jsou zřejmé z Obr. 32 a Obr. 33.

**Tab. 22 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



Obr. 32 Pevnost v tlaku na krychlích směsi RAC-01-40 (průměrné hodnoty) ve srovnání s NAC a normou EN 1992-1-1 (2004)



Obr. 33 Pevnost v tlaku na krychlích směsi RAC-02-40 (průměrné hodnoty) ve srovnání s NAC a normou EN 1992-1-1 (2004)

Pevnost v tahu za ohybu pro směs RAC-01-40 a RAC-02-40 byla testována podle EN 12390-5 (2009) na hranolcích po 28 dnech od betonáže. Každá šarže byla testována pomocí tří vzorků a byl vypočítán modul pružnosti, viz Tab. 23.

**Tab. 23 Pevnost v tahu za ohybu na hranolech pro směsi RAC-01-40 a RAC-02-40, testováno na vzorcích po 28 dnech od betonáže (vlastní práce)**

Směs	Pevnost v tahu za ohybu (MPa)					Modul pružnosti $E_{cm}$ (GPa)*
	Vzorek č.	#1	#2	#3	Průměr	
RAC-01-40		2,149	1,879	1,941	1,989	25,740
RAC-02-40		2,743	2,246	2,284	2,425	31,130

Pozn.: (\*) Empirická reprezentace na základě Tabulky 3.1. normy EN 1992-1-1 (2004).

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu byla testována podle normy EN 12390-7 (2000) a zjištěné průměrné hodnoty jsou  $2272 \text{ kg/m}^3$  pro směs RAC-01-40 a  $2324 \text{ kg/m}^3$  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.

### Jednotkové ceny surovin pro recyklované betonové směsi interních betonáren

Pro dopočet ceny betonových směsí interních betonáren z cen betonáren externích byl proveden průzkum trhu a vyhledány tržní ceny recyklovaného kameniva, přírodního kameniva, viz Tab. 24 cementu a vody viz Tab. 25. Princip výpočtu cen směsí recyklovaných betonů je uveden v kapitole 4.3.4.

**Tab. 24 Jednotkové tržní ceny kameniva**

Frakce	RCA			NA		
	Kč/tuna	Kč/kg	Eur/kg	Kč/tuna	Kč/kg	Eur/kg
0–4	110	0,11	0,004074	242	0,242	0,008962963
4–8	110	0,11	0,004074	363	0,363	0,013444444
8–16	110	0,11	0,004074	424	0,424	0,015703704

**Tab. 25 Jednotkové tržní ceny cementu a záměsové vody**

Typ cementu	Kč/tuna	Kč/kg	Eur/kg
CEM 32,5	2783	2,783	0,103074074
CEM 42,5	3194	3,194	0,118296296
CEM 52,5	7865	7,865	0,291296296
	Kč/m <sup>3</sup>	Kč/kg	Eur/kg
Záměsová voda	37,08	0,03708	0,001373333



## 5.2. 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 užit Autodesk Revit (Autodesk Inc. 2020a). Pro optimalizační model pak prostředí MATLAB (The MathWorks Inc. 2020). 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 do formátu \*.xlsx. Kompletní exportní data z BIM jsou uvedena v elektronické příloze 14.3.

### 5.2.1. Definování charakteristik RAC z prostředí optimalizačních výpočtů pro modelovací prostředí BIM

Po vygenerování výsledků z optimalizačního prostředí je vhodné, aby se výsledky dále využily v rámci životního cyklu stavby, a to převším pro fázi, které se to týká. Výsledky z logistického optimalizačního scénáře jsou určeny především pro výrobní fázi výstavbového procesu, a tudíž, pro definování charakteristik RAC, které by byly pro tuto fázi využitelné, se nabízí zpětná implementace dat do modelu BIM jako vhodný prostředek pro uchování a plné využití takto optimalizovaných dat. Dojde tak k plnému naplnění smyslu aktivního BIM přístupu, který byl definován v rešeršní kapitole této práce.

#### Charakteristiky RAC pro import do BIM

Obecné charakteristiky, které je možné importovat v podobě negrafických údajů zpětně do BIM modelu, byly definovány v následujících kapitolách této práce. Charakteristiky jsou navrženy tak, aby splnily předpoklady k aplikaci pomocí datového výměnného formátu IFC a jsou v souladu se strukturou DPS<sup>175</sup>, RDS<sup>176</sup> a MSPS<sup>177</sup> v rámci Standardu Negrafických Informací

---

<sup>175</sup> V rámci SNIM je DPS definována jako Dokumentace provedení stavby

<sup>176</sup> V rámci SNIM je RDS definována jako Realizační dokumentace stavby

<sup>177</sup> V rámci SNIM je MSPS definována jako Model skutečného provedení stavby pro Facility Management

3D Modelu (SNIM) (Odborná rada pro BIM z.s. 2020) ve verzi platné ke dni 15. 5. 2020. Základní seznam parametrů, které mohou být aplikovány na většinu betonových konstrukcí, resp. prvky modelu, jsou shrnuty v následující Tab. 26.

**Tab. 26 Seznam parametrů pro charakterizaci betonových prvků v BIM modelu pro datový formát IFC dle definice SNIM**

Parametr	Datový typ	Jednotka	IFC název	Sdílené parametry pro Revit
Kód budovy	string	TEXT	BuildingID	KÓD BUDOVY
Délka	number	mm	Length	DÉLKA
Šířka	number	mm	Width	ŠÍŘKA
Výška	number	mm	Height	VÝŠKA
Objem	number	m3	NetVolume	OBJEM
Plocha	number	m2	NetArea	PLOCHA
Receptura betonu	string	TEXT	ConcreteDescription	RECEPTURA BETONU
Třída betonu	string	TEXT	StrengthClass	TŘÍDA BETONU
Stupeň vyztužení	number	Kg/m2	ReinforcementVolumeRatio	STUPEŇ VYZTUŽENÍ
Třída výztuže	string	TEXT	ReinforcementType	TŘÍDA VÝZTUŽE
Hmotnost výztuže	number	Kg	ReinforcementWeight	HMOTNOST VÝZTUŽE
Krytí výztuže	number	mm	ConcreteCover	KRYTÍ VÝZTUŽE

**Tab. 27 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/m3	ConcreteTotalCost	CENA BETONU

Výše uvedené parametry neobsahují dostatek nutných negrafických informací pro účely využití optimalizace při aplikacích RAC, a proto bylo navrženo rozšíření těchto parametrů o další, které jsou uvedeny v Tab. 27. Propojením výše uvedených parametrů je možné jednoznačně definovat takové parametry, které mohou přispět k efektivitě optimalizace a následného obohacení informačního modelu budovy.

### 5.3. PŘÍPADOVÁ STUDIE A VÝSLEDKY OPTIMALIZACE

Smyslem implementace algoritmu na konkrétní případovou studii je prokázání jeho vhodnosti a přínosu pro optimalizaci investičního výstavbového projektu. V následující kapitole je představena podkladová část, následně je popsán logistický model a vyjmenovány okrajové podmínky, následované popisem konkrétních výsledků optimalizačního modelu. Vzhledem k rozsáhlosti modelu a výsledků je v této práci pro případovou studii ověřena pouze varianta portfolia směsí z recyklátu RCA-02, a to vzhledem k podobnosti receptur směsí z kameniva RCA-01 viz kapitola 14.1 a RCA-02 viz kapitola 14.2.

#### 5.3.1. Představení podkladové části

Jako testovací objekt pro případovou studii byla zvolena stavba výzkumného centra CEITEC na základě tendrové projektové dokumentace, poskytnuté generálním projektantem – společností Arch.Design, s.r.o. Staveniště se nachází na GPS souřadnicích 49.23315971311193, 16.57423133760194. Komplex výzkumného centra CEITEC je tvořen třemi hlavními objekty A, B, E a jedním společným vstupním objektem S viz vizualizace na Obr. 35. **Případová studie byla aplikována pouze na budovu objektu A**, která obsahuje komplexní portfolio železobetonových konstrukcí (piloty, základové pasy, podzemní i nadzemní stěny, stropní deskové konstrukce apod.), vhodného rozsahu pro případovou studii.

#### Popis objektu A (stavební objekt SO 101) Pokročilé stavební materiály

Tato kapitola byla převzata z podkladové dokumentace:

*„Objekt je navržen jako třípodlažní s částečným podsklepením objektu. 3.NP je uskočené a slouží pro technické vybavení budovy. Podzemní patro umístěné na jižní straně objektu na terénu je vstupní a slouží k propojení mezi ostatními objekty (konkrétně objekt B a S) v areálu a pro vedení technických instalací v instalačním koridoru. Vertikální spojení v objektu zajišťuje*

*centrální komunikační jádro. Bezbariérová vertikální přeprava osob je zajištěna jedním výta-  
hem v centrálním komunikačním jádru. Dva vedlejší vstupy jsou navrženy ze západu a východu  
ve vazbě na ukončení páteřních chodeb 1.NP s výstupem na střechu spojovacích krčků mezi  
jednotlivými objekty areálu. V 2.NP páteřní chodby ústí na severní straně ke dvěma exterié-  
rovým únikovým schodištím. Koncepce dispozičního řešení počítá s umístěním jednotlivých la-  
boratoří na severní straně objektu a pracovny společně se sociálním zázemím jsou situovány v  
jižní části objektu ve vazbě na svislé komunikační spoje.“ (Arch.Design 2011)*

### **Konstrukční řešení stavby objektů A**

Tato kapitola byla převzata z podkladové dokumentace:

*„Nosná konstrukce objektu je tvořená monolitickým železobetonovým skeletem se základ-  
ním modulovým systémem sloupů 7,2 x 7,2 m a v chodbovém traktu 7,2 x 2,7 m, doplněným  
vloženými sloupy v nepravidelných částech a monolitickou železobetonovou obvodovou stěnou.  
Tento základní skeletový systém je dále doplněn železobetonovými stěnami komunikačních ja-  
der. Konstrukční výšky jednotlivých podlaží jsou navrženy 4,2 m kromě 3.NP kde je 3,30 m v 1.  
a 2.PP 3,95 m.*

*Vnitřní svislé nosné konstrukce budou tvořeny železobetonovými sloupy profilu 0,4 x 0,4  
m a stěnami ztužujících jader tl.20,0cm. Obvodové stěny jsou tl. 0,25 cm a obvodová stěna 1.PP  
v místě výškové změny bude tl.0,5 m s vytvořeným podélným ozubem pro uložení podlahové  
desky 1.NP. S ohledem na ochranu objektu proti bludným proudům není uvažováno s propoje-  
ním sloupů a stěn s pilotovými základy. Vodorovné nosné konstrukce jsou převážně tvořeny  
bezhřibovými monolitickými železobetonovými stropními deskami tl.0,25 m pouze stropní deska  
2.NP je z důvodu koncentrace zatížení ve strojovně 3.NP a přilehlé části střechy navržena  
tl.0,27 m. Část stropu 1.NP v prostoru technického zázemí je navržena jako trémový strop z  
důvodu velkého množství prostupů. V místech větších otvorů nebo koncentrace menších pro-  
stupů a také v místech vynášení konstrukce vyššího podlaží jsou stropní desky doplněny trámy  
a ztužidly.*

*Z monolitického železobetonu bude provedeno i hlavní schodiště.*

*Nosná konstrukce podlah bude tvořená monolitickou železobetonovou deskou tl.0,25 m  
provedenou přes hlavy pilot.*

*U spojovacího krčku budou pod prosklenou obvodovou stěnou pilotové základy doplněny  
monolitickými železobetonovými pasy.*

*Navazující ocelové konstrukce jsou součástí samostatné projektové části.*

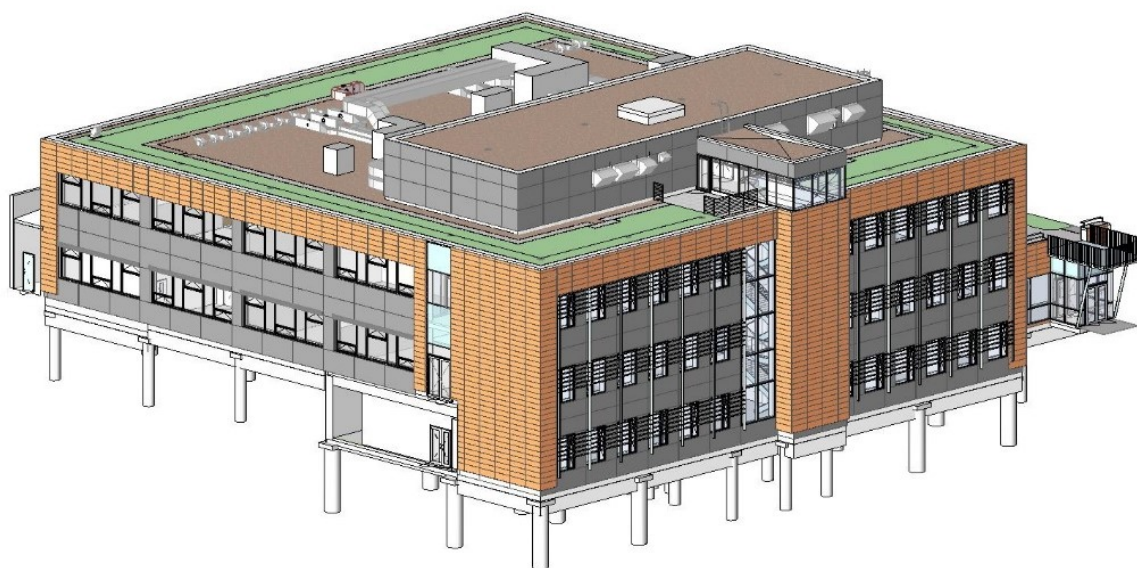
*Objekt je samostatnou dilatační částí.*

*Založení objektu je navrženo na vrtaných železobetonových pilotách průměru 630 a 900 mm pažených ocelovými pažnicemi.*

*Vrtání bude probíhat ve vrstvě sprašových hlín proměnné konzistence. Únosnost a délka pilot je ovlivněna výskytem měkké vrstvy hlín (ovlivnění podzemní vodou). Tato skutečnost byla zjištěna v penetraci SP9 a sondě J12. Při vrtání pilot musí být upřesněn přesný rozsah této měkké vrstvy po celé ploše stavby. Paty pilot musí být ukončeny v zeminách pevné konzistence.*

*Vzhledem ke složitosti dispozice 1. PP a 1. NP (výškově odskákané suterény) bude probíhat vrtání pilot z rozdílných úrovní. Na rozhraní mezi výškovými skoky pilotovacích úrovní bude provedeno svahování (s odskokem směrem do svahu).*

*Geologie v lokalitě je komplikovaná a proměnná. Dochází ke střídání konzistence sprašových hlín – tuhá, místy měkká (ovlivnění podzemní vodou), pevná.“ (Arch.Design 2011)*



**Obr. 34 Případová studie – Komplex výzkumného centra CEITEC, BIM model v prostředí Autodesk Revit, objekt A**



Obr. 35 Případová studie – Komplex výzkumného centra CEITEC, vizualizace, celý areál (Arch.Design 2011)

### Podkladová projektová dokumentace

Projektová dokumentace byla vypracována za využití metody informačního modelování budov (BIM) v prostředí Autodesk Revit verze 2012 viz výřez z modelu na Obr. 34. 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.

#### 5.3.2. 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 přípa-

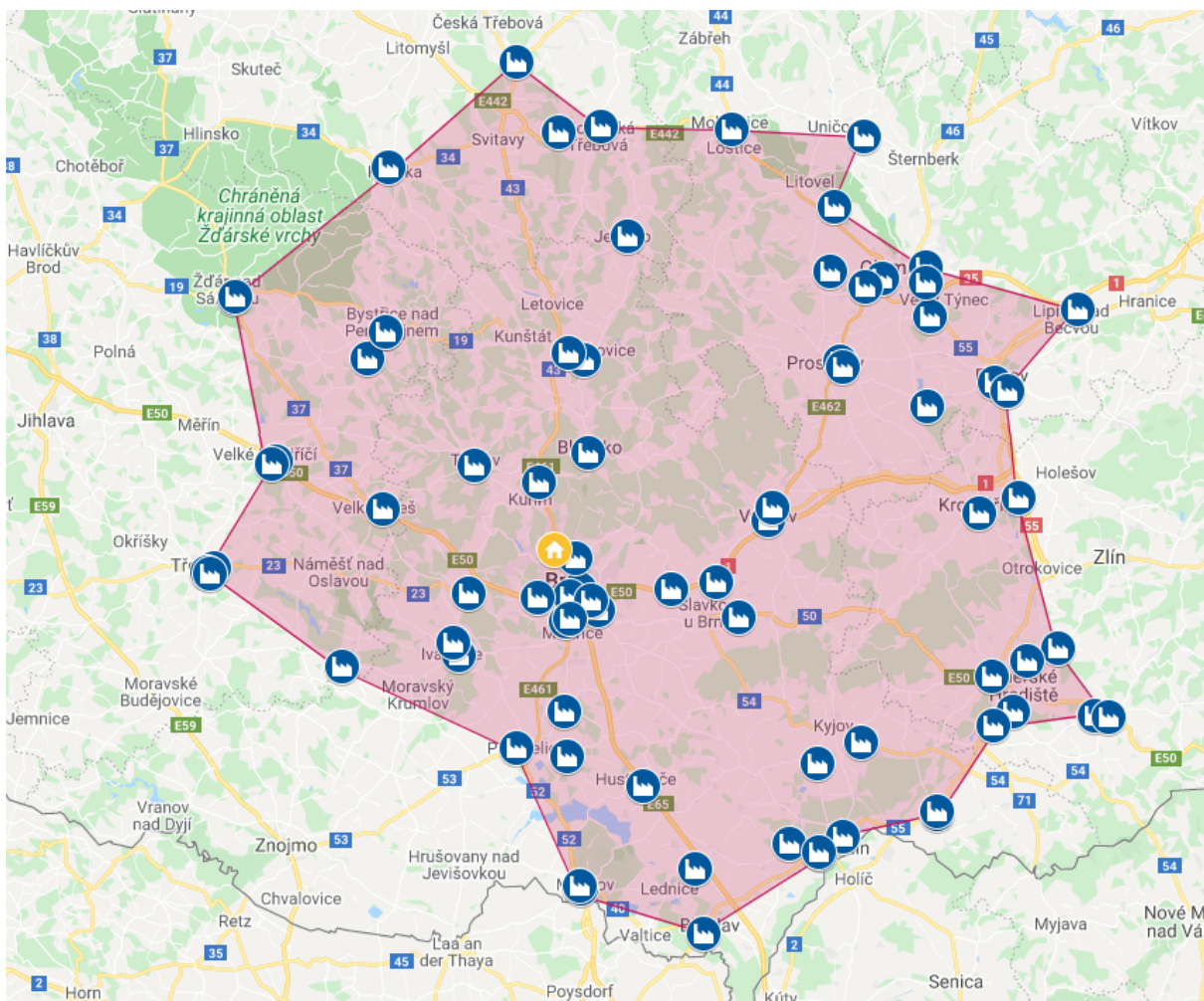
dovou studii byly zvoleny následující pravidla a omezení, inspirovaná reálným prostředím dodavatelského systému transportbetonu:

- pro výpočet budou vybrány pouze takoví dodavatelé betonu, kteří splňují kritérium dojezdového času do 1,5 hodiny.
- dobu čekání model v rámci času dopravy nezohledňuje,
- pro výpočet budou vybrány pouze takoví dodavatelé betonu, kteří disponují požadovaným typem betonu,
- 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 betonu autodomíchávače je uveden dle ceníkových informací a sice nejbližší varianta k objemu 8 m<sup>3</sup>. Pokud taková informace v ceníku chybí, je zvolen defaultní objem 8 m<sup>3</sup>,
- Způsob výpočtu ceny dopravy je převzat z oficiálních ceníků dodavatelů. Pokud taková informace není dostupná, je zvolen výpočet ceny za km.

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. Výrobní portfolio a jednotkové ceny byly shromážděny z webových stránek jednotlivých výrobců a lze je nalézt v přílohové části práce kapitole 14.7. Pozice těchto betonáren je zřejmá z Obr. 36.

Interní betonárny jsou takové, které mají schopnost vyrobit určité množství a druh recyklovaného betonu. Výrobní portfolio interních betonáren včetně jednotkových cen betonů je uvedeno v přílohové části práce v kapitole 14.6. Pozice těchto betonáren je zřejmá z Obr. 37. Při výběru pozic byl kladen důraz na rovnoměrné rozložení pozic v rámci řešeného regionu (např. kraje).



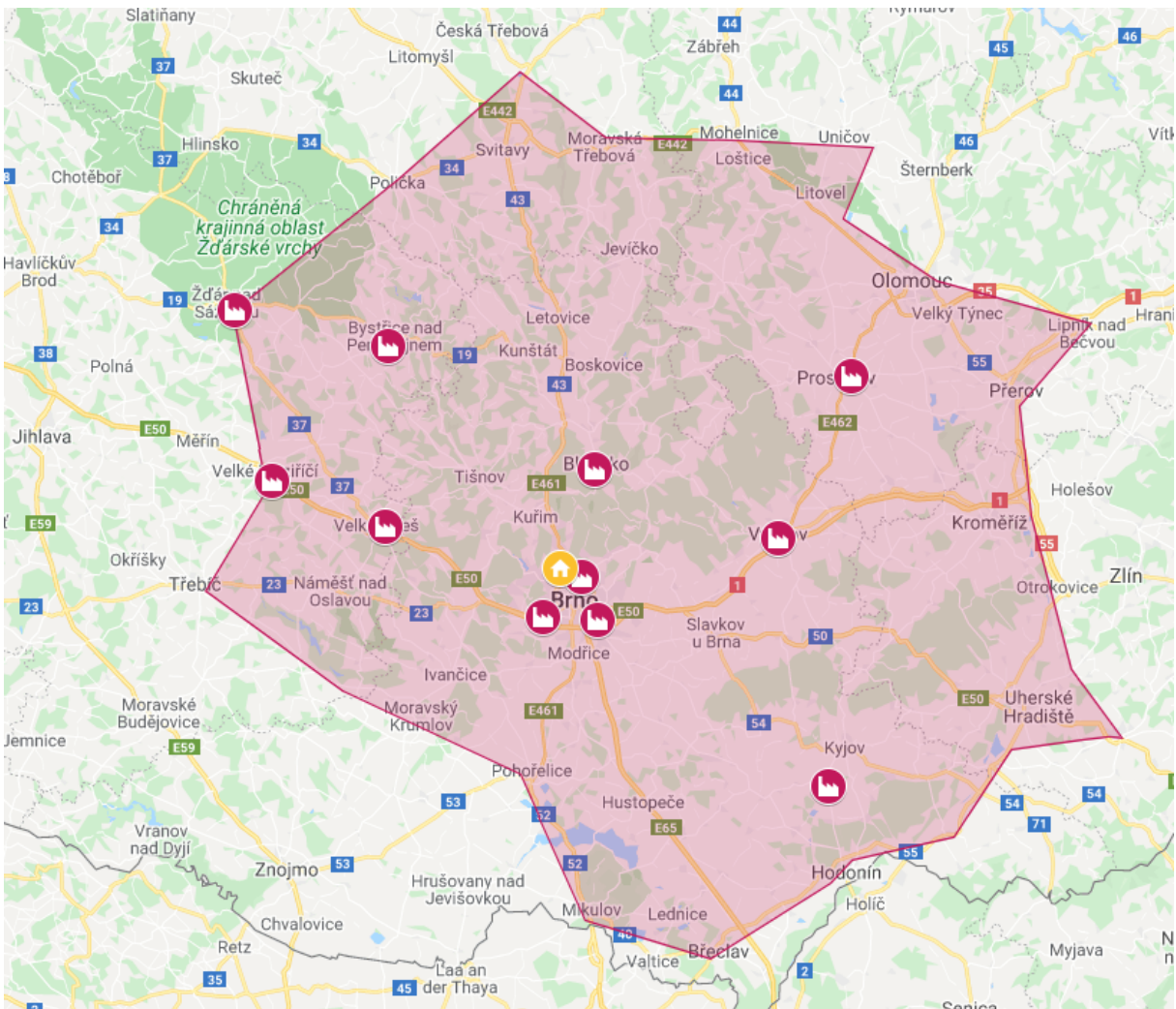
**Obr. 36** Mapa s pozicemi externích betonáren splňující kritérium dojezdového času pro objekt v rámci případové studie

### 5.3.3. 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 (Venkrbec 2018).



- 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 Reycycling, 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 %).



**Obr. 37** Mapa s pozicemi interních betonáren vyrábějící recyklovaný beton a splňující kritérium dojezdového času pro objekt v rámci případové studie

### 5.3.4. 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 4.4.3.

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 matice dat, pocházející z BIM modelu

- Seznam konstrukčních prvků viz Tab. 28, podrobně v přílohové kapitole 14.3.

#### Externí betonárny

- Seznam externích betonáren viz Tab. 29, podrobně v přílohové kapitole 14.5.,
- matice cen betonů externích betonáren viz Tab. 30, podrobně v přílohové kapitole 14.7.,
- matice cen dopravy externích betonáren viz Tab. 31, podrobně v přílohové kapitole 14.8.

#### Interní betonárny

- Seznam interních betonáren viz Tab. 32, podrobně v přílohové kapitole 14.4.,
- matice cen betonů interních betonáren viz Tab. 33, podrobně v přílohové kapitole 14.6.

**Tab. 28 Zkrácená ukázka vstupních dat z BIM modelu – seznam konstrukčních prvků (vlastní práce)**

IfcGuid; Název konstrukčního prvku; Popis	Stupeňvlivu prostředí	Objem prvku [m <sup>3</sup> ]	Pevnostní třída betonu
9658; PA-44; Pilota 630x3250, hlava 800x800x250	XC2	4,12	C25/30
9652; PA-47; Pilota 630x3250, hlava 800x800x250	XC2	4,12	C25/30
11522; PA-48; Pilota 630x3250, hlava 800x800x250	XC2	4,12	C25/30
14450; ŽB STĚNA– S20; VNĚJŠÍ STĚNA; INP	XC4	10,95	C30/37
2633; ŽB ZÁKLADOVÁ DESKA; dojezd výtahu	XC1	1,26	C25/30
8237; ŽB ZÁKLADOVÁ DESKA; 1PP	XC1	191,10	C25/30
13964; ŽB ZÁKLADOVÁ DESKA; INP	XC1	172,64	C25/30

**Tab. 29 Zkrácená ukázka vstupní matice – Seznam externích betonáren (vlastní práce)**

ID	Název betonárny	Vzdálenost z betonárny na stavenišťě	
		[km]	
11	AS – Bet Bílovice – betonárna Bílovice	116,704	
31	BETON RUSÍN s.r.o.	20,697	
46	BETONÁRNA FENDRYCH s.r.o.	45,556	
71	CEMEX Czech Republic, s.r.o. - betonárna Brno	7,587	

**Tab. 30 Zkrácená ukázka vstupních dat pro jednu betonárnu – matice cen externích betonáren (vlastní práce)**

	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
C08/10	1534	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C12/15		1699	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16/20		1807	1807	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C20/25		1925	1925	1925	1925	1700	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C25/30		2074	2074	2074	2074	2074	2314	2314	0	0	0	2314	2314	0	0	0	0	0
C30/37		2294	2294	2294	2294	2294	2470	2470	0	0	0	2470	2470	2470	0	0	0	0

**Tab. 31 Zkrácená ukázka vstupních dat – matice cen dopravy externích betonáren (vlastní práce)**

ID	Název	Objem		Cena															
		bubnu mixu [m <sup>3</sup> ]	za km [Kč/m <sup>3</sup> ]	1-5	6-8	9-10	11-13	14-15	16-18	19-20	21-23	24-25	26-28	29-30	31-33	34-35	36-38		
046	N1	7	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	atd.	
048	N2	8	1	140	190	240	280	325	380	380	445	445	505	505	560	560	615	atd.	

Pozn.: Druhý sloupec reálně obsahuje plný název betonárny, avšak zde byl zkrácen a nahrazen N1 a N2. Příklad uveden pouze do pásma 36-38 km vzdálenosti od stavenišťě.

**Tab. 32 Vstupních data – seznam interních betonáren (vlastní práce)**

ID	Název betonárny	Vzdálenost z betonárny na stavenišťě		Cena dopravy [Kč/km]
		[km]		
1	RAC DODAVATEL 01 - TBG betonárna Podivín	58,474		15
2	RAC DODAVATEL 02 - TBG BETONMIX a.s. - provoz Blansko	20,847		15
3	RAC DODAVATEL 03 - TBG BETONMIX a.s. - provoz Bosonohy	8,611		15
4	RAC DODAVATEL 04 - TBG BETONMIX a.s. - provoz Černovice	12,937		15
5	RAC DODAVATEL 05 - TBG BETONMIX a.s. - provoz Královo Pole	4,301		15
6	RAC DODAVATEL 06 - TBG BETONMIX a.s. - provoz Mistřín	66,481		15
7	RAC DODAVATEL 07 - TBG BETONMIX a.s. - provoz Prostějov	69,609		15
8	RAC DODAVATEL 08 - TBG BETONMIX a.s. - provoz Vyškov	42,331		15
9	RAC DODAVATEL 09 - TBG PKS a.s. - provoz Bystřice nad Pernštejnem	51,511		15
10	RAC DODAVATEL 10 - TBG PKS a.s. - provoz Velká Bíteš	35,513		15
11	RAC DODAVATEL 11 - TBG PKS a.s. - provoz Velké Meziříčí	54,828		15
12	RAC DODAVATEL 12 - TBG PKS a.s. - provoz Žďár nad Sazavou	69,602		15

**Tab. 33 Zkrácená ukázka vstupních dat pro jednu betonárnu – matice interních betonáren (vlastní práce)**

	RAC-02-00			RAC-02-05			RAC-02-10		
	C20/25	C25/30	C30/37	C20/25	C25/30	C30/37	C20/25	C25/30	C30/37
XC1	2095	2235	2450	2065,418	2205,418	2420,418	2035,835	2175,835	2390,835
XC2	2125	2235	2450	2095,639	2205,639	2420,639	2066,279	2176,279	2391,279
XC4	0	2335	2490	0	2305,17	2460,17	0	2275,339	2400,509
XF1	0	2270	2490	0	2241,593	2461,593	0	2213,187	2433,187
XF3	0	2480	2585	0	2451,653	2556,653	0	2423,305	2528,305
XA1	0	2270	2585	0	2240,78	2555,78	0	2211,56	2526,56

pokračování Tab. 33:

	RAC-02-15			RAC-02-20			RAC-02-25		
	C20/25	C25/30	C30/37	C20/25	C25/30	C30/37	C20/25	C25/30	C30/37
XC1	C20/25	C25/30	C30/37	C20/25	C25/30	C30/37	C20/25	C25/30	C30/37
XC2	2006,253	2146,253	2361,253	1976,67	2116,67	2331,67	1947,088	2087,088	2302,088
XC4	2036,918	2146,918	2361,918	2007,557	2117,557	2332,557	1978,197	2088,197	2303,197
XF1	0	2245,509	2400,509	0	2215,678	2370,678	0	2185,848	2340,848
XF3	0	2184,78	2404,78	0	2156,374	2376,374	0	2127,967	2347,967
XA1	0	2394,958	2499,958	0	2366,61	2471,61	0	2338,263	2443,263

pokračování Tab. 33:

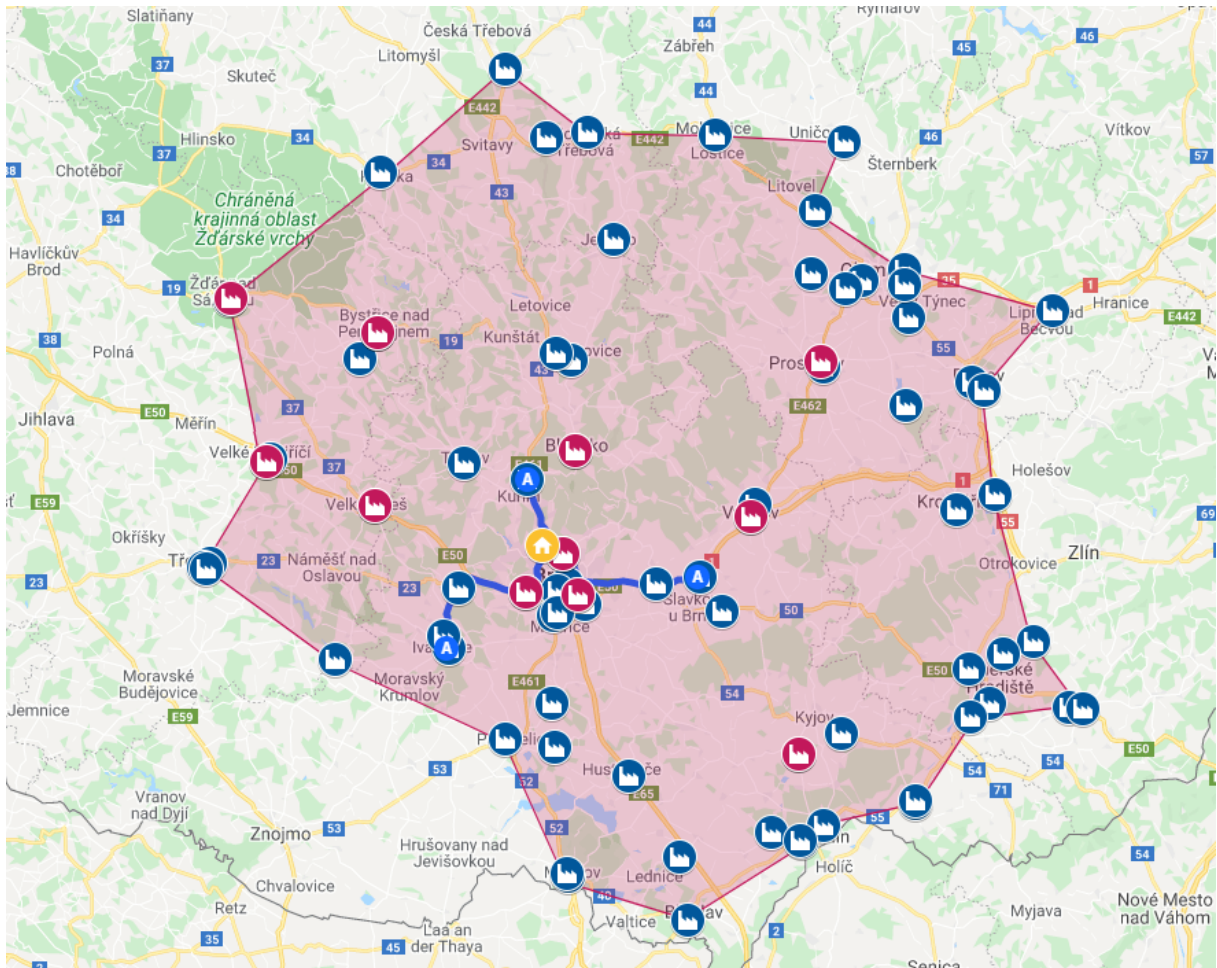
	RAC-02-30			RAC-02-35			RAC-02-40		
	C20/25	C25/30	C30/37	C20/25	C25/30	C30/37	C20/25	C25/30	C30/37
XC1	1917,505	2057,505	2272,505	1887,923	2027,923	2242,923	1858,341	1998,341	2213,341
XC2	1948,836	2058,836	2273,836	1919,476	2029,476	2244,476	1890,115	2000,115	2215,115
XC4	0	2156,017	2311,017	0	2126,187	2281,187	0	2096,356	2251,356
XF1	0	2099,561	2319,561	0	2071,154	2291,154	0	2042,748	2262,748
XF3	0	2309,915	2414,915	0	2281,568	2386,568	0	2253,22	2358,22
XA1	0	2094,679	2409,679	0	2065,459	2380,459	0	2036,238	2351,238

Výsledky optimalizace se sestávají z několika automatizovaně generovaných výstupů a mezi-výstupů, které model obsahuje:

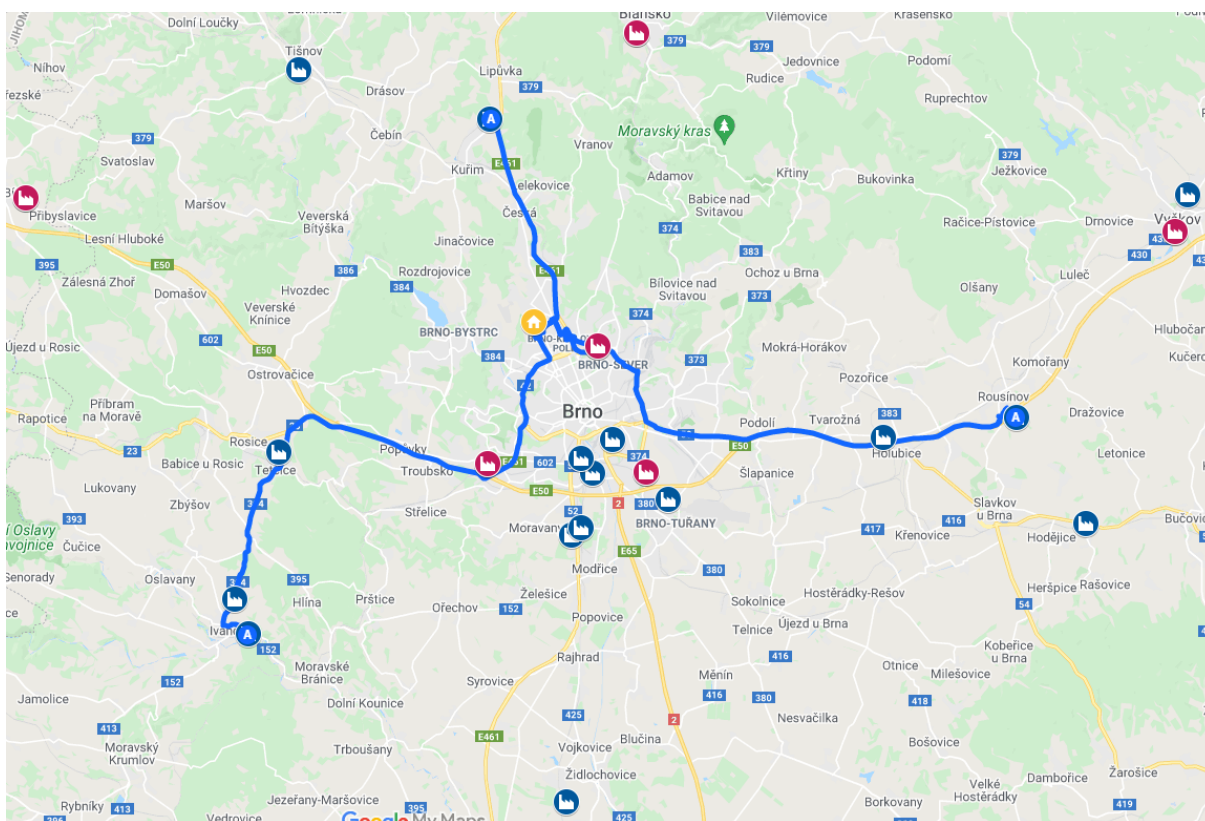
- příkazový řádek (Command File) – je kompletní výstupní soubor s příkazy v podobě předdefinované struktury (textový soubor),
- zobrazení nejnižší celkové ceny ze všech použitelných betonů (textový výpis),
- zobrazení všech variant použitelných betonů (textový soubor),
- zobrazení grafů cen externích betonáren dle ceny (grafický výstup),
- zobrazení grafů cen externích betonáren dle dojezdové vzdálenosti (grafický výstup),
- zobrazení grafů cen interních betonáren dle ceny (grafický výstup),

- výpis výpočtu cen = obsahuje postupnou aplikaci hodnot do obecných vztahů (textový soubor),
- zobrazení společných grafů cen externích i interních betonáren (grafický výstup),
- exportní modul společných grafů cen externích i interních betonáren (exportní grafický výstup ve formátu \*.png),
- zobrazení souhrnného koláčového grafu typů betonů pro celou stavbu (grafický výstup),
- generátor souhrnné tabulky cen (tabulka vygenerovaná do tabulkového editoru \*.xls).

Vizualizace optimálního řešení je zřejmé z mapy na Obr. 38 a konkrétní dopravní trasy optimálních dodavatelů jsou vyznačeny v mapě na Obr. 39.



**Obr. 38** Mapa optimálního řešení s pozicemi interních (červených) a externích (modrých) betonáren ve vztahu k umístění objektu řešené stavby (žlutě) a dopravních tras (vždy z bodu A do bodu B)



**Obr. 39** 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 (vždy z bodu A do bodu B)

### Podrobný popis výsledků optimalizace v rámci případové studie

Souhrnný poměr přírodního a recyklovaného betonu pro budovu A byl automatizovaně vygenerován z prostředí MATLAB na základně optimálního řešení dodavatelů betonů pro jednotlivé prvky. Optimální podíl procelou budovu A je následující:

- NAC: 1737,9465 m<sup>3</sup>, což odpovídá podílu **26%**
- RAC: 599,3197 m<sup>3</sup>, což odpovídá podílu **74%**

Pro **prvky 1 až 28** (pilota 900x3250, hlava 1100x1100x250) o objemu 8,57 m<sup>3</sup> byli algoritmem nalezeni optimální dodavatelé betonu. Z důvodu totožných prvků a materiálové charakteristiky (C25/30, XC2) je pro všechny tyto prvky totožný **optimální dodavatel externí betonárna č. 38, poskytující NAC v hodnotě 17 601,5 Kč** z 30,8 km vzdálených Ivančic. Interní dodavatel recyklovaného betonu s recepturou RAC-02-40 v tomto případě je druhý ekonomicky nejvýhodnější s cenou 17 741,36 Kč. V případě, že by byl kladen důraz na environmentální benefit dodavatele, byl by cenový rozdíl poměrně malý, a sice 139,86 Kč, což v přepočtu

činí rozdíl 16,32 Kč/m<sup>3</sup>. Dodavatelé na 2. až 13. místě poskytují RAC směs, což je z environmentálního hlediska rovněž benefitem. Další portfolio dodavatelů poskytuje poměrně plynulý narůst křivky celkové ceny, odvíjející se zpravidla dle dopravní vzdálenosti. Drobným skokem je pak poslední umístěný dodavatel, betonárna č. 184 ze 106 km vzdáleného Uherského Brodu, která poskytuje mírně dražší dopravu a na větší vzdálenost se tento parametr projevil.

Pro prvky 29 až 51 (pilota 630x3250, hlava 800x800x250) o objemu 4,12 m<sup>3</sup> byli algoritmem nalezeni optimální dodavatelé betonu. Z důvodu totožných prvků a materiálové charakteristiky (C25/30, XC2) je pro všechny tyto prvky totožný **optimální dodavatel interní betonárna č. 5** z 4,301 km vzdáleného Brna-Králova Pole, **poskytující RAC-02-40 v hodnotě 8 596,1 Kč**. Další dodavatelé v pořadí až do 7. místa jsou rovněž interní dodavatelé směsí RAC. Další portfolio dodavatelů poskytuje poměrně plynulý narůst křivky celkové ceny, odvíjející se zpravidla dle dopravní vzdálenosti. Drobným skokem je pak poslední umístěný dodavatel, opět betonárna č. 184 ze 106 km vzdáleného Uherského Brodu, která poskytuje mírně dražší dopravu a na větší vzdálenost se tento parametr projevil.

**Prvek č. 52**, ŽB základová deska dojezdu výtahu o objemu 1,26 m<sup>3</sup> vykazuje v rámci rozložení optimálních dodavatelů rovnoměrné rozložení interních a externích dodavatelů, avšak interní dodavatelé RAC se umístili na prvních třech pozicích. Nejvýhodnější je **interní betonárna č. 5 s optimální cenou 2 716,24 Kč**. Nejlevnější dodavatel nerecyklovaného betonu pak je externí betonárna č. 418 s cenou 3 064,8 Kč. Nejdražší z interních dodavatelů je betonárna č. 7 s cenou 4 675,48 Kč a celkově nejnepříznivější je betonárna č. 46 s hodnotou 6 769,6 Kč, která vykazuje výrazný lokální extrém ve výsledkovém grafu, způsobený cenou dopravy v hodnotě cca 4 092 Kč, počítanou v Kč/km na vzdálenost 46,5 km.

**Prvky č. 53 až 55**, ŽB základové desky 1.PP a 1.NP o objemech 191,10 m<sup>3</sup>, 172,64 m<sup>3</sup> a 8,45 m<sup>3</sup>, vykazují signifikantní benefit pro interní betonárny, umístěné na 2. až 13. místě, ačkoliv optimální byla vygenerována **externí betonárna č. 38** z 30,8 km vzdálených Ivančic. V případě, že by byl kladen důraz na environmentální benefit dodavatele, byl by cenový rozdíl 2 212,92 Kč, což v přepočtu činí rozdíl 119,94 Kč/m<sup>3</sup> (pro prvek č. 55). Nejdražší z dodavatelů je betonárna č. 184 s cenou 70 108,10 Kč, která vykazuje výrazný lokální extrém ve výsledkovém grafu. Je znatelný drobný skok v grafu mezi interními a externími dodavateli.

**Prvek č. 56**, ŽB základová patka o objemu 5,50 m<sup>3</sup>, vykazuje v rámci rozložení optimál-

ních dodavatelů rovnoměrné rozložení interních a externích dodavatelů, avšak interní dodavatelé RAC se umístili na prvních čtyřech pozicích. Nejvýhodnější je **interní betonárna č. 5 s optimální cenou 11 422,40 Kč**. Nejlevnější dodavatel nerecyklovaného betonu pak je externí betonárna č. 38 s cenou 12 229,00 Kč umístěna na 5. místě. Dále se ve velké míře vyskytují interní dodavatelé RAC s environmentálním kreditem. Nejdražší z interních dodavatelů je betonárna č. 7 s cenou 13 381,64 Kč a celkově nejnepříznivější je betonárna č. 184 s hodnotou 20 900,00 Kč, která vykazuje drobný lokální extrém ve výsledkovém grafu.

**Prvek č. 57**, ŽB základová patka o objemu 3,6 m<sup>3</sup>, vykazuje rovnoměrné rozložení interních a externích dodavatelů, avšak interní dodavatelé RAC se umístili na prvních šesti pozicích. Nejvýhodnější je **interní betonárna č. 5 s optimální cenou 7 521,06 Kč**. Nejlevnější dodavatel nerecyklovaného betonu pak je externí betonárna č. 418 s cenou 8 640,00 Kč umístěna na 7. místě. Dále se ve velké míře vyskytují interní dodavatelé RAC s environmentálním kreditem až do 22. pozice. Nejdražší z interních dodavatelů je betonárna č. 7 s cenou 9 480,03 Kč a celkově nejnepříznivější je betonárna č. 184 s hodnotou 13 680,00 Kč, která vykazuje drobný lokální extrém ve výsledkovém grafu.

**Prvky č. 58 až 63**, ŽB sloupy 400x400mm v 1.PP o objemech 0,632 m<sup>3</sup>, vykazují v rámci rozložení optimálních dodavatelů signifikantní benefit pro externí betonárny, umístěné na 2. a 3. a poté na 5. až 12. místě, ačkoliv optimální byla vygenerována **interní betonárna č. 5. s hodnotou 1 426,74 Kč** a betonárna 4. v pořadí je rovněž interním dodavatelem s hodnotou 1 556,04 Kč. Nejdražší z dodavatelů je betonárna č. 46 s cenou 5 413,12 Kč, která vykazuje výrazný lokální extrém ve výsledkovém grafu. Je zřejmý drobný lineární nárůst v grafu mezi interními a externími dodavateli, kdy interní dodavatelé disponují vysokými náklady na dopravu vzhledem k objemu prvků.

**Prvky č. 64 až 67**, ŽB sloupy 400x400mm s hlavicí 600x600mm v 1.NP, a **prvky č. 80 a 81**, totožné prvky ve 2.NP o objemech 0,734 m<sup>3</sup>, vykazují signifikantní benefit pro externí betonárny, umístěné na 2. a poté na 4. až 10. místě, ačkoliv optimální byla vygenerována **interní betonárna č. 5. s hodnotou 1 636,18 Kč** a betonárna 3. v pořadí je rovněž interním dodavatelem s číslem 3 a s hodnotou 1 765,48 Kč. Nejdražší z dodavatelů je betonárna č. 46 s cenou 5 633,44 Kč, která vykazuje výrazný lokální extrém ve výsledkovém grafu. Je zřejmý drobný lineární nárůst v grafu mezi interními a externími dodavateli, kdy interní dodavatelé disponují vysokými náklady na dopravu vzhledem k objemu prvků.



**Prvky č. 68 až 79**, ŽB sloupy 400x400mm v 1.NP, **prvky č. 82 až 99**, ŽB sloupy 400x400mm ve 2.NP, všechny o objemech 0,672 m<sup>3</sup> (resp. 0,632 m<sup>3</sup> pro prvky č. 95 a 96), vykazují v rámci rozložení optimálních dodavatelů signifikantní benefit pro externí betonárny, umístěné na 2. až 3. místě a poté na 4. až 10. místě, ačkoliv optimální byla vygenerována **interní betonárna č. 5. s hodnotou 1 508,87 Kč** a betonárna 3. v pořadí je rovněž interním dodavatelem s číslem 3 a s hodnotou 1 638,17 Kč. Nejdražší z dodavatelů je betonárna č. 46 s cenou 5 499,52 Kč, která vykazuje výrazný lokální extrém ve výsledkovém grafu. Je znatelný drobný lineární nárůst v grafu mezi interními a externími dodavateli, kdy interní dodavatelé disponují vysokými náklady na dopravu vzhledem k objemu prvků.

**Prvky č. 100 až 107**, ŽB sloupy 400x400mm ve 3.NP o objemech 0,488 m<sup>3</sup>, 0,528 m<sup>3</sup> a 0,396 m<sup>3</sup> vykazují obdobné rozložení optimálních dodavatelů, jako prvky v předchozí kapitole. V rámci rozložení optimálních dodavatelů je zde signifikantní benefit pro externí betonárny, ačkoliv optimální byla vygenerována **interní betonárna č. 5. s hodnotou 1 131,06 Kč, resp. 1 213,19 Kč a 942,15 Kč**. Nejdražší z dodavatelů je betonárna č. 46 s cenou 5 102,08,52 Kč, resp. 5 188,48 Kč a 4 903,36 Kč, která vykazuje výrazný lokální extrém ve výsledkovém grafu. Je znatelný drobný lineární nárůst v grafu mezi interními a externími dodavateli, kdy interní dodavatelé disponují vysokými náklady na dopravu vzhledem k objemu prvků.

**Prvky č. 108 až 111**, obvodová stěna dojezdu výtahu o objemech do 1 m<sup>3</sup>, vykazuje v rámci rozložení optimálních dodavatelů signifikantní benefit pro externí betonárny, ačkoliv optimální byla vygenerována opět **interní betonárna č. 5**. Interní betonárna je rovněž na 3. resp. 11. místě. Nejdražší z dodavatelů je betonárna č. 46, která vykazuje výrazný lokální extrém ve výsledkovém grafu. Je znatelný drobný lineární nárůst v grafu mezi interními a externími dodavateli, kdy interní dodavatelé disponují vysokými náklady na dopravu vzhledem k objemu prvků.

**Prvky č. 112 až 115**, stěny vnitřní o objemech do 10 m<sup>3</sup>, vykazují v rámci rozložení optimálních dodavatelů signifikantní benefit pro interní betonárny. Ti se umístili na prvních pozicích s občasným umístěním betonáren externích. První čtyři optimální pozice jsou vždy zajištěny dodavateli interními.

**Prvky č. 116 až 118**, stěna obvodová S4, vykazuje optimum bez typických tendencí k externím či interním dodavatelům a výsledek je závislý na objemu prvku. U prvků o menším ob-

jemu je koncentrace interních dodavatelů upozaděna, avšak na první pozici **se interní betonárna č. 5** umístil pro prvek č. 117. Prvky 116 a 118 vykazují podobnou tendenci s optimálními interními dodavateli na počátečních pozicích.

**Prvky č. 119 až 125**, obvodové stěny S1, v rámci rozložení optimálních dodavatelů vykazují signifikantní benefit pro externí betonárny s postupným nárůstem ceny interních dodavatelů v závěru grafu. Optimální dodavatel je externí **betonárna č. 418**. Výjimkou je prvek č. 124, který vyazuje rovnoměrné rozložení dodavatelů s interními betonárnami na prvních třech pozicích – **interní betonárna č. 5, 3 a 4**.

**Prvky č. 126 až 128**, obvodové a vnitřní stěny S28 a S51 o objemech cca 4,0 m<sup>3</sup>, vykazují v rámci rozložení optimálních dodavatelů signifikantní benefit pro **interní betonárny č. 5, 3 a 4**. Ti se umístili na prvních šesti pozicích a dále s občasným umístěním betonáren externích rovněž dominují interní.

**Prvky č. 129 až 132**, podzemní stěny S32, vykazují v rámci rozložení optimálních dodavatelů signifikantní benefit pro interní betonárny, ačkoliv optimální byla vygenerována **externí betonárna č. 38**. Nejdražší z dodavatelů je betonárna č. 184, která vyazuje výrazný lokální extrém na konci výsledkového grafu. Je ztelný jasný lineární nárůst v grafu napříč interními a externími dodavateli.

Od **prvků č. 133 dále** nebyly vypořovány žádné zobecnitelné tendence výsledkových grafů, které by práci obohataly. Hromadně však u téměř všech prvků bylo vypořováno, že pro menší objemy prvků jsou ekonomicky příznivější externí dodavatelé betonů. Proto bylo přistoupeno k testovacímu modelu, který obsahuje prvky po objemovém kroku k docílení stanovení obecnějších dílčích závěrů chování modelu, aplikovaného na případové studii.

Podrobné výsledkové grafy jsou uvedeny v elektronické části příloh práce v kapitole 14.9.

### **Testovací ověřovací model s objemy prvků po krocích**

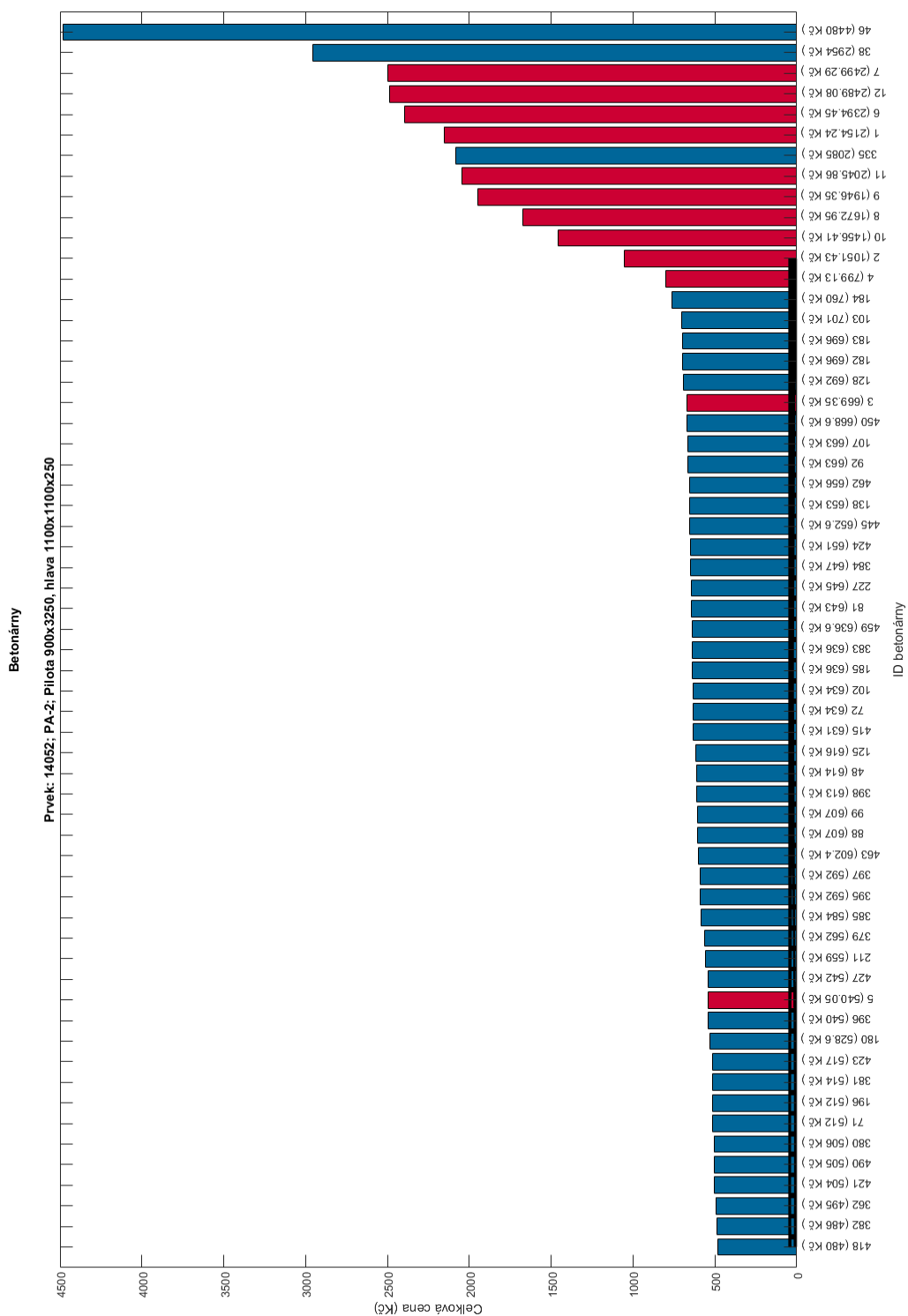
Tento ověřovací model obsahuje prvky po objemovém kroku 0,2 m<sup>3</sup>. Počet prvků byl zachován totožný s počtem prvků případové studie, tedy 394 ks. Počet modelovaných betonáren byl také zachován na počtu 11 interních a 79 externích. Umístění staveniště bylo rovněž zachováno. Ověřovací model tímto postihuje objemy od 0,2 m<sup>3</sup> do 78,8 m<sup>3</sup>. Veškeré prvky byly uvažovány s betonem C25/30 XC2.

Výsledkový graf pro počáteční **prvek č. 1** s objemem 0,2 m<sup>3</sup> vyazuje z počátku benefit pro externí dodavatele, konkrétně pro betonárnu č. 418 viz Obr. 40, následovanou lineárně

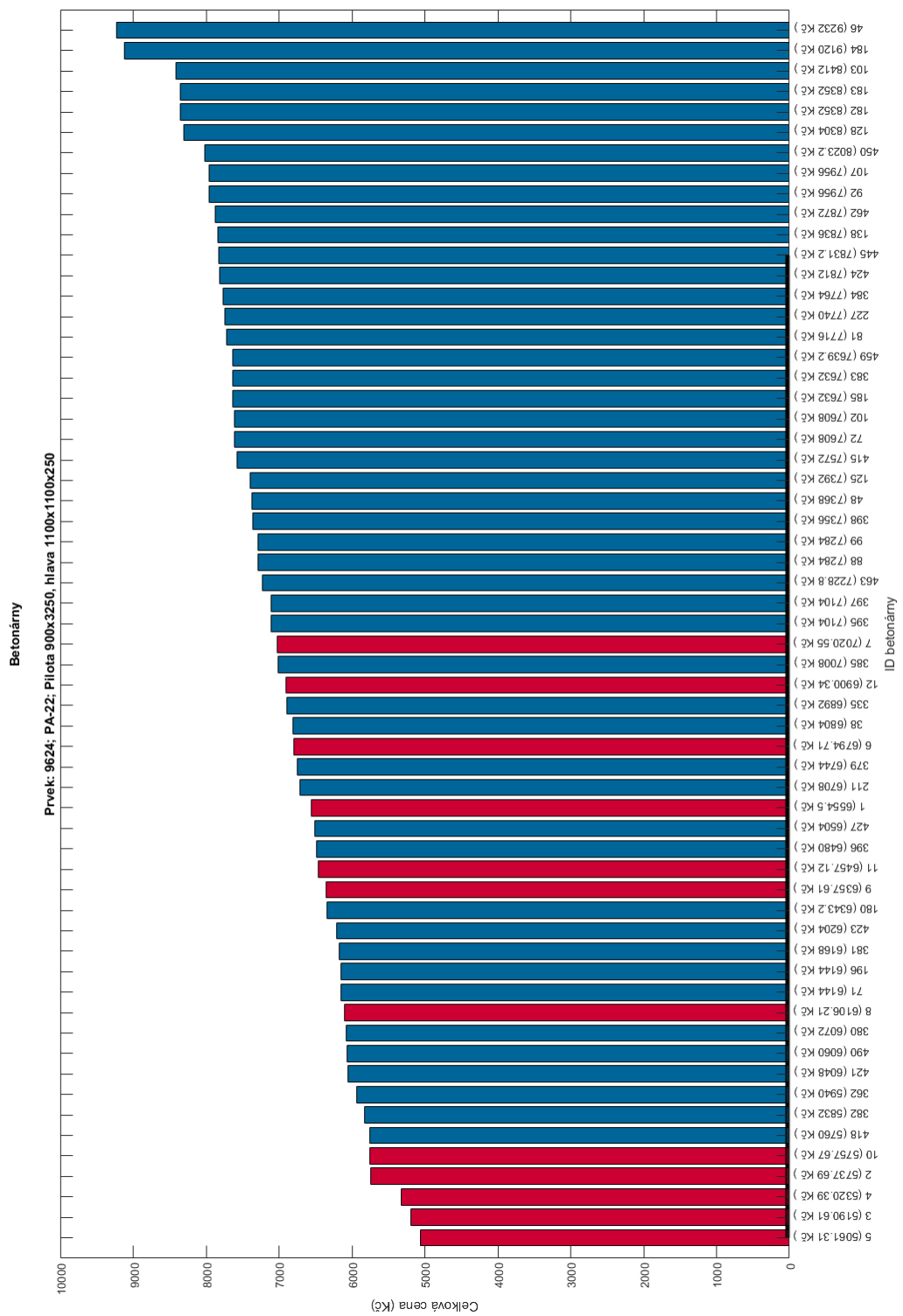
vzrůstající cenou s dodavateli interními. Jasný zlom v linearitě je mezi externími a interními dodavateli. Na posledních dvou pozicích je pozorovatelný lokální extrém, tvořen externí betonárnou č. 46.

Až od **prvku č. 12** o objemu  $2,4 \text{ m}^3$  se interní betonárny začínají umisťovat v první polovině optimálních dodavatelů viz Obr. 41. Tento jev je ukončen u prvku č. 56 o objemu  $6,2 \text{ m}^3$ , kdy podstatná část interních betonáren obsadila první čtyři optimální pozice, následované externí betonárnou č. 38 a následně zbytkem interních betonáren až do 13. pozice. Nárůst cen v grafu je plynule lineární, jak pro interní, tak pro externí dodavatele betonu a končí betonárnou č. 184 s drobným lokálním extrémem v závěru grafu.

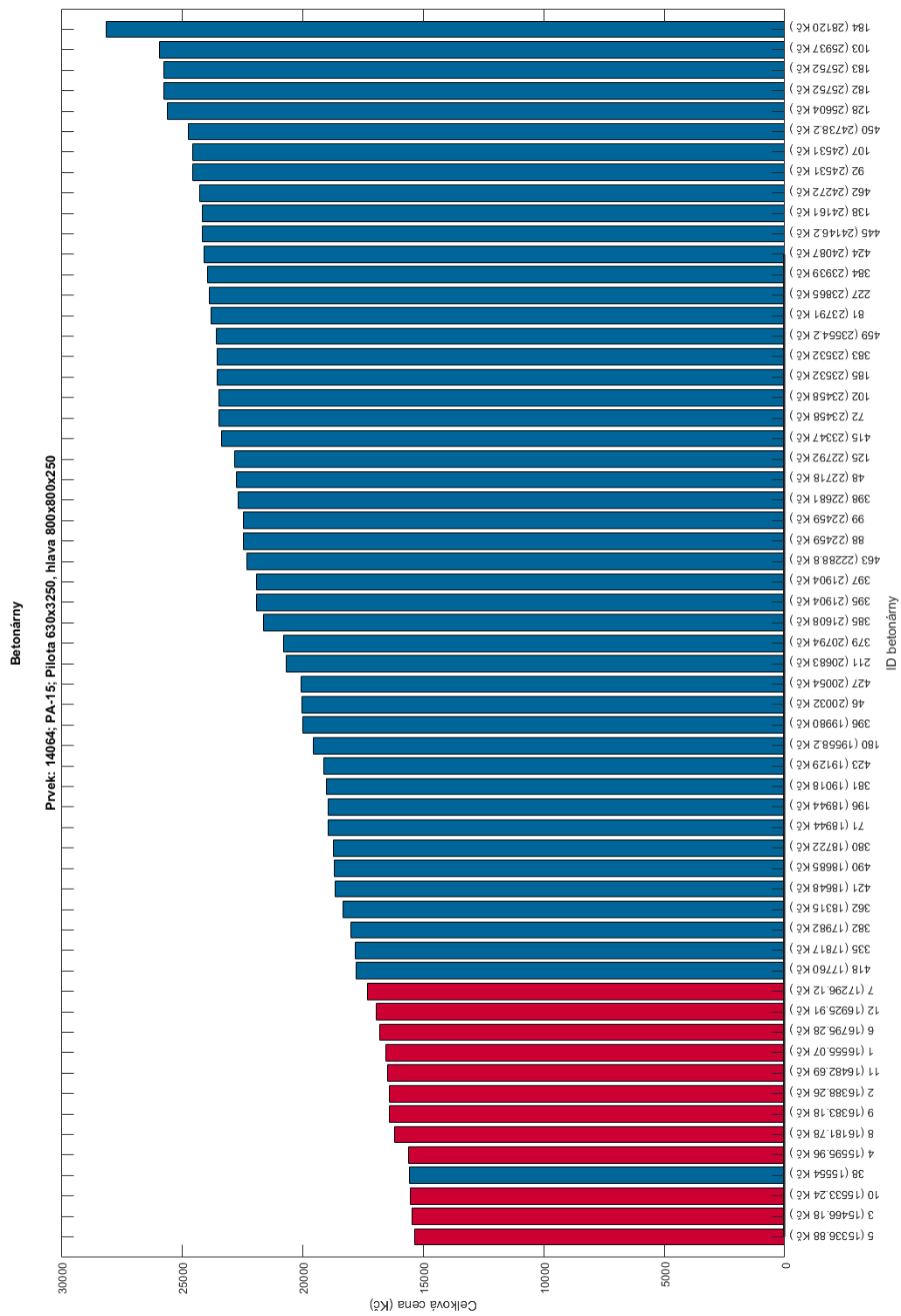
Od **prvku č. 37** o objemu  $7,4 \text{ m}^3$  se ve výsledkovém grafu objevuje posun umístění externí betonárny č. 38 směrem k první pozici viz Obr. 42. Tento jev je ustálen u **prvku č. 41** o objemu  $8,2 \text{ m}^3$  viz Obr. 43. Následující výsledkové grafy prvků už pouze reflektují vypočtenou cenovou úroveň dle použitého objemu prvku a lineárně vzrůstají. Podrobné výsledkové grafy jsou uvedeny v elektronické části příloh práce v kapitoly 14.9.



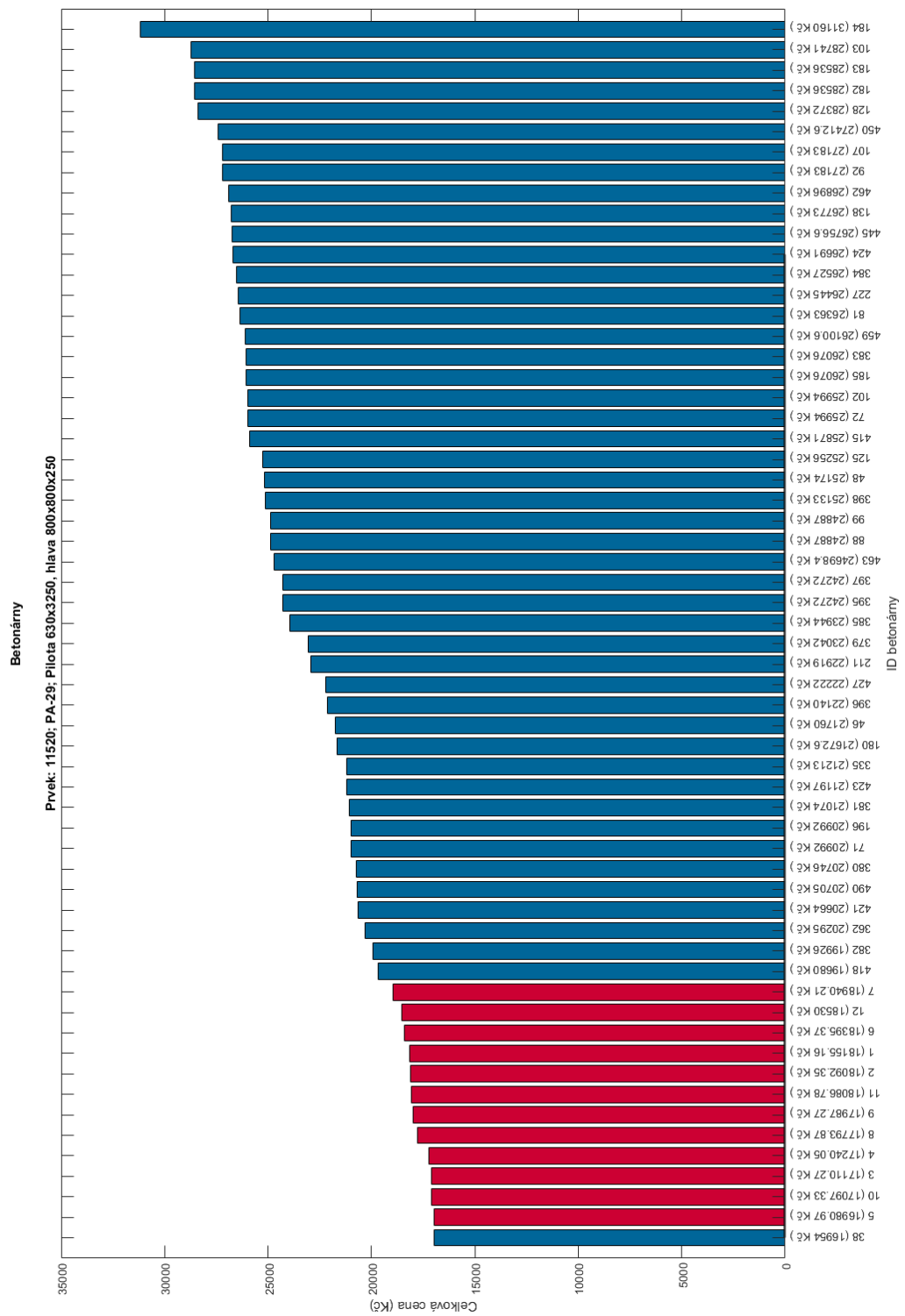
**Obr. 40 Výsledkový graf – prvek č. 1 o objemu 0,2 m<sup>3</sup> – optimální řešení interních a externích dodavatelů betonu**



**Obr. 41 Výsledkový graf – prvek č. 12 o objemu 2,4 m<sup>3</sup> – optimální řešení interních a externích dodavatelů betonu**



**Obr. 42 Výsledkový graf – prvek č. 37 o objemu 7,4 m<sup>3</sup> – optimální řešení interních a externích dodavatelů betonu**



**Obr. 43 Výsledkový graf – prvek č. 41 o objemu 8,2 m<sup>3</sup> – optimální řešení interních a externích dodavatelů betonu**





## 6. 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 a optimalizačních technik. V rámci práce byly provedeny kroky dosažení stanovených cílů a ucelený systém poznatků byl strukturován do jednotné ucelené formy, kterou podporují odborné a vědecké publikace. Následující kapitoly shrnují dosažené výsledky a volně diskutují poznatky.

### 6.1. ZÁVĚRY K VÝSLEDKŮM MATERIÁLOVÉHO VÝZKUMU

Experimentální program materiálového výzkumu byl proveden za účelem odhalení vhodnosti recyklovaného kameniva z prefabrikovaných panelových budov dekonstruovaných v pokročilé době své životnosti, za účelem aplikovat je do konstrukčního betonu. Pro tento účel bylo nutno provést sérii normových zkoušek. Zkušební vzorky prvního typu RCA byly získány z lehkých vnějších fasádních stěnových panelů s podílem keramzitu, zatímco vzorky druhého typu RCA byly smíchány z nosných vnitřních stěnových panelů se stropními panely. Proto se charakteristiky různých typů kameniv, které byly odvozeny od konkrétních skupin panelů, lišily. Materiálové složení panelů se lišilo podle použitého původního, tzv. matečního betonu, což v některých případech může představovat omezení pro novou výrobu recyklovaného betonu. Je potřeba vzít v úvahu některé normové požadavky, např. EN 206: 2013 + A1: 2016, která stanovuje potřebu použití takové pevnosti matečního betonu v tlaku, která je alespoň stejná nebo vyšší než cílová pevnost RAC. Zjištěnou dobrou vlastností byla čistota RCA, protože více než 90 hmotnostních procent u obou RCA bylo složeno ze ztvrdlé betonové kaše či malty. To však může být v tomto konkrétním případě důsledkem pečlivé dekonstrukce budovy a pečlivém odseparování nežádoucích příměsí jiných materiálů. V některých jiných případech mohou být již od výroby PC přítomny externí materiály (např. sklo, dřevo atd.) nebo škodlivé látky (např. azbest). Takový obsah obvykle nelze odstranit ani přehlédnout, a proto je třeba jej řešit případ od případu.

Ve srovnání s přírodním kamenivem (NA) bylo zjištěno, že RCA-01 má vyšší nasákavost vodou (většinou pro frakci 0–4 mm) a také vyšší obsah jemných částic. To bylo způsobeno

přítomností lehkého materiálu (Keramzit), který je porézni a má zrna s velkou povrchovou plochou. Tyto nepříznivé vlastnosti lze eliminovat, např. chemickým nebo karbonatickým zpracováním (Kazemian et al. 2019; Lu et al. 2019), i když ekonomický smysl provedení takového kroku může být sporný. Hodnoty získané pro abrazi Los Angeles pro RCA-01 a RCA-02 odpovídají třídám LA50, respektive LA30 a splňují požadované normové hodnoty 40 % a 50 % pro NA dle EN 1097-2 (Český normalizační institut 2010). Objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně byla identifikována jako rozhodující faktor vzhledem k vyšší nasákavosti a inklinuje k narušení výsledků. Bylo zjištěno, že hodnoty ODD jsou vyšší než  $2\,000\text{ kg/m}^3$ , čímž jsou splněny požadavky na konvenční výrobu konstrukčního betonu dle EN 206: 2013 + A1: 2016. Tato norma umožňuje možný rozsah hodnot pro RCA od  $1\,500\text{ kg/m}^3$  až  $2\,000\text{ kg/m}^3$ .

Testované zkušební směsi RAC byly připraveny z hrubého i jemného kameniva RCA, což vedlo k riziku vyšší nasákavosti vodou a souvisejících potenciálních problémů, jako je rychlá absorpce směsi vody, potřebné k udržení zpracovatelnosti. Naopak pozitivních vlastností RAC bylo dosaženo použitím standardního množství cementu a přidaného množství vody do směsi pro ovlhčení zrn kameniva. Navzdory skutečnosti, že evropská norma harmonizovaná pro české prostředí EN 206: 2013 + A1: 2016 předepisuje maximálně 30 % náhradu za expoziční třídu XC2 v betonech s hrubými agregáty RC90, současný výzkum vědomě a cíleně překročil uvedenou hranici na hodnotu 40 % hmotnostní substituce. Poměr obsahu vody a cementu ( $w/c$ ) v testovaných směsích RAC byly navrženy tak, aby vyhovovaly minimálním hodnotám doporučeným normou EN 206: 2013 + A1: 2016. Poté, během procesu míchání, byl proveden test propadu normovanými síty a do směsi byla aplikována další přidaná voda, aby se dosáhlo cílového stupně konzistence směsi S3 a rovněž aby se dosáhlo odpovídající zpracovatelnosti. Konečný poměr  $w/c$  byl 0,8 a hodnoty propadů normované řady sít vyšly přibližně uprostřed rozsahu doporučeného normou EN 12350-2 (Český normalizační institut 2020).

Ve většině případů testů na vzorcích dosáhl jeden z klíčových parametrů RAC, tj. pevnost betonu v tlaku na krychlích, mírně nižších hodnot, než jaké jsou uvedeny v příslušné normě. Počáteční pevnosti v tlaku jak u RAC-01-40, tak u RAC-02-40 bylo zjištěno, že po 3 dnech je pevnost v tlaku na krychlích vyšší ve srovnání s přidruženými hodnotami komparačních vzorků z přírodního kameniva (NAC). Kromě toho bylo zjištěno, že 7denní pevnost v tlaku je u NAC o něco vyšší než u vzorků RAC. Nárůst pevnosti mezi 3. a 7. dnem byl u vzorků RAC-01-40 5,0 % (tj. z 88,6 % na 93,7 % cílové hodnoty pevnosti). Podobné zvýšení pevnosti v tlaku bylo

zjištěno u vzorků RAC-02-40, kde byl získán přírůstek 8,7 % (tj. z 82,1 % na 90,8 % cílové hodnoty). Po 28 dnech dosáhl NAC vyšších hodnot ve srovnání s očekávanými hodnotami uvedenými v normě, na rozdíl od RAC, u kterého bylo zjištěno, že tyto hodnoty jsou o jednu pevnostní třídu nižší než cílové. Konečná pevnost v tlaku po 28 dnech dosáhla 96,9 % cílových hodnot pro RAC-01-40, respektive 90,0 % cílových hodnot pro RAC-02-40. Dále bylo zjištěno se, že hodnoty pevnosti tlaku za ohybu jsou v mezích konvenčního betonu. Materiál z lehkých betonových panelů měl negativní vliv na pevnost v tlaku RAC, která byla téměř o jednu třídu nižší než cílová hodnota.

Jak je uvedeno v kapitolách 4.1 a 5.1, předložený metodický rámec výzkumu byl prakticky aplikován na podporu lepšího opětovného použití betonových materiálů získaných z dekonstruovaných prefabrikovaných panelových budov. V tomto smyslu výsledky provedených testů odhalují technickou vhodnost studovaných zdrojů (tj. RCA-01 a RCA-02) pro výrobu konstrukčního betonu středních pevnostních tříd (tj. C25/30). Naměřené 28denní pevnosti většiny vzorků z podílem recyklovaného kameniva téměř dosáhly svých cílových hodnot, a lze je tedy definovat jako srovnatelné s hodnotami betonů z kameniva přírodního. Je rovněž třeba zdůraznit, že předložený výzkumný rámec lze s menšími úpravami použít i na jiné typy budov. Vzhledem k širokému výskytu panelových budov v zemích bývalého východního bloku v Evropě však lze navržený rámec definovat jako univerzálně použitelný pro široké spektrum konstrukčních soustav panelových budov z prefabrikovaného betonu. Vybrané vzorky betonu byly podrobeny rutinnímu testování v souladu s výše uvedenými evropskými normami, platnými rovněž v ČR. Přesto však předložený rámec může vyžadovat drobné úpravy, aby splňoval některé konkrétní místní zákony a podmínky a normové požadavky.

## **6.2. ZÁVĚRY K OPTIMALIZAČNÍM VÝSLEDKŮM NA PŘÍPADOVÉ STUDII**

Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že různé prvky vykazují různé výsledky. Je zde možné vypořádat podobnost výsledků, která je zpravidla dána objemem prvků. Podstatnou složkou ekonomiky je rovněž doprava čerstvé betonové směsi a její cena, která může u prvků malých objemů tvořit až polovinu celkové ceny dodávky transportbetonu. Vzdálenost betonárny od staveniště se neprokázala jako kriticky cenotvorná. Naopak objem prvku je významným 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>, což přibližně odpovídá objemu konvenčního autodomíhávače. Tento fakt umožňuje stanovit tezi, že recyklovaný beton může být ekonomicky smysluplný. Druhým, ve studii upozaděným aspektem je environmentální aspekt tohoto typu betonu. V rámci optimalizačního modelu je tento aspekt uchopen okrajově a sice tak, že míra substituce přírodního kameniva recyklátem je ekonomicky bonifikována rámci kalkulace jednotkových cen recyklovaných betonů. To je dáno odpočtem ceny konvenčního přírodního kameniva, a tím snížení ceny kameniva ve skladbě receptury. Takto se v uvažovaném modelu stává recyklovaný beton konkurenceschopným.

### **6.3. ZÁVĚRY Z ČÁSTI INFORMAČNÍHO MODELování BUDOV (BIM) V SOUVISLOSTI S PŘÍPADOVOU STUDIÍ**

V rámci řešení práce bylo nutno potýkat se s transferem dat, obsažených v informačním modelu budovy, která slouží jako podklad pro provedení optimalizačních výpočtů. V rámci práce byly vybrány konkrétní platformy. Pro zpracování informačního modelu budovy to byla platforma Autodesk Revit a pro optimalizační výpočty prostředí MATLAB. Přímé datové propojení těchto platform není dosud známo, a proto bylo v práci přistoupeno k provedení převádění dat prostřednictvím oteřeného formátu IFC a k následnému zpracování dat v tabulkovém editoru. Taková data pak bylo možné přečíst systémem MATLAB. Řešení, které bylo využito je částečně automatizované – generování z prostředí Autodesk Revit je prováděno automaticky dle zvolených parametrů přímo do tabulkového souboru a nedochází tak ke ztrátě informací či tvoření chyb v rámci manuálního přepisu dat, jak se při optimalizačních datových transferech může stát. Aplikované řešení sice není tzv. „na jedno kliknutí“, avšak poskytuje metodický návod a potenciál, jak takové řešení poskytnout v budoucím směřování problematiky pomocí programátorských možností. Celý převod dat je poměrně rychlý a vzhledem k použití tabulkového editoru i uživatelsky jednoduchý. Vytvoření a definování charakteristik, jako modelových parametrů pro zpětný import do informačního modelu budovy, dává informačním datům vhodnou strukturalizaci, jasnost a čistotu. Informace o betonech zpětně obohacují BIM model pro využití v dalších fázích životního cyklu budovy včetně jejího digitálního modelu.

## 6.4. VYHODNOCENÍ STANOVENÝCH HYPOTÉZ

Cíle práce byly stanoveny v kapitole 3.2 a obsahují **hlavní cíl vytvořit optimalizační metodiku**, reprezentovanou vývojovým diagramem, která je schopna podpořit rozhodovací proces výběru nejvhodnějšího postupu recyklace s důrazem na recepturu betonu a využití recyklovaného kameniva na základě zvolených kritérií a okrajových podmínek. **Dílčím cílem č. 1 bylo 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 hotovou betonovou směs od externího dodavatele, tedy chovat se jako kupující. **Dílčím cílem č. 2 bylo definovat vhodné charakteristiky recyklovaného betonu**, které bude možné následně implementovat do informační části digitálního modelu budovy pro účely dalšího využití těchto informací v celoživotním cyklu stavby.

Prostřednictvím teoreticky nabitých znalostí v rámci prezentovaných rešerší a v následné experimentální aplikované části bylo prokázáno, že **prezentovaný výzkum naplnil všechny výše uvedené cíle**.

V rámci závěru práce, kdy jsou známy již všechny dosažené výsledky, je rovněž možné provést vyhodnocení předem stanovených vědeckých hypotéz:

### Hypotéza č. 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

Kvalita recyklovaného betonu je závislá na množství použitého recyklovaného kameniva a na jeho kvalitě. Obecně lze konkludovat, že konstrukční beton středních pevností může obsahovat alespoň minimální množství RCA v souladu s lokálně příslušnými normovanými požadavky a příslušným ověřením. Deklarují to výsledky zkoušek z podrobených betonových testovacích vzorků. Velmi signifikantní roli pro dosažení dobré kvality nově zhotovovaného recyklovaného betonu hrají kvalitativní parametry matečního betonu a vhodný návrh betonové směsi.

### Hypotéza č. 1 byla jednoznačně vyvrácena.

### Hypotéza č. 2

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

## **Odpověď na vědeckou hypotézu č. 2**

Při využití BIM modelu jakožto univerzálního instrumentu pro zachování informací geometrických i negeometrických, je možné jednoduše tato data z modelu extrahovat a modifikovat, a poté podrobit optimalizační analýze a výpočtu. To lze provést i s tištěnými daty, nebo s neuspořádanými digitálními daty, avšak velmi obtížně a s nasazením velkého časového vyřízení. Využití kombinace optimalizačních technik a rychlých vstupních dat, získaných prostřednictvím exportu z prostředí BIM ve vhodném datovém formátu, poskytuje možnost rychle zpracovat analýzy různého charakteru s možností většího množství variantních řešení. Tento postup byl aplikován a demonstrován na případové studii v prezentované práci. Efektivita prezentovaného algoritmu spočívá v opakovaném vyhodnocování suboptimálních variant, které by při ručním či intuitivním vyhodnocení byly velmi obtížně a zdlouhavě zjistitelné.

**Hypotéza č. 2 byla jednoznačně potvrzena.**

## 6.5. PŘÍNOS PRÁCE PRO PRAXI

Tato práce se zabývá vhodností využití recyklovaného kameniva, pocházejícího z prefabrikovaných panelových budov, dekonstruovaných po uplynutí životnosti a sice při aplikacích do konstrukčního betonu. Výsledky experimentálního výzkumu odhalily technickou vhodnost studovaných zdrojů RCA pro výrobu středně pevných konstrukčních recyklovaných betonů. V práci studované RCA pro využití v RAC, byly získány z prefabrikovaných výškových panelových budov, které jsou typické pro bývalé země východního bloku v Evropě. Z hlediska udržitelného přijetí recyklace ve vztahu k současným cílům Evropské unie pro dosažení oběhového hospodářství a cirkulární ekonomiky, nejsou **prefabrikované betonové panelové budovy** v dosud publikované literatuře adekvátně řešeny, přestože se jedná o **zásadní problém velké části Evropy** a možná ještě širší oblasti. Mezi odbornou komunitou existuje také široce rozšířený předsudek, založený na intuici, že prefabrikované panely z těchto budov jsou nevhodné jako zdroj materiálu pro konstrukční recyklované betony. Příspěvek této práce spočívá rovněž ve faktu, že toto tvrzení zpochybňuje a zkoumá **možnosti racionální recyklace tohoto typu budov konvenčními procesy a výrobními prostředky** (tj. mechanizace, vybavení, nástroje atd.), jakož i přispění k čistší výrobě nové betonové konstrukce. Z výše uvedeného 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) **použitelné 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). V tomto konkrétním případě to byl lehký obvodový fasádní panel, který vykazoval větší pórovitost, a proto měl také vyšší absorpci vody, nižší objemovou hmotnost a odolnost proti poškození ve srovnání s nosnými panely vnitřních stěn, které byly vyrobeny z kvalitnějšího matečního betonu.

- **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**.
- V této práci byl použito **až 40 % substituce NA pomocí RCA v betonových směsích**, u nichž bylo shledáno, že jsou vhodné pro začlenění do výroby RAC pro dosažení čistší produkce s redukcí dobývání přírodních zdrojů.

Na základě výsledků tohoto výzkumu je možné běžné aplikace RCA z prefabrikovaných panelů, tj. použití při výrobě podkladních vrstev nebo jako prostředek pro výrobu betonů pro nenosné betonové prvky, nyní rozšířit o alternativu s větší přidanou hodnotou, tj. použití v nosných středně pevných konstrukčních recyklovaných betonech RAC. Na závěr této práce je nutné zdůraznit, že současná práce byla provedena na omezeném počtu typů prefabrikovaných panelů, a proto je v této oblasti nutný a vhodný další výzkum, vzhledem k blížícímu se původně predikovanému konci životnosti panelových budov.



## 6.6. PŘÍNOSY PRO VĚDNÍ OBORY A DOPORUČENÍ

Práce uchopila několik vědeckých disciplín, které byly propojeny v jeden kompaktní celek s názornou demonstrací benefitů na případové studii. Hlavním přínosem práce je prokázání vhodnosti multidimenzionality prezentovaného přístupu.

**Vědní obor materiálového inženýrství** byl v práci pojat jako experimentální testování dle exaktních, normově daných zkoušek. Práce poskytuje nové výsledky laboratorního testování pro velmi specifický druh materiálu, který byl dosud testován jen velmi omezeně. Jednalo se kamenivo z betonu prefabrikované panelové budovy po skončení její životnosti. Práce rovněž představuje nové receptury betonových směsí pro výrobu recyklovaného betonu a prezentuje jeho laboratorní ověření.

**Vědní oblast optimalizačních metod**, spadajícího pod vědní obor matematiky, práce rozvíjí na úrovni analytického vývoje nového algoritmu pro dodavatelsko-logistický scénář s hlavním ekonomickým kritériem a environmentálním sub-kritériem. Přínos pro oblast optimalizačních metod je v samotném algoritmu, který obsahuje několik individuálních prvků pro konkrétní řešení částí optimalizačního problému. Přínos spočívá v možnosti tyto prvky aplikovat v dalších optimalizačních modelech.

**Problematika informačního managementu budov BIM** prozatím nebyla popsána jako vědecká disciplína, avšak v rámci kontextualizace s dalšími vědními oblastmi, řešenými v této i jiných pracích, je postavena minimálně do role formování nové vědní oblasti.

V rámci definování dalšího směřování oblasti optimalizačních metod, aplikovaných při logisticko-dodavatelském scénáři dodávky čerstvého betonu, byly definovány následující **východiska pro další evoluci algoritmu a hodnotné rozšíření optimalizačního modelu** v rámci budoucího výzkumu:

- rozšíření modelu o **dynamickou algoritmizaci** na základě aktuálních (real-time) dat o době přepravy dle dopravních informací,
- návaznost na **smluvní časový harmonogram výstavby** s cílem sdružovat prvky a následně členit požadavky na dodavatele betonu v členění staveních procesů na technologické zábery, etapy, objekty apod.,
- doplnění modelu o možnost definování a zohlednění **realizace pracovních a dilatačních spár** nebo technologických přestávek betonáže.

- návaznost na systémy **posuzování životního cyklu (LCA) budov** v kontextu s vyšší mírou využívání recyklovaných materiálů při výstavbě a propojení modelu s další aktuální entitou – **environmentálními aspekty výstavby**.

Nebylo by vhodné celoplošně generalizovat či paušálně vyžadovat užití recyklovaných betonů bez uvedení konkrétních konsekvencí. Z prezentovaných výsledků vyplývá, že **ekonomická výhodnost použití RAC je odlišná pro každý individuální prvek a rovněž pro každou stavbu** s ohledem na požadovaný typ konstrukčního betonu a objem prvku, umístění stavby s návazností na logisticko-dopravní scénář a další individuality. Rovněž množství 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** různých panelových konstrukčních soustav. Práce však **deklaruje, že využití digitálních dat z informačního modelu budovy** a jejich využití při **optimalizačních výpočtech**, může přispět k **efektivnějšímu a ekonomickému nakládání s přírodními i druhotnými zdroji**. Při rozhodovacích problémech s důrazem na environmentální aspekty výstavby pak může práce přispět k inicializaci propojení subsystémů výkonných optimalizačních metod, principů cirkulární ekonomiky a digitalizace stavebnictví v kompaktní a funkční systém pro celospolečenský prospěch.

## 7. LITERATURA A ZDROJE

Uvedená literatura a zdroje zahrnují i ty, uváděné v přílohách disertační práce.

ABADIE, J. a J. CARPENTIER, 1969. Generalization of the Wolfe reduced gradient method to the case of nonlinear constraints. In: R. FLETCHER, ed. *Optimization*. New York: Academic Press, s. 37–47.

ADJIMAN, C. S., I. P. ANDROULAKIS a C. A. FLOUDAS, 2000. Global optimization of mixed-integer nonlinear problems. *AIChE Journal* [online]. **46**(9), 1769–1797. ISSN 00011541. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/aic.690460908>

AGENTURA ČAS, 2021. *BIM Protokol* [online]. Dostupné z: [https://www.koncepcbim.cz/uploads/inq/files/BIM\\_protokol - Pravidla pro tvorbu%2C predani a uzivani informacniho modelu\\_Agentura CAS.pdf](https://www.koncepcbim.cz/uploads/inq/files/BIM_protokol_-_Pravidla_pro_tvorbu%2C_predani_a_uzivani_informacniho_modelu_Agentura_CAS.pdf)

AKANMU, Abiola, Oluwole OLATUNJI, Peter E.D. LOVE, Duy NGUYEN a Jane MATTHEWS, 2016. Auto-generated site layout: An integrated approach to real-time sensing of temporary facilities in infrastructure projects. *Structure and Infrastructure Engineering* [online]. 12(10). ISSN 17448980. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1110601>

ALAEJOS, Pilar, Marta Sánchez DE JUAN, Jorge RUEDA, Roberto DRUMMOND a Ignacio VALERO, 2013. Quality Assurance of Recycled Aggregates. In: *Progress of Recycling in the Built Environment: Final Report of the RILEM Technical Committee 217-PRE* [online]. Barcelona: RILEM. ISBN 978-94-007-4907-8. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4908-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4908-5_6)

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2007. *Aggregates for Concrete ACI Education Bulletin E1-07*. First Prin. Farmington Hills: American Concrete Institute, Committee E-701. ISBN 978-0-87031-248-9.

ANDREW, Robbie M., 2018. Global CO2 emissions from cement production, 1928-2017. *Earth System Science Data* [online]. 10, 195–217. ISSN 18663516. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/essd-10-2213-2018>

ARCH.DESIGN, s.r.o., 2011. Výzkumné centrum CEITEC, pokročilé materiály a technologie – TENDROVÁ PROJEKTOVÁ DOKUMENTACE –B SOUHRNNÁ TECHNICKÁ ZPRÁVA, kód dokumentu B-08-150-100.

ARCHITECTUUL, 2019. Wohnpark Alt-Erlaa [online] [vid. 2019-11-16]. Dostupné z: <http://architectuul.com/architecture/wohnpark-alt-erlaa>

ARCHITEKTURMUSEUM DER TU MÜNCHEN, 2019. Neue Heimat (1950 - 1986), a Social Democratic Utopia and it's Buildings [online]. 2019. München: Architekturmuseum der TU München. [vid. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.architekturmuseum.de/wp-content/uploads/2019/04/press-2019-neue-heimat-exhibition-flyer.pdf>

- ARSM, 2019. Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice [online] [vid. 2019-11-18]. Dostupné z: <http://www.arsm.cz/>
- ASBACH, Lasse, Ulrich DORNDORF a Erwin PESCH, 2009. Analysis, modeling and solution of the concrete delivery problem. *European Journal of Operational Research* [online]. 193(3), 820–835. ISSN 03772217. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.11.011>
- AUREA INVEST A.S., 2019. Beton server: Beton, vše z betonu a vše pro beton v ČR. BETON - BETONÁRNÝ V ČR [online]. Dostupné z: <http://www.betonserver.cz/beton-a-cerpani/beton-betonarny-v-cr>
- AUTODESK INC., 2020a. Revit [online] [vid. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/revit/subscribe?plc=RVT&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>
- AUTODESK INC., 2020b. Unique Id vs ElementId, which identifier to stored in the external database [online] [vid. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://forums.autodesk.com/t5/revit-api-forum/unique-id-vs-elementid-which-identifier-to-stored-in-the/m-p/4981920>
- AZHAR, Salman a Alex BEHRINGER, 2013. A BIM-based Approach for Communicating and Implementing a Construction Site Safety Plan. In: 49th ASC Annual International Conference Proceedings.
- BAGUI, Sikha a Richard EARP, 2020. The Enhanced Entity Relationship (EER) Model. In: *Database Design Using Entity-Relationship Diagrams* [online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781439861776-14>
- BAKER, Barrie M. a M. A. AYECHIEW, 2003. A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers and Operations Research* [online]. 30(5), 787–800. ISSN 03050548. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00051-5](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00051-5)
- BARTÁK, Kamil, 1997. Rekonstrukce v panelovém domě I – Bytová jádra, příčky. Profi & ho. Praha: Grada Publishing. ISBN 80-7169-423-1.
- BATTITI, Roberto a Mauro BRUNATO, 2017. The LION way. Machine Learning plus Intelligent Optimization. Version 3.0. Trento, Italy: LIONlab, University of Trento, Italy.
- BATTY, Michael, Andrew HUDSON-SMITH, Richard MILTON a Andrew CROOKS, 2010. Map mashups, Web 2.0 and the GIS revolution. *Annals of GIS* [online]. ISSN 19475683. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/19475681003700831>
- BAZJANAC, Vladimir, 2004. Virtual building environments (VBE) – applying information modeling to buildings. In: Attila DIKBAŞ a Raimar SCHERER, ed. *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction* [online]. London: Taylor & Francis Group, s. 41–48. ISBN 0415359384. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9780203023426.ch7>
- BEALE, E. M. L., 1977. Integer Programming. In: D. JACOBS, ed. *The State of the Art in Numerical Analysis*. London: Academic Press, s. 409–448.
- BECKETT, David a Tim BERNERS-LEE, 2008. Turtle - Terse RDF Triple Language. W3C Team Submission. 28(February 2014).
- BECKETT, David, Tim BERNERS-LEE, Eric PRUD'HOMMEAUX a Gavin CAROTHERS, 2011. RDF 1.1 Turtle - Terse RDF Triple Language.

- BEHERA, Monalisa, S. K. BHATTACHARYYA, A. K. MINOCHA, R. DEOLIYA a S. MAITI, 2014. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review [online]. 2014. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>
- BENEŠ, Jan, 2020. Na sídlišti Janov v Litvínově začala demolice prvního ze čtyř vybydlených panelových domů. Český rozhlas sever [online]. Dostupné z: <https://sever.rozhlas.cz/na-sidlisti-janov-v-litvinove-zacala-demolice-prvniho-ze-ctyr-vybydlenych-8201535>
- BISSCHOP, Johannes, 2006. AIMMS Optimization Modeling. Haarlem, Netherlands: Paragon Decision Technology B.V. ISBN 9781847539120.
- BOMMI, Sudheer, Krishna SOMARAJU, Krishnamurthy SENOU a Amit D. BARDE, 2014. Precast High-Rise Residential Projects in India: Design Implementation. The Master Builder [online]. 10, 106–114. Dostupné z: <https://www.masterbuilder.co.in/data/edata/Articles/October2014/106.pdf>
- BONAMI, Pierre, Lorenz T. BIEGLER, Andrew R. CONN, Gérard CORNUÉJOLS, Ignacio E. GROSSMANN, Carl D. LAIRD, Jon LEE, Andrea LODI, François MARGOT, Nicolas SAWAYA a Andreas WÄCHTER, 2008. An algorithmic framework for convex mixed integer nonlinear programs. Discrete Optimization [online]. 5(2), 186–204. ISSN 15725286. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.disopt.2006.10.011>
- BOOCH, Grady, James RUMBAUGH a Ivar JACOBSON, 2005. Unified Modeling Language User Guide, The (2Nd Edition).
- BOSCH-SIJTSEMA, Petra a Martine BUSER, 2017. Construction and demolition waste management on the building site: A literature review. In: Proceeding of the 33rd Annual ARCOM Conference. Cambridge: Association of Researchers in Construction Management, s. 269–278. ISBN 9780995546318.
- BOTKYRKA KOMMUN, 2019. Fittja [online] [vid. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.botkyrka.se/download/18.4a23abd9158495687c9db21e/1486981466818/Fittja140403.pdf>
- BOURHIS, Pierre, Juan L. REUTTER a Domagoj VRGOČ, 2020. JSON: Data model and query languages. Information Systems [online]. 89. ISSN 03064379. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.is.2019.101478>
- BRASSINGTON, Jamie, 2018. Heath Town's flat! – Tower blocks demolished to make way for new homes. The Express & Star [online]. Dostupné z: <https://www.expressandstar.com/news/local-hubs/wolverhampton/heath-town/2018/02/22/heath-towns-flat--tower-blocks-demolished-to-make-way-for-new-homes/>
- BRAVO, Miguel, Jorge DE BRITO, Jorge PONTES a Luís EVANGELISTA, 2015. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. Construction and Building Materials [online]. 77, 357–369. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103>
- BRE LTD., 1998. BRE Diggest 433: Recycled Aggregates. Garston, Watford: Building Research Establishment Ltd. ISBN 1-86081-255-4.

- BREMER ZENTRUM FÜR BAUKULTUR, 2019. Neue vahr. Architekturführer bremen [online] [vid. 2019-11-16]. Dostupné z: [http://www.architekturführer-bremen.de/n\\_anzeigen.php?id=174&big=7](http://www.architekturführer-bremen.de/n_anzeigen.php?id=174&big=7)
- BROOK, Anthony, David KENDRICK a Alexander MEERAUS, 1988. GAMS, a user's guide. ACM SIGNUM Newsletter [online]. ISSN 01635778. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/58859.58863>
- BUILDING CONTRACTORS SOCIETY OF JAPAN, 1978. Study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. 1978. B.m.: Committee on disposal and reuse of concrete construction waste.
- BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT LTD, 2019. BREEAM [online] [vid. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://www.breeam.com/>
- BUILDINGS DEPARTMENT, 2004. Code of Practice for demolition of buildings [online]. Honk Kong: Government of the Honk Kong, Buildings Department. ISBN P57350416E0. Dostupné z: [https://www.bd.gov.hk/doc/en/resources/codes-and-references/code-and-design-manuals/Demolition\\_e2004.pdf](https://www.bd.gov.hk/doc/en/resources/codes-and-references/code-and-design-manuals/Demolition_e2004.pdf)
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL LTD., 2020. IFC GUID [online] [vid. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://technical.buildingsmart.org/resources/ifcimplementationguidance/ifc-guid/>
- CAJZEK, R. a U. KLANŠEK, 2016. Mixed-integer nonlinear programming based optimal time scheduling of construction projects under nonconvex costs. Tehnicki Vjesnik. 23(1), 9–18.
- CAJZEK, Rok a Uroš KLANŠEK, 2019. Cost optimization of project schedules under constrained resources and alternative production processes by mixed-integer nonlinear programming. Engineering, Construction and Architectural Management [online]. ahead-of-p(ahead-of-print). ISSN 0969-9988. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/ecam-01-2019-0013>
- CBCSD, 2015. Vize 2050 České republiky z perspektivy České podnikatelské rady pro udržitelný rozvoj [online]. Dostupné z: [http://www.cbcsd.cz/wp-content/uploads/2015/06/Brozura\\_Česká-vize-2050\\_176x250\\_web\\_finální.pdf](http://www.cbcsd.cz/wp-content/uploads/2015/06/Brozura_Česká-vize-2050_176x250_web_finální.pdf)
- CCAA, 2008. Use of Recycled Aggregates in Construction. 2008. St. Leonards, NSW: Cement Concrete and Aggregates Australia.
- ČECHOVÁ, Pavla, 2015. Vztah typologie a konstrukční soustavy. B.m. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta architektury.
- CEMEX S.A.B. DE C.V., 2019. Betonárny, lomy a šterkovny CEMEX [online]. Dostupné z: <http://www.cemex.cz/mapa-prodejnich-mist.aspx>
- CEN, 2000a. EN 12390-7:2000 Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete. 2000. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN, 2000b. EN 197-1:2000 Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. 2000. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).

- CEN, 2002. EN 1008:2002 Mixing water for concrete - Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete. 2002. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN, 2004. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN, 2007. EN 12620:2002+A1:2007 Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction. 2007. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN, 2008. EN 12620:2002+A1:2008 Aggregates for concrete. 2008. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN, 2009a. EN 12350-2:2009 Testing fresh concrete – Part 2: Slump-test. 2009. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN, 2009b. EN 12350-6:2009 Testing fresh concrete – Part 6: Density. 2009. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN, 2009c. EN 12350-7:2009 Testing of fresh concrete – Part 7: Air content – Pressure methods. 2009. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN, 2009d. EN 12390-2:2009 testing hardened concrete – Part 2: Making and curing specimens for strength tests. 2009. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN, 2009e. EN 12390-3:2009 Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens. 2009. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN, 2009f. EN 12390-5:2009 Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens. 2009. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN, 2012. ČSN EN 933-1: 2012 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor. 2012.
- CEN, 2016. EN 206:2013+A1:2016 Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity. 2016. B.m.: European Committee for Standardization (CEN).
- ČESKOMORAVSKÝ BETON A. S., 2013. Příručka technologa BETON [online]. aktualizac. B.m.: Českomoravský beton a. s. Dostupné z: <https://www.betonuniversity.cz/stahnout-soubor?id=1025>
- ČESKOMORAVSKÝ BETON A. S., 2019. Betonárny - vyhledat provoz. Českomoravský beton – výroba betonu, doprava betonu a čerpání betonových směsí [online]. Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz/betonarny.html>
- ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1997. ČSN EN 933-2 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 2: Stanovení zrnitosti - Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů. 1997.
- ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2001. ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. 2001.

ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004. ČSN EN 1990 Eurokód - Zásady navrhování. 2004.

ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2008a. ČSN EN 12620: 2002+A1: 2008 Kamenivo do betonu. 2008.

ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2008b. ČSN EN 933-3 (2008) Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 3: Stanovení tvaru zrn – Index plochosti. 2008.

ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2008c. ČSN EN 933-4 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index. 2008.

ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2009a. 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. 2009.

ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2009b. ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost. 2009.

ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2009c. ČSN EN 12350-7 (731301) Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody. 2009.

ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2009d. ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. 2009.

ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2010. ČSN EN 1097-2: 2010 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 2: Metody pro stanovení odolnosti proti drcení. 2010.

ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2014. ČSN EN 1097-6: 2014 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. 2014.

ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2020. ČSN EN 12350-2:2020 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. 2020.

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD, 2019a. Produkce odpadů dle Nařízení č. 2150/2002/ES o statistice odpadů. Veřejná databáze, Statistiky, Životní prostředí [online] [vid. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/index.jsf?page=vystup-objekt&pvo=ZPR05&z=T&f=TABULKA&katalog=30842&str=v86#w=>

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD, 2019b. 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] [vid. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt&pvo=SPCR250&pvokc=&katalog=30725&z=T>

CHAKRADHARA, Rao M., Sriman Kumar BHATTACHARYYA a Sudhirkumar V. BARAI, 2019. 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., 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)



- CHENG, J. C.P. a S. S. KUMAR, 2014. A BIM based construction site layout planning framework considering actual travel paths. In: 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining, ISARC 2014 - Proceedings [online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.22260/isarc2014/0060>
- CHUNYU, Ren, 2012. Applying Genetic Algorithm for Capacitated Vehicle Routing Problem. In: 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012) [online]. s. 519–522. Dostupné z: <https://doi.org/10.2991/emeit.2012.107>
- CHUNYU, Ren, Li SHIWEI a Yue BING, 2009. Research on the application of improved hybrid genetic algorithm in open vehicle routing problem. In: 2nd International Symposium on Electronic Commerce and Security, ISECS 2009 [online]. s. 532–535. ISBN 9780769536439. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ISECS.2009.256>
- CIB, 2001. CIB report: Building deconstruction [online]. Dostupné z: <http://site.cibworld.nl/dl/publications/Pub278/05Deconstruction.pdf>
- CIB, 2016. Request for Detailed Proposals to hold a global conference on Sustainable Building Environment in 2020 (Global SBE20).
- CIB, 2017. Request for Expressions of Interest to hold a global conference on Sustainable Built Environment in 2020 ( Global SBE20 ) [online]. Dostupné z: [https://www.cibworld.nl/app/attach/NqHEXCGX/20156560/2be1bf3d68f2faef17346cf4b579989d/Request\\_for\\_EOI\\_for\\_SBE20\\_SBE\\_conference.pdf](https://www.cibworld.nl/app/attach/NqHEXCGX/20156560/2be1bf3d68f2faef17346cf4b579989d/Request_for_EOI_for_SBE20_SBE_conference.pdf)
- CITY OF STOCKHOM, 2019. Tensta Blue line. Visit Stockholm AB [online] [vid. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.visitstockholm.com/art-in-the-subway/tensta/>
- ČKAIT, SVAZ PODNIKATELŮ VE STAVEBNICTVÍ V ČR a STAVEBNÍ CENTRUM, 2000. 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. ISBN 80-86163-99-7.
- CLARKE, Kevin S., 2011. Extensible markup language (XML). In: Understanding Information Retrieval Systems: Management, Types, and Standards [online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781420090512-18>
- COELHO, A. a Jorge DE BRITO, 2013. 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, s. 231–266. ISBN 9780857096906. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9780857096906.2.210>
- COHEN, Caroline, Andrew FLYNN a John RYDER, 2003. Waste policy in wales: The case of construction and demolition. In: Sustainable Waste Management, Proceedings of the International Symposium [online]. Dundee: ICE Publishing, s. 95–104. ISBN 072773251X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1680/swm.32514.0011>
- COLLINS, Peter, 2004. Concrete: The vision of a new architecture: Second edition. Montreal, Quebec: McGill-Queen's University Press. ISBN 0773525645.

- COLORNI, A, M DORIGO a V MANIEZZO, 1991. Distributed Optimization by ant colonies. In: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life. s. 134–142.
- CORMEN, T H, C L LEISERSON, R L RIVEST a C STEIN, 2009. Introduction to Algorithms. Third Edit. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press. ISBN 978-0-262-03384-8.
- CUI, Zhihua a Xingjuan CAI, 2013. Artificial Plant Optimization Algorithm. In: Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation [online]. ISBN 9780124051638. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405163-8.00016-8>
- CZIESIELSKI, Erich, 2001. Extending the Life Span of Concrete Buildings in Germany/Middle Europe by Applying an External Thermal Insulation System. In: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XIII International Conference. Oak Ridge, USA: Oak Ridge National Laboratory, s. 1–6.
- CZYZYK, Joseph, Michael P. MESNIER a Jorge J. MORE, 1998. NEOS server. IEEE computational science & engineering [online]. 3, 68–75. ISSN 10709924. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/99.714603>
- DANTZIG, G. B. a J. H. RAMSER, 1959. The Truck Dispatching Problem. Management Science [online]. 6(1), 80–91. ISSN 0025-1909. Dostupné z: <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- DANTZIG, George. B., 1963. Linear Programming and Extensions. B.m.: Princeton university press. ISBN 9780691059136.
- DASGUPTA, Dipankar, 1999. Artificial Immune Systems and Their Applications [online]. B.m.: Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-3-642-64174-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59901-9>
- DE BRITO, Jorge; a Saikia NABAJYOTI, 2013. Concrete with Recycled Aggregates in International Codes. In: Recycled Aggregate in Concrete [online]. Green Ener. London: Springer London, s. 379–429. ISBN 978-1-4471-4539-4. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4540-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4540-0_7)
- DI MARIA, Andrea, Johan EYCKMANS a Karel VAN ACKER, 2018. Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. Waste Management [online]. 75, 3–21. ISSN 18792456. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.028>
- DOČKAL, Karel, 2005. Technologie staveb I - Technologie provádění betonových a železobetonových konstrukcí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- DODDS, Wayne J., Chris I. GOODIER, Simon A. AUSTIN, Christian CHRISTODOULOU, D. DUNNE a E. WINGROVE, 2017. The effect of coarse crushed concrete aggregate on the durability of structural concrete. In: 1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future (CoMS 2017), Zadar, Croatia, 19-21st April. Zadar: University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, s. 1–12. ISBN 978-953-8168-04-8.
- EASTMAN, Charles, 1975. The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design. Journal of the American Institute of Architects. 3, 46–50.

EASTMAN a Charles M., 2011. BIM Handbook : A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. B.m.: John Wiley & Sons Inc. ISBN 9780470541371.

EEA, 2018. EEA Report No 19/2018, Environmental indicator report 2018 In support to the monitoring of the Seventh Environment Action Programme [online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.2800/180334>

EL-RAYES, Khaled a Osama MOSELHI, 2001. Optimizing Resource Utilization for Repetitive Construction Projects. Journal of Construction Engineering and Management [online]. 127(1), 18–27. ISSN 0733-9364. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2001\)127:1\(18\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2001)127:1(18))

ELLISON, E. F D a Gautam MITRA, 1982. UIMP: User Interface for Mathematical Programming. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS) [online]. ISSN 15577295. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/356004.356005>

EPA, 2019. 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]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

EUROPEAN COMMISSION, 2007. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on the Interpretative Communication on waste and by-products.

EUROPEAN COMMISSION, 2011. 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>

EUROPEAN COMMISSION, 2015. Communication from the commission to the european parliament, the council, te european economic and social committee and the committee of the regions, Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy [online]. Dostupné z: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF)

EUROPEAN COMMISSION, 2016a. Communication from the commission to the european parliament, the council, te european economic and social committee and the committee of the regions, Key European action supporting the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals.

EUROPEAN COMMISSION, 2016b. Communication from the commission to the european parliament, the council, te european economic and social committee and the committee of the regions, Next steps for a sustainable European future [online]. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/europeaid/sites/devco/files/communication-next-steps-sustainable-europe-20161122\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/europeaid/sites/devco/files/communication-next-steps-sustainable-europe-20161122_en.pdf)

EUROPEAN COMMISSION, 2016c. EU Construction & Demolition Waste Management Protocol [online]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/attachments/1/translations/en/renditions/native>

- EUROPEAN COMMISSION, 2018a. EU Construction and Demolition Waste Protocol and Guidelines, Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs.
- EUROPEAN COMMISSION, 2018b. EUGRIS: portal for soil and water management in Europe. Glossary of Terms [online] [vid. 2019-11-16]. Dostupné z: <http://www.eugris.info/glossary.asp>
- EUROPEAN COMMISSION, 2018c. Guidelines for the waste audits before demolition and renovation works of buildings.
- EUROPEAN COMMISSION, 2018d. Raw Materials Scoreboard 2018 [online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.2873/13314>
- EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL, 2008. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives (Waste framework. 2008.
- EUROSTAT, 2019. Generation of waste by economic activity, Classification of Economic Activities NACE Rev. 2, Construction. Waste statistics [online] [vid. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00106/default/table?lang=en>
- EUSUFF, Muzaffar M. a Kevin E. LANSEY, 2003. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management* [online]. 129(3). ISSN 07339496. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:3\(210\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:3(210))
- FARIA, J. M., C. A. SILVA, J. M.C. SOUSA, M. SURICO a U. KAYMAK, 2006. Distributed optimization using Ant Colony optimization in a concrete delivery supply Chain. In: 2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2006. s. 73–80. ISBN 0780394879.
- FENG, Chung-Wei, Liang LIU a Scott A. BURNS, 1997. Using Genetic Algorithms to Solve Construction Time-Cost Trade-Off Problems. *Journal of Computing in Civil Engineering* [online]. ISSN 0887-3801. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3801\(1997\)11:3\(184\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3801(1997)11:3(184))
- FLOOD, Merrill M., 1956. The Traveling-Salesman Problem. *Operations Research* [online]. 4(1), 61–75. ISSN 0030-364X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1287/opre.4.1.61>
- FONG, Simon, Suash DEB a Xin She YANG, 2015. A heuristic optimization method inspired by wolf preying behavior. *Neural Computing and Applications* [online]. 26(7), 1725–1738. ISSN 09410643. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00521-015-1836-9>
- FOURER, Robert, David M. GAY a Brian W. KERNIGHAN, 1990. A Modeling Language for Mathematical Programming. *Management Science* [online]. 36(5), 519–554. ISSN 0025-1909. Dostupné z: <https://doi.org/10.1287/mnsc.36.5.519>
- FULLER, William B a Sanford E THOMPSON, 1907. The Laws of Proportioning Concrete. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 59(2), 67–143. ISSN 0066-0604.

- GALIC, M., Z. DOLACEK-ALDUK, A. CEROVECKI, D. GLICK a M. ABRAMOVIC, 2015. BIM in planning deconstruction projects. In: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction - Proceedings of the 10th European Conference on Product and Process Modelling, ECPPM 2014 [online]. s. 81–85. ISBN 9781138027107. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/b17396-17>
- GALIĆ, Mario a Ivan KRAUS, 2016. Simulation Model for Scenario Optimization of the Ready-Mix Concrete Delivery Problem. Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering [online]. 11(2). ISSN 1338-7278. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/sspjce-2016-0014>
- GALIĆ, Mario, Vaclav VENKRBEČ, Franziska CHMELIK, Immo FEINE, Zoran PUČKO a Uroš KLANŠEK, 2017. Survey of Accomplishments in Bim Implementation in Croatia, the Czech Republic, Germany, and Slovenia. Elektronički časopis građevinskog fakulteta Osijek [online]. 8(15), 23–35. ISSN 18478948. Dostupné z: <https://doi.org/10.13167/2017.15.3>
- GALIĆ, Mario, Linh Viet Nguyen VU a Immo FEINE, 2015. Weather Forecast as an Additional Dimension to BIM. In: 12th International Conference Organization, Technology And Management In Construction. Primošten: Croatian Association for Construction Management University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering.
- GALIĆ, Mario, Ivica ZAVRŠKI a Zlata DOLAČEK-ALDUK, 2016a. Methodology and algorithm for asphalt supply chain optimization. Tehnicki vjesnik - Technical Gazette [online]. 23(4). ISSN 13303651. Dostupné z: <https://doi.org/10.17559/tv-20150623140015>
- GALIĆ, Mario, Ivica ZAVRŠKI a Zlata DOLAČEK-ALDUK, 2016b. Scenario simulation model for optimized allocation of construction machinery. Gradjevinar [online]. 68(02), 105–112. ISSN 13339095. Dostupné z: <https://doi.org/10.14256/jce.1462.2015>
- GANDON, Fabien a Guus SCHREIBER, 2016. RDF 1.1 XML Syntax.
- GARBARINO, E. a G. A. BLENGINI, 2013. 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, s. 131–161. ISBN 97808570969606. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9780857096906.1.108>
- GEEM, Zong Woo, Joong Hoon KIM a G. V. LOGANATHAN, 2001. A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. Simulation [online]. 76(2), 60–68. ISSN 00375497. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/003754970107600201>
- GEOFFRION, A. M., 1972. Generalized Benders decomposition. Journal of Optimization Theory and Applications [online]. ISSN 00223239. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF00934810>
- GHAFFARIANHOSEINI, Ali, Tongrui ZHANG, Okechukwu NWADIGO, Amirhosein GHAFFARIANHOSEINI, Nicola NAISMITH, John TOOKEY a Kaamran RAAHEMIFAR, 2017. Application of nD BIM Integrated Knowledge-based Building Management System (BIM-IKBMS) for inspecting post-construction energy efficiency. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 72, 935–949. ISSN 18790690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.061>

- GLOVER, Fred, 1977. HEURISTICS FOR INTEGER PROGRAMMING USING SURROGATE CONSTRAINTS. *Decision Sciences* [online]. 8(1), 156–166. ISSN 15405915. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1977.tb01074.x>
- GOLDEN, Bruce L. a Richard T. WONG, 1981. Capacitated arc routing problems. *Networks* [online]. 11(3), 305–315. ISSN 10970037. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/net.3230110308>
- GOLDEN, Bruce, S. RAGHAVAN a Edward WASIL, 2008. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges* [online]. B.m.: Springer Science & Business Media. ISBN 978-0-387-77777-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8>
- GOMORY, Ralph E., 1958. Outline of an Algorithm for Integer Solutions to Linear Programs. *Bulletin of the American Mathematical Society* [online]. 64, 275–278. ISSN 02730979. Dostupné z: <https://doi.org/10.1090/S0002-9904-1958-10224-4>
- GRABIEC, Anna M., Justyna KLAMA, Daniel ZAWAL a Daria KRUPA, 2012. Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition. *Construction and Building Materials* [online]. 34, 145–150. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.027>
- GREGG KELLOGG, PIERRE-ANTOINE CHAMPIN, Dave Longley, 2019. JSON-LD 1.1 – A JSON-based Serialization for Linked Data. [Technical]. [Technical Report] W3C.
- GRIEBEL, M, 2016. *Programming for Computations – MATLAB / Octave*. ISBN 9783319324517.
- GUROBI, Optimization, 2018. *Gurobi Optimizer Reference Manual, Version 5.0*.
- HAKLAY, Muki, Alex SINGLETON a Chris PARKER, 2008. Web mapping 2.0: The neogeography of the GeoWeb. *Geography Compass* [online]. ISSN 17498198. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00167.x>
- HAMMAD, Ahmed W. A., Ali AKBARNEZHAD, David REY a S. Travis WALLER, 2016. A Computational Method for Estimating Travel Frequencies in Site Layout Planning. *Journal of Construction Engineering and Management* [online]. 142(5). ISSN 0733-9364. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001086](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001086)
- HANSEN, T.C. a Henrik NARUD, 1983. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International*. 5(1), 79–83.
- HANSEN, Torben C. a RILEM TC37, 1992. *Recycling of demolished concrete and masonry; report of Technical Committee 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete*. B.m.: RILEM Technical Committee 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete.
- HARTARD, Christian, 2003. *Neuperlach. Utopie des Urbanen. Leitbilder und Stadtbilder eines Experimentes der 1960er-Jahre* [online]. B.m. Ludwig-Maximilians-Universität München, Fakultät für Geschichts- und Kunstwissenschaften. Dostupné z: [https://epub.ub.uni-muenchen.de/2034/1/Hartard\\_Christian\\_textteil.pdf](https://epub.ub.uni-muenchen.de/2034/1/Hartard_Christian_textteil.pdf)
- HASABA, S., M. KAWANURA, K. TORIK a K. TAKEMOTO, 1981. *Drying shrinkage and durability of the concrete made of recycled concrete aggregates*. ISBN 0911-8985.

- HE, S., Q. H. WU a J. R. SAUNDERS, 2009. Group search optimizer: An optimization algorithm inspired by animal searching behavior. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* [online]. 13(5), 973–990. ISSN 1089778X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TEVC.2009.2011992>
- HEGAZY, Tarek, 1999. Optimization of Resource Allocation and Leveling Using Genetic Algorithms. *Journal of Construction Engineering and Management* [online]. 125(3), 167–175. ISSN 0733-9364. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(1999\)125:3\(167\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1999)125:3(167))
- HEGAZY, Tarek, Ahmed ELHAKEEM a Emad ELBELTAGI, 2004. Distributed Scheduling Model for Infrastructure Networks. *Journal of Construction Engineering and Management* [online]. 130(2). ISSN 0733-9364. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2004\)130:2\(160\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2004)130:2(160))
- HEISIG, Gerald a Stefan MINNER, 1999. ILOG OPL Studio. *OR Spectrum* [online]. ISSN 0171-6468. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s002910050096>
- HELLEMAN, Gerben a Frank WASSENBERG, 2004. The renewal of what was tomorrow's idealistic city. Amsterdam's Bijlmermeer high-rise. *Cities* [online]. 21(1), 3–7. ISSN 02642751. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2003.10.011>
- HENDRICKSON, Chris a Tung AU, 2008. Project Management for Construction, Fundamental Concepts for Owners, Engineers, Architects and Builders, Version 2.2 [online]. Pittsburgh: Department of Civil and Environmental Engineering, Carnegie Mellon University. ISBN 0137312660. Dostupné z: <https://www.profkrisna.com/ProfK-Assets/HendricksonBook.pdf>
- HENKOVÁ, Svatava, Martin ŠTĚRBA, David ČECH a Václav VENKRBEK, 2012. Brownfield utilization for recreational purposes. In: *Public Recreation and Landscape Protection - Hand in Hand, 2012 Conference Proceeding*. s. 42–46. ISBN 9788073756116.
- HESTENES, Magnus R., 1969. Multiplier and gradient methods. *Journal of Optimization Theory and Applications* [online]. 4(5), 303–320. ISSN 00223239. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF00927673>
- HÉZL, Martin, 2003. Regenerace panelových domů. B.m. ČVUT Praha, Fakulta stavební.
- HOLLAND, J H, 1975. *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. ISBN 0472084607.
- HOOKE, Robert a T. A. JEEVES, 1961. „Direct Search" Solution of Numerical and Statistical Problems. *Journal of the ACM (JACM)* [online]. ISSN 1557735X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/321062.321069>
- HUANG, C., C. K. WONG a C. M. TAM, 2011. Optimization of tower crane and material supply locations in a high-rise building site by mixed-integer linear programming. *Automation in Construction* [online]. 20(5), 571–580. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.023>
- HUANG, Shan Huen a Pei Chun LIN, 2012. Multi-treatment capacitated arc routing of construction machinery in Taiwan's smooth road project. *Automation in Construction* [online]. 21(1). ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.005>

HÜRLIMANN, T. a L. CARDONA, 1993. Modeling tools for decision support: LPL: a modeling language: gLPS: a Graph-Based System for Linear Problems Modeling: NetCalc: a netform editor: CHRIS: a constraint programming tool. B.m.: Computer Institute of the University of Fribourg.

ICMELI, Oya, S. SELCUK ERENGUC a Christopher J. ZAPPE, 1993. Project Scheduling Problems: A Survey. *International Journal of Operations & Production Management* [online]. 13(11), 80–91. ISSN 0144-3577. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/01443579310046454>

ISIKDAG, Umit, Jason UNDERWOOD a Murat KURUOGLU, 2012. *Building Information Modelling* [online]. 2012. ISBN 9781405156486. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1002/9781118280294.ch17>

ISO/IEC JTC 1/SC 6, 2005. ISO/IEC 9834-8:2005 – Information technology – Open Systems Interconnection – Procedures for the operation of OSI Registration Authorities: Generation and registration of Universally Unique Identifiers (UUIDs) and their use as ASN.1 Object Identifier comp. 2005. Geneva: ISO.

ISO/IEC JTC 1, 1996. ISO/IEC 11578: 1996 – Information technology – Open Systems Interconnection – Remote Procedure Call (RPC). 1996. Geneva: ISO.

ISO, 2004. ISO 10303-11:2004 Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual. 2004.

ISO, 2015. ISO 21873-1 Building construction machinery and equipment — Mobile crushers — Part 1: Terminology and commercial specifications. 2015.

ITU, 2012. ITU-T Recommendation X.667 (10/12): Information technology – Procedures for the operation of object identifier registration authorities: Generation of universally unique identifiers and their use in object identifiers. 2012. Geneva: ITU.

JEHLÍKOVÁ JANEČKOVÁ, Michaela, 2008. Vývoj panelových soustav v československém stavebnictví. *BETON TKS*. 20–22.

JIN, Yong Tao, Peng Hua ZHU, Quan Bo YUAN, Huan WANG a Zhao Hui FENG, 2009. Study on simplified algorithm for the shortest path. In: *Proceedings - 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science, ICIECS 2009* [online]. B.m.: IEEE, s. 1–3. ISBN 9781424449941. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICIECS.2009.5365050>

JUN, Dho Heon a Khaled EL-RAYES, 2010. Optimizing the utilization of multiple labor shifts in construction projects. *Automation in Construction* [online]. 19(2), 109–119. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.12.015>

JUNG, Jong Suk, Sang Hoon SONG, Myoung Hoon JUN a Seong Sik PARK, 2015. A comparison of economic feasibility and emission of carbon dioxide for two recycling processes. *KSCE Journal of Civil Engineering* [online]. 19(5), 1248–1255. ISSN 19763808. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0708-2>



- KARABOGA, Dervis a Bahriye BASTURK, 2007. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization* [online]. 39(3), 459–471. ISSN 09255001. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>
- KARLSEN, Jan, Gordana PETKOVIC a Olav LAHUS, 2002. Forslag til deklarasjonsordning for resirkulert tilslag, RESIBA – prosjektrapport 04/2002. Oslo: Norges byggforskning sinstitutt. ISBN 82-536-0765-2.
- KARMARKAR, N., 1984. A new polynomial-time algorithm for linear programming. In: *Proceedings of the sixteenth annual ACM symposium on Theory of computing: ACM* [online]. s. 302–311. ISBN 0897911334. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/800057.808695>
- KATZ, Amnon, 2003. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 33(5), 703–711. ISSN 00088846. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01033-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01033-5)
- KATZ, Amnon, 2004. Treatments for the improvement of recycled aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 16(6), 597–603. ISSN 08991561. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(597))
- KAY, Thornton, 1994. Salvo in Germany - Reiner Pilz. *SalvoNEWS*. 99, 14.
- KAZEMIAN, F., H. ROOHOLAMINI a A. HASSANI, 2019. Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* [online]. 209, 690–700. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.179>
- KENNEDY, J. a R. EBERHART, 1995. Particle Swarm Optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* [online]. Perth: IEEE Service Center, s. 1942–1948. Dostupné z: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- KHALAFALLAH, Ahmed a Khaled EL-RAYES, 2011. Automated multi-objective optimization system for airport site layouts. *Automation in Construction* [online]. 20(4). ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.001>
- KHALIL, Alkriz a Mangin JEAN-CLAUDE, 2005. A new model for optimizing the location of cranes and construction facilities using genetic algorithms. In: *Association of Researchers in Construction Management, ARCOM 2005 - Proceedings of the 21st Annual Conference*.
- KINABLE, J., T. WAUTERS a G. VANDEN BERGHE, 2014. The concrete delivery problem. *Computers and Operations Research* [online]. 48, 53–68. ISSN 03050548. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.02.008>
- KIRKPATRICK, S., C. D. GELATT a M. P. VECCHI, 1983. Optimization by simulated annealing. *Science* [online]. 220(4598), 671–680. ISSN 00368075. Dostupné z: <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- KLANŠEK, Uroš, 2016. Mixed-Integer Nonlinear Programming Model for Nonlinear Discrete Optimization of Project Schedules under Restricted Costs. *Journal of Construction Engineering and Management* [online]. 142(3), 1–13. ISSN 0733-9364. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001074](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001074)

- KLANŠEK, Uroš a Mirko PŠUNDER, 2012. MINLP optimization model for the nonlinear discrete time-cost trade-off problem. *Advances in Engineering Software* [online]. 48, 6–16. ISSN 09659978. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2012.01.006>
- KLEE, Lukáš, 2021. BIM Protokol: pravidla pro digitální spolupráci [online] [vid. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.koncepcbim.cz/832-bim-protokol-pravidla-pro-digitalni-spolupraci>
- KOU, Shi Cong a Chi Sun POON, 2015. Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 77, 501–508. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.035>
- KOZLOVSKÁ, Mária a Marcela SPIŠÁKOVÁ, 2013. Construction waste generation across construction project life-cycle. *Organization, Technology & Management in Construction: An International Journal* [online]. ISSN 18475450. Dostupné z: <https://doi.org/10.5592/otmcj.2013.1.5>
- KRAVANJA, S., T. ŽULA a U. KLANŠEK, 2017. Multi-parametric MINLP optimization study of a composite I beam floor system. *Engineering Structures* [online]. 130, 316–335. ISSN 18737323. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.012>
- KREJSA, Martin a Petr KONEČNÝ, 2012. Spolehlivost a bezpečnost staveb - interaktivní studijní materiál. 2012. Ostrava: VŠB-TU; OZápadočeská univerzita v Plzni.
- KUDA, František, Eva BERÁNKOVÁ a Petr SOUKUP, 2012. Facility management v kostce pro profesionály i laiky. Olomouc: Form Solution. ISBN 978-80-905257-0-2.
- KUHN, Harold W., 1955. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval research logistics quarterly*. 2(1–2), 83–97.
- KUMAR, Srinath S. a Jack C.P. CHENG, 2015. A BIM-based automated site layout planning framework for congested construction sites. *Automation in Construction* [online]. 59. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.008>
- LAHDENPERÄ, Pertti, 2001. Design-build procedures introduction, illustration and comparison of U.S. modes. ISSN 951–38–5879–0.
- LAND, A. H. a A. G. DOIG, 1960. An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems. *Econometrica* [online]. 28(3), 497–520. ISSN 00129682. Dostupné z: <https://doi.org/10.2307/1910129>
- LASEK, Stanslav, 2014. Základy degračních procesů. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-3373-6.
- LEE, Hsin Yun, 2009. Optimizing schedule for improving the traffic impact of work zone on roads. *Automation in Construction* [online]. 18(8). ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.05.004>
- LENTZKOW, Mark, 2017. Higher and Higher: The Ascent to #1 of the Tilt-up Top Ten. *Tilt-Up Today* [online]. Dostupné z: <http://tilt-up.org/tilt-uptoday/2017/10/26/higher-and-higher-the-ascent-to-1-of-the-tilt-up-top-ten/>

- LEU, Sou Sen, Chung Huei YANG a Jiun Ching HUANG, 2000. Resource leveling in construction by genetic algorithm-based optimization and its decision support system application. *Automation in construction* [online]. 10(1), 27–41. ISSN 09265805. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(99\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(99)00011-4)
- LEU, Sou-Sen a Shao-Ting HWANG, 2001. Optimal Repetitive Scheduling Model with Shareable Resource Constraint. *Journal of Construction Engineering and Management* [online]. 127(4), 270–280. ISSN 0733-9364. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2001\)127:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2001)127:4(270))
- LI, Heng, J.-N. CAO a P. E. D. LOVE, 1999. Using Machine Learning and GA to Solve Time-Cost Trade-Off Problems. *Journal of Construction Engineering and Management* [online]. 125(5), 347–353. ISSN 0733-9364. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(1999\)125:5\(347\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1999)125:5(347))
- LI, Xiao, Zhi SHAO a Ji QIJAN, 2002. An optimizing method base on autonomous animates: fish- swarm algorithm. *Systems Engineering Theory and Practice*. 22, 32–38.
- LIDOVKY.CZ, 2011. V Česku začala první demolice ohavného paneláku [online]. Dostupné z: [https://www.lidovky.cz/byznys/statni-pokladna/v-cesku-zacala-prvni-demolice-ohavneho-panelaku.A111122\\_114006\\_statni-pokladna\\_nev](https://www.lidovky.cz/byznys/statni-pokladna/v-cesku-zacala-prvni-demolice-ohavneho-panelaku.A111122_114006_statni-pokladna_nev)
- LIEN, Li Chuan a Min Yuan CHENG, 2014. Particle bee algorithm for tower crane layout with material quantity supply and demand optimization. *Automation in Construction* [online]. 45. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.002>
- LIGEŻA, Wiesław, 2015. Renovation of Large-Panel Buildings in Context of Urban Renewal/ Remonty Budynków Wielkopłytowych, Jako Element Rewitalizacji Miast. *Civil And Environmental Engineering Reports* [online]. 17(2), 83–95. ISSN 2450-8594. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/ceer-2015-0024>
- LINDO SYSTEMS INC., 2018. What'sBest Version 16.0 User's Manual Taking your spreadsheet beyond "What If?".
- LINDO SYSTEMS INC, 2015. Lingo User's Guide.
- LIU, Hexu, Mohamed AL-HUSSEIN a Ming LU, 2015. BIM-based integrated approach for detailed construction scheduling under resource constraints. *Automation in Construction* [online]. 53, 29–43. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.008>
- LIU, J. J., L. HOU a X. Y. WANG, 2014. A discrete firefly algorithm for the scaffolding modular construction in mega projects. In: 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining, ISARC 2014 - Proceedings [online]. ISBN 9780646597119. Dostupné z: <https://doi.org/10.22260/isarc2014/0039>
- LU, Bao, Caijun SHI, Zhijie CAO, Mingzhi GUO a Jianlan ZHENG, 2019. Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production* [online]. 233, 421–428. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.350>

- LU, Qiqi, Jongsung WON a Jack C.P. CHENG, 2016. A financial decision making framework for construction projects based on 5D Building Information Modeling (BIM). *International Journal of Project Management* [online]. 34(1), 3–21. ISSN 02637863. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.09.004>
- LUCAS, C. a G. MITRA, 1988. Computer-assisted mathematical programming (modelling) system: CAMPS. *Computer Journal* [online]. 31(4), 364–375. ISSN 00104620. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/comjnl/31.4.364>
- MACUT, N. a A. RADIVOJEVIĆ, 2016. Prefabricated concrete facades and their existing condition: Case study of New Belgrade's residential buildings. In: *Structural Analysis of Historical Constructions: Anamnesis, Diagnosis, Therapy, Controls* [online]. B.m.: CRC Press, Taylor & Francis Group, s. 901–907. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781315616995-122>
- MAGHREBI, Mojtaba, Vivek PERIARAJ, S. Travis WALLER a Claude SAMMUT, 2014. Solving ready-mixed concrete delivery problems: Evolutionary comparison between column generation and robust genetic algorithm. In: *Computing in Civil and Building Engineering - Proceedings of the 2014 International Conference on Computing in Civil and Building Engineering* [online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1061/9780784413616.176>
- MAGHREBI, Mojtaba, Vivek PERIARAJ, S. Travis WALLER a Claude SAMMUT, 2016. Column Generation-Based Approach for Solving Large-Scale Ready Mixed Concrete Delivery Dispatching Problems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* [online]. 31(2), 145–159. ISSN 14678667. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/mice.12182>
- MARINKOVIC, Snežana B., 2013. Life cycle assessment (LCA) aspects of concrete. In: F. PACHECO-TORGAL, S. JALALI, J. LABRINCHA a V.M. JOHN, ed. *Eco-Efficient Concrete* [online]. Series in. Philadelphia: Woodhead Publishing, s. 45–80. ISBN 9780857094247. Dostupné z: <https://doi.org/HTTPS://DOI.ORG/10.1533/9780857098993.1.45>
- MARTINELLI, Enzo, Eduardus A.B. KOENDERS a Marco PEPE, 2017. State of Knowledge on Green Concrete with Recycled Aggregates and Cement Replacement. In: Joaquim A.O. BARROS a Enzo MARTINELLI, ed. *Recent advances on Green Concrete Purposes. The Contribution of the EU-FP7 Project EnCoRe* [online]. Research f. Cham: Springer International Publishing AG Switzerland, s. 3–27. ISBN 9783319567952. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56797-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56797-6_1)
- MARZOUK, Mohamed a Ahmed ABUBAKR, 2016. Decision support for tower crane selection with building information models and genetic algorithms. *Automation in Construction* [online]. 61. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.09.008>
- MASON, Andrew J. a Iain DUNNING, 2010. OpenSolver: open source optimisation for Excel. In: *45th Annual Conference of the Operations Research Society of New Zealand*.
- MAWENGGANG, H. a B. A. MURTAGH, 1986. Solving nonlinear integer programs with large-scale optimization software. *Annals of Operations Research* [online]. 5(2), 425–437. ISSN 02545330. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF02739232>

MAXIMAL SOFTWARE INC., 2015. MPL Modelling System, Release 5.0 [online].  
Dostupné z: <http://www.maximalsoftware.com/mpl/>

MCNEIL, Katrina a Thomas H.K. KANG, 2013. Recycled Concrete Aggregates: A Review. International Journal of Concrete Structures and Materials [online]. 7(1), 61–69. ISSN 22341315. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>

MEFTEH, Houria, Oussama KEBAILI, Hocine OUCIEF, Layachi BERREDJEM a Nourredine ARABI, 2013. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. Journal of Cleaner Production [online]. 54, 282–288. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.009>

MEI-KO, Kwan, 1962. Graphic Programming using odd or even points. Chinese Mathematics. 1(110), 273–277.

MENZELOVÁ, Kateřina, 2009. Problém paneláků: Na demolici není, na opravy drobnky. Aktuálně.cz.

MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU, AGENTURA CZECHINVEST, MINISTERSTVO PRO MÍSTNÍ ROZVOJ, MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ a MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, 2019. Národní strategie regenerací brownfieldů 2019-2024 [online]. [vid. 2019-11-16]. Dostupné z: [http://www.brownfieldy.eu/wp-content/uploads/2019/08/NSRB-2019-2024\\_20190708.pdf](http://www.brownfieldy.eu/wp-content/uploads/2019/08/NSRB-2019-2024_20190708.pdf)

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, 2017a. Průvodce předcházením vzniku stavebních odpadů. ISBN 978-80-7212-613-9.

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, 2017b. Statistická ročenka životního prostředí České republiky 2017 [online]. Praha: CENIA, česká informační agentura životního prostředí. ISBN 978-80-87770-66-5. Dostupné z: [https://www.cenia.cz/wp-content/uploads/2019/07/Statisticka\\_Rocenka\\_ZP\\_CR\\_2017-1.pdf](https://www.cenia.cz/wp-content/uploads/2019/07/Statisticka_Rocenka_ZP_CR_2017-1.pdf)

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, 2017c. Zpráva o životním prostředí České republiky 2017 [online]. Praha: CENIA, česká informační agentura životního prostředí. ISBN 978-80-87770-67-2. Dostupné z: [https://www.cenia.cz/wp-content/uploads/2019/03/Zprava-o-zivotnim-prostredi-Ceske-republiky\\_2017.pdf](https://www.cenia.cz/wp-content/uploads/2019/03/Zprava-o-zivotnim-prostredi-Ceske-republiky_2017.pdf)

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, 2018. Metodický návod odboru odpadů Ministerstva životního prostředí pro řízení vzniku stavebních a demoličních odpadů a pro nakládání s nimi [online]. 2018. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodika\\_stavebni\\_odpady/\\$FILE/OODP-metodicky\\_navod\\_SDO-20180904.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodika_stavebni_odpady/$FILE/OODP-metodicky_navod_SDO-20180904.pdf)

MINISTRY OF PUBLIC WORKS, 2010. EHE-08 Code on Structural Concrete, Articles and anexes. 2010. Madrid: Governemnt of Spain, Ministry of Public Works, Transports and Environment.

MOE, 2018. Anual Report on Environmental Statistics 2017 [online]. 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)

MORELL, Britt-Louise, 2007. Bostadspolitiken - Svensk politik för boende, byggande och planering under 130 år [online]. [vid. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2007/bostadspolitiken.pdf>

- MOTAWA, Ibrahim a Abdulkareem ALMARSHAD, 2013. A knowledge-based BIM system for building maintenance. *Automation in Construction* [online]. 29, 173–182. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.008>
- MOUSSAVI NADOUSHANI, Zahra Sadat, Ahmed W. A. HAMMAD a Ali AKBARNEZHAD, 2017. Location Optimization of Tower Crane and Allocation of Material Supply Points in a Construction Site Considering Operating and Rental Costs. *Journal of Construction Engineering and Management* [online]. 143(1). ISSN 0733-9364. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001215](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001215)
- NARAYANAN, Pavan Kumar, David REY, Mojtaba MAGHREBI a S. Travis WALLER, 2015. Using lagrangian relaxation to solve ready mixed concrete dispatching problems. *Transportation Research Record* [online]. 2498, 84–90. ISSN 03611981. Dostupné z: <https://doi.org/10.3141/2498-10>
- NASO, D., M. SURICO, B. TURCHIANO a U. KAYMAK, 2004. Just-in-time production and delivery in supply chains: a hybrid evolutionary approach. In: *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. s. 1932–1937. ISSN 1062922X.
- NASO, David, Michele SURICO, Biagio TURCHIANO a Uzay KAYMAK, 2007. Genetic algorithms for supply-chain scheduling: A case study in the distribution of ready-mixed concrete. *European Journal of Operational Research* [online]. 177(3), 2069–2099. ISSN 03772217. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.019>
- NEEDLEMAN, Mark H., 2001. Rdf: The resource description framework. *Serials Review* [online]. 27(1). ISSN 00987913. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00987913.2001.10764639>
- NERSESIAN, Roy L., 2011. *Evolver Solutions for Business Using Microsoft Excel and Evolver Software from Palisade*. Ithaca, NY: Palisade Corporation; Second Edition. ISBN 978-1893281127.
- NING, Xin, Ka Chi LAM a Mike Chun Kit LAM, 2011. A decision-making system for construction site layout planning. *Automation in Construction* [online]. 20(4). ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.014>
- NOVÁKOVÁ, Iveta a Karel MIKULICA, 2016. Properties of Concrete with Partial Replacement of Natural Aggregate by Recycled Concrete Aggregates from Precast Production. In: *Procedia Engineering* [online]. s. 360–367. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.387>
- ODBORNÁ RADA PRO BIM Z.S., 2020. SNIM (Standard Negrafických Informací 3D Modelu). SNIM (Standard Negrafických Informací 3D Modelu) [online] [vid. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://snim.czbim.org>
- OLERÍNY, Milan, 2005. *Řízení stavebních projektů, claimový management*. Praha: C H Beck. ISBN 80-7179-888-6.
- OLSEN, Gregory R. a Garret N. VANDERPLAATS, 1989. Method for nonlinear optimization with discrete design variables. *AIAA Journal* [online]. 27(11), 1584–1589. ISSN 00011452. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/3.10305>

ORD, Keith a H. A. TAHA, 2017. Operations Research: An Introduction. 10th Editi. B.m.: Pearson. ISBN 9780134444017.

OSMAN, Hesham M., Maged E. GEORGY a Moheeb E. IBRAHIM, 2003. A hybrid CAD-based construction site layout planning system using genetic algorithms. In: Automation in Construction [online]. ISSN 09265805. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(03\)00058-X](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(03)00058-X)

ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT, 2014. ÖNORM B 3151:2014 - Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode [online]. 2014. Wien: Österreichisches Normungsinstitut. Dostupné z: [https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/Bundesnormen/NOR40187245/II\\_290\\_2016\\_OeNORM\\_B\\_3151.pdf](https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/Bundesnormen/NOR40187245/II_290_2016_OeNORM_B_3151.pdf)

PADBERG, M. a G. RINALDI, 1987. Optimization of a 532-city symmetric traveling salesman problem by branch and cut. Operations Research Letters [online]. 6(1), 1–7. ISSN 01676377. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0167-6377\(87\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0167-6377(87)90002-2)

PADMINI, A. K., K. RAMAMURTHY a M. S. MATHEWS, 2009. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials [online]. 23, 829–836. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006>

PARLAMENT ČR, 2001. Zákon č. 185/2001 Sb. Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů. 2001.

PARLAMENT ČR, 2016. Zákon č. 89/2016 Sb., kterým se mění zákon č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství (horní zákon), ve znění pozdějších předpisů. 2016.

PARLAMENT ČR, 2017. Zákon č. 225/2017 Sb., kterým se mění zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony. 2017.

PASSINO, Kevin M., 2002. Biomimicry of Bacterial Foraging for Distributed Optimization and Control. IEEE Control Systems [online]. 22(3), 52–67. ISSN 1066033X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MCS.2002.1004010>

PATLOKA, Jiří, Michal BRANDTNER a Václav VENKRBEK, 2018. MATHEMATICAL OPTIMIZATION AND HEURISTIC METHODS FOR JUST-IN-TIME CONCRETE DELIVERY – REVIEW. In: Miloslav NOVOTNÝ, ed. JUNIORSTAV 2018, 20th International Conference of Ph.D. Students, Proceedings. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, s. 1–8.

PECK, Martin, Christoph DAUBERCHMIDT, Arthur WOLFRUM, Stephan ENGELSMANN, Stefan PETERS, Valerie SPALDING, Franz FORSTLECHNER, Ulrike FÖRSCHLER, Torsten FÖRSTER, Peter LIEBLANG a Tobias WALLISSER, 2014. Modern Concrete Construction Manual. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation. ISBN 978-3-95553-205-5.

PEDRO, D., J. DE BRITO a L. EVANGELISTA, 2014. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 71, 141–151. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.030>

PEDRO, D., J. DE BRITO a L. EVANGELISTA, 2015. Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: influence of the crushing process. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* [online]. 48(12), 3965–3978. ISSN 13595997. Dostupné z: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0456-7>

PELLEGRINO, Carlo a Flora FALESCHINI, 2016. Recycled Aggregates for Concrete Production: State-of-the-Art. In: *Sustainability Improvements in the Concrete Industry* [online]. Green Ener. Cham: Springer, s. 5–34. ISBN 978-3-319-28538-2. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-28540-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28540-5_2)

PEPE, Marco, 2015a. Recycled Concrete Aggregates. In: *A Conceptual Model for Designing Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications* [online]. Cham: Springer International Publishing, s. 27–54. ISBN 978-3-319-26472-1. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26473-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26473-8_4)

PEPE, Marco, 2015b. Regulatory Environment and Guidelines for RACs. In: *A Conceptual Model for Designing Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications* [online]. Cham: Springer International Publishing AG Switzerland, s. 17–26. ISBN 978-3-319-26472-1. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26473-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26473-8_3)

POON, C. S., Z. H. SHUI, L. LAM, H. FOK a S. C. KOU, 2004. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 34, 31–36. ISSN 00088846. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8)

POWELL, M. J., 1967. A method for non-linear constraints in minimization problems. B.m.: United Kingdom Atomic Energy Authority.

POWELL, M. J. D., 1978. A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations. In: G.A. WATSON, ed. *Numerical analysis: Proceedings of the Biennial Conference Held at Dundee, June 28–July 1, 1977* [online]. B.m.: Springer, s. 144–157. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/bfb0067703>

POZEMNÍ STAVBY BRNO S.P., 1975. Podnikové spotřební normy materiálu HSV. Brno: Pozemní stavby Brno s.p.

PRAŠČEVIČ, Nataša a Živojin PRAČŠEVIČ, 2015. Application of particle swarms for project time-cost optimization. *Građevinar*. 66(12), 1097–1107.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2019. Python Wiki: BeginnersGuide Overview / Beginners Guide / Front Page. Wikipedia: The Python Wiki.

RAO, M. Chakradhara, 2010. Characterisation and behaviour of recycled aggregate concrete. B.m. Indian institute of technology Kharagpur.



- RAO, M. Chakradhara, 2019. Properties of Recycled Aggregates. In: Systematic Approach of Characterisation and Behaviour of Recycled Aggregate Concrete [online]. Springer T. Singapore: Springer Singapore. ISBN 978-981-10-6685-6. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6686-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6686-3_3)
- RAO, M. Chakradhara a B, 2019. Properties of Recycled Aggregate Concrete. In: Systematic Approach of Characterisation and Behaviour of Recycled Aggregate Concrete [online]. Springer T. Singapore: Springer Singapore, s. 83–157. ISBN 978-981-10-6685-6. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6686-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6686-3_4)
- RAO, M. Chakradhara, Sriman Kumar BHATTACHARYYA a Sudhirkumar V. BARAI, 2019a. Introduction. In: Systematic Approach of Characterisation and Behaviour of Recycled Aggregate Concrete [online]. Springer T. B.m.: Springer Singapore, s. 1–38. ISBN 978-981-10-6685-6. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6686-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6686-3_1)
- RAO, M. Chakradhara, Sriman Kumar BHATTACHARYYA a Sudhirkumar V. BARAI, 2019b. Systematic Approach of Characterisation and Behaviour of Recycled Aggregate Concrete [online]. ISBN 978-981-10-6685-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-6686-3>
- RECHENBERG, Inge, 1965. Cybernetic solution path of an experimental Problem. B.m.: Farnborough Hants: Ministry of Aviation, Royal Aircraft Establishment.
- REN, Chunyu, 2008. Research on vehicle routing problem based on improved hybrid genetic algorithm. In: Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA) [online]. s. 7049–7053. ISBN 9781424421145. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/WCICA.2008.4594009>
- REN, Chunyu, 2011. Fast taboo search algorithm for solving min-max vehicle routing problem. In: M. ZHU, ed. Information and Management Engineering [online]. Communicat. Berlin: Springer, s. 218–223. ISBN 9783642240966. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-24097-3\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24097-3_34)
- REY, David, Mojtaba MAGHREBI a S. T. WALLER, 2014. A single depot concrete delivery with time windows model using integer and assignment variables. In: Proceedings of the 19th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies, HKSTS 2014 - Transportation and Infrastructure. s. 163–170. ISBN 9789881581433.
- RILEM, 1994. Specifications for concrete with recycled aggregates. Materials and Structures [online]. 27(9), 557–559. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF02473217>
- ROBLES, Michael, 2017. Urban mining for sand and gravel [online]. B.m.: Dutch Waste Management Association. Dostupné z: <http://geo.msu.edu/extra/geogmich/sand&gravel.html>
- ROJÍK, Václav, Václav BRABEC, Miloš CUC, Václav HLAVÁČEK, Alexej HRON, Zdeněk LHOTA, Lubor ODVÁRKA, Tatjana ROJÍKOVÁ, Josef ŘÍHA, Jiří WITZANY a Rudolf ZAHŘÁDKA, 1974. Panelové objekty, Zásady konstruování a provádění. Praha: SNTL.
- RUMELHART, David E., Geoffrey E. HINTON a Ronald J. WILLIAMS, 1986. Learning representations by back-propagating errors. Nature [online]. 323, 533–538. ISSN 00280836. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/323533a0>

- RYOO, Hong S. a Nikolaos V. SAHINIDIS, 1996. A branch-and-reduce approach to global optimization. *Journal of Global Optimization* [online]. 8(2), 107–138. ISSN 0925-5001. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/bf00138689>
- SACHS, Horst, Michael STIEBITZ a Robin J. WILSON, 1988. An historical note: Euler's Königsberg letters. *Journal of Graph Theory* [online]. 12(1), 133–139. ISSN 10970118. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/jgt.3190120114>
- SAFE WORK AUSTRALIA, 2016. Demolition work Code of Practice. Canberra: Safe Work Australia. ISBN 978-0-642-78415-5.
- SAGOE-CRENTSIL, K. K., T. BROWN a A. H. TAYLOR, 2001. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research* [online]. 31(5), 707–712. ISSN 00088846. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00476-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00476-2)
- ŠÁLA, Jiří a Milan MACHATKA, 2002. Tepelně technické vady a poruchy panelových budov a jejich sanace. Praha / Brno: Organization for the Promotion of Energy Technologies (OPET). ISBN 80-902689-7-8.
- SALEM, Rohi M., Edwin G. BURDETTE a N. Mike JACKSON, 2003. Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete. *ACI Materials Journal*. 100(3), 213–221. ISSN 0889325X.
- SÁNCHEZ DE JUAN, M. a Pilar Alaejos GUTIÉREZ, 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials* [online]. 23(2), 872–877. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>
- SARAVANAN, J. a N. SUGANYA, 2015. Mechanical Properties of Concrete Using Steel Slag Aggregate. *International Journal of Engineering Inventions* [online]. 4(9), 7–16. Dostupné z: <http://www.ijejournal.com/papers/Vol.4-Iss.9/B0490716.pdf>
- SAWHNEY, Anil, Mike RILEY a Javier IRIZARRY, 2020. *Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment*. ISSN 1098-6596.
- SBTOOLCZ, 2019. SBToolCZ, Metodika [online] [vid. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://www.sbtool.cz/cs/metodika>
- SCHMID, Verena, Karl F. DOERNER, Richard F. HARTL a Juan José SALAZAR-GONZÁLEZ, 2010. Hybridization of very large neighborhood search for ready-mixed concrete delivery problems. *Computers and Operations Research* [online]. 37(3), 559–574. ISSN 03050548. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.07.010>
- SCHULTMANN, Frank, 2005. Final Report of Task Group 39 on Deconstruction. ISBN 978-9063630447.
- SCHWEFEL, H.-P., 1965. *Kybernetische Evolution als Strategie der experimentellen Forschung in der Strömungstechnik*. B.m. Technical University of Berlin.

- SENOUCI, Ahmed B. a Neil N. ELDIN, 2004. Use of Genetic Algorithms in Resource Scheduling of Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management* [online]. 130(6), 869–877. ISSN 0733-9364. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2004\)130:6\(869\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2004)130:6(869))
- SHAFRANOVICH, Y., 2005. RFC 4180-Common Format and MIME Type for Comma-Separated Values (CSV) Files. The International Society.
- SHAH-HOSSEINI, Hamed, 2007. Problem solving by intelligent water drops. In: 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2007 [online]. ISBN 1424413400. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CEC.2007.4424885>
- SHAYAN, Ahmad a Aimin XU, 2003. Performance and Properties of Structural Concrete made with Recycled Concrete Aggregate. *ACI Materials Journal*. 100(5), 371–380. ISSN 0889325X.
- SHELDEN, Dennis R., Pieter PAUWELS, Pardis PISHDAD-BOZORGI a Shu TANG, 2020. Data standards and data exchange for Construction 4.0. In: *Construction 4.0* [online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9780429398100-12>
- SILVA, C. A., J. M. FARIA, P. ABRANTES, J. M.C. SOUSA, M. SURICO a D. NASO, 2005. Concrete Delivery using a combination of GA and ACO. In: *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, CDC-ECC '05* [online]. s. 7633–7638. ISBN 0780395689. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1583394>
- SILVA, R. V., J. DE BRITO a R. K. DHIR, 2014. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials* [online]. 65, 201–217. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- ŠKOPÁN, M., 2019. RECYCLING C&DW IN CZECH REPUBLIC - SUCCESSES AND BARRIERS. In: *RECYCLING 2019 „Recycling and recovery of construction waste as secondary raw materials” proceedings of the 24th conference*. s. 9–14.
- SKŘIVÁNKOVÁ, Lucie, 2017. Paneláci 1. / Padesát sídlišť v českých zemích. Praha: Uměleckoprůmyslové museum v Praze. ISBN 978—80-7101—161-3.
- ŠMEJKAL, Jiří, 2010. Železobetonové konstrukce I. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. ISBN 978-80-7043-943-2.
- SPIŠÁKOVÁ, Marcela, Peter MÉSÁROŠ a Tomáš MANDIČÁK, 2021. Construction waste audit in the framework of sustainable waste management in construction projects—case study. *Buildings* [online]. 11(2). ISSN 20755309. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/buildings11020061>
- STAHEL, Walter R., 2016. The circular economy [online]. 2016. ISSN 14764687. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/531435a>
- STARÝ, Jaromír, Ivo SITENSKÝ, Dalibor MAŠEK, Tereza HODKOVÁ, Mirko VANĚČEK, Jaroslav NOVÁK a Pavel KAVINA, 2017. Surovinové zdroje České republiky, nerostné suroviny. Praha: Česká geologická služba. ISBN 978-80-7075-932-5.

- STEINBERGER, Julia K., Fridolin KRAUSMANN a Nina EISENMENGER, 2010. Global patterns of materials use: A socioeconomic and geophysical analysis. *Ecological Economics* [online]. 69(5), 1148–1158. ISSN 0921-8009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.12.009>
- STERNOVÁ, Zuzana, Vladimír BÚŠ, Jana BENDŽALOVÁ, Katarína GROMOVÁ, Roman HOREČNÝ, Vladimír HRBATÝ, Slavomír SLIVONĚ, Vojtech ŠEPÁK a Jaroslav VALÁŠEK, 2001. *Obnova bytových domov, hromadná bytová výstavba do roku 1970*. Bratislava: Jaga group, v. o. s. ISBN 80-88905-53-2.
- STORN, Rainer a Kenneth PRICE, 1997. Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization* [online]. 11(4), 341–359. ISSN 09255001. Dostupné z: <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- SUCCAR, Bilal, 2009. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction* [online]. 18(3), 357–375. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>
- SUGIMORI, Y., K. KUSUNOKI, F. CHO a S. UCHIKAWA, 1977. Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system. *International Journal of Production Research* [online]. 15(6), 553–564. ISSN 1366588X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00207547708943149>
- SVAZ VÝROBCŮ CEMENTU ČR, 2019. Data 2017 - Cement - výroba, spotřeba, vývoz a dovoz. Data 2017 - Cement - výroba, spotřeba, vývoz a dovoz [online] [vid. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.svcement.cz/data/data-2017/>
- TAM, Vivian W. Y. a C. M. TAM, 2008. A review on the international requirements on waste management and recycling. In: *Progress in Waste Management Research*. New York: Nova Science Publishers Inc. ISBN 978-1604562354.
- TAM, Vivian W.Y., C. M. TAM a K. N. LE, 2007. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 50(1), 82–101. ISSN 09213449. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.012>
- THE MATHWORKS INC., 2017. System Requirements - Release 2017a [online]. 2017. Dostupné z: [https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/support/sysreq/files/SystemRequirements-Release2017a\\_Windows.pdf](https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/support/sysreq/files/SystemRequirements-Release2017a_Windows.pdf)
- THE MATHWORKS INC., 2020. MATLAB [online] [vid. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- THE SWEDISH CONSTRUCTION FEDERATION, 2015. Resource and waste guidelines during construction and demolition Kretsloppsrådet's guidelines, updated 13/11/2015 [online]. 2015. Stockholm: The Swedish Construction Federation. Dostupné z: [https://publikationer.sverigesbyggindustrier.se/Userfiles/Info/1094/160313\\_Guidelines\\_.pdf](https://publikationer.sverigesbyggindustrier.se/Userfiles/Info/1094/160313_Guidelines_.pdf)
- TICHÝ, Milík, 2008. *Projekty a zakázky ve vsýtavbě*. Praha: C. H. Beck. ISBN 978-80-7400-009-6.

TOMÁNKOVÁ, Jaroslava a Dana ČÁPOVÁ, 2013. Management staveb. Praha: FinEco. ISBN 978-80-86590-12-7.

TURING, Alan Mathison, 1950. Computing Machinery and Intelligence. Mind [online]. 59(236), 433–460. ISSN 1520-5118 (Electronic). Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/mind/fz061>

U.S. GREEN BUILDING COUNCIL, 2019. LEED [online] [vid. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://new.usgbc.org/leed>

UEPG, 2006. Aggregates from Construction and demolition waste [online]. 2006. Dostupné z: [http://www.uepg.eu/uploads/Modules/Publications/uepg\\_recycling-study.pdf.pdf](http://www.uepg.eu/uploads/Modules/Publications/uepg_recycling-study.pdf.pdf)

UNEP-DTIE, 2016. Cities and Buildings [online]. 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)

UNITED NATIONS, 2010. E/CN.17/2010/15 - Report on the 18th Session (15 May 2009 and 3-14 May 2010).

UNITED NATIONS, 2015. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015: 70/1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.

UNITED NATIONS, 2019a. Commission on Sustainable Development (CSD). Sustainable Development Goals, Knowledge Platform [online] [vid. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://sustainabledevelopment.un.org/intergovernmental/csd>

UNITED NATIONS, 2019b. Report of the high-level political forum on sustainable development convened under the auspices of the Economic and Social Council at its 2019 session.

UPEG, 2017. Annual Review 2017-2018 [online]. Dostupné z: <http://www.uepg.eu/uploads/Modules/Publications/uepg-annual-review-2017-2018.pdf>

ÚSTŘEDNÍ KNIHOVNA VUT V BRNĚ, 2020. Seznam databází [online] [vid. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/uk/eiz/databaze>

VARGHESE, K. a J. T. O'CONNOR, 1995. Routing Large Vehicles on Industrial Construction Sites. Journal of Construction Engineering and Management [online]. 121(1). ISSN 0733-9364. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(1995\)121:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1995)121:1(1))

VENKRBEC, Václav, 2018. Concrete Delivery 1.0 [online]. 2018. Dostupné z: <http://tstsw.cz/betony/>

VENKRBEC, Václav, Mario GALIĆ a Uroš KLANŠEK, 2018. Construction process optimisation – review of methods, tools and applications. Građevinar [online]. 70(07), 593–606. ISSN 03502465. Dostupné z: <https://doi.org/10.14256/jce.1719.2016>

VENKRBEC, Václav, Svatava HENKOVÁ, David ČECH a Martin ŠTĚRBA, 2012. Regenerační opatření panelových budov. Hradec Králové: Magnanimitas Assn. ISBN 978-80-905243-4-7.

- VENKRBEČ, Václav a Uroš KLANŠEK, 2017. 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, s. 667–672. ISBN 978-131539382-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781315393827-113>
- VENKRBEČ, Václav, Iveta NOVÁKOVÁ a Svatava HENKOVÁ, 2017. Characteristics of Recycled Concrete Aggregates from Precast Slab Block Buildings. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. s. 1–10. ISSN 1757899X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/3/032076>
- VISWANADHAM, N., 2002. The past, present, and future of supply-chain automation. *IEEE Robotics and Automation Magazine* [online]. ISSN 10709932. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MRA.2002.1019490>
- VISWANATHAN, J. a I. E. GROSSMANN, 1990. A combined penalty function and outer-approximation method for MINLP optimization. *Computers and Chemical Engineering* [online]. 14(7), 769–782. ISSN 00981354. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(90\)87085-4](https://doi.org/10.1016/0098-1354(90)87085-4)
- VOKURKA, Martin, 2020. Litvínov požádá stát o peníze na demolice paneláků. Na soukromníky zatím nemůže. *Mostecký deník* [online]. Dostupné z: [https://mostecky.denik.cz/zpravy\\_region/litvinov-janov-bourani-panelaky-20201128.html](https://mostecky.denik.cz/zpravy_region/litvinov-janov-bourani-panelaky-20201128.html)
- VOLK, Rebekka, Thu Huong LUU, Johannes Sebastian MUELLER-ROEMER, Neyir SEVILMIS a Frank SCHULTMANN, 2018. Deconstruction project planning of existing buildings based on automated acquisition and reconstruction of building information. *Automation in Construction* [online]. 91, 226–245. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.017>
- WANG, Jiayuan, Hongping YUAN, Xiangping KANG a Weisheng LU, 2010. Critical success factors for on-site sorting of construction waste: A china study. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 54, 931–936. ISSN 09213449. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.012>
- WANG, Jun, Xuedong ZHANG, Wenchi SHOU, Xiangyu WANG, Bo XU, Mi Jeong KIM a Peng WU, 2015. A BIM-based approach for automated tower crane layout planning. *Automation in Construction* [online]. 59. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.05.006>
- WANG, Wei Chih, Shao Wei WENG, Shih Hsu WANG a Cheng Yi CHEN, 2014. Integrating building information models with construction process simulations for project scheduling support. *Automation in Construction* [online]. 37. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.009>
- WBCSD, 2009. *Recycling Concrete* [online]. ISBN 978-3-940388-49-0. Dostupné z: <http://docs.wbcd.org/2009/07/CSI-RecyclingConcrete-FullReport.pdf>
- WEIMANN, Karin, Lutz B. GIESE, Günter MELLMANN a Franz-Georg SIMON, 2003. Building Materials from Waste. *Materials Transactions, Special Issue on Growth of Ecomaterials as a Key to Eco-Society* [online]. 7(44), 1255–1258. Dostupné z: <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.1255>

- WITZANY, Jiří, 2016. Katalog nejčastějších a charakteristických vad a poruch panelových domů [online]. Dostupné z: <https://sfpi.cz/metodika-cvut/>
- WITZANY, Jiří, Tomáš ČEJKA, Richard WASSERBAUER a Radek ZIGLER, 2010. PDR - Poruchy, Degradace a rekonstrukce. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04488-9.
- WOLFRAM, Stephen, 2003. The Mathematica Book, Fifth Edition. B.m.: Wolfram Media, Inc. ISBN 1579550223.
- WONG, Johnny Kwok Wai a Jason ZHOU, 2015. Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. Automation in Construction [online]. 57, 156–165. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003>
- WRAP, 2008. Calculating and declaring recycled content in construction products.
- XIAO, Jianzhuang, 2018. Reclaim of Waste Concrete. In: Recycled Aggregate Concrete Structures [online]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 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)
- XUAN, Dongxing, Baojian ZHAN a Chi Sun POON, 2016. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites [online]. 65, 67–74. ISSN 09589465. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018>
- YAMADA, Tadashi, Bona Frazila RUSS, Jun CASTRO a Eiichi TANIGUCHI, 2009. Designing multimodal freight transport networks: A heuristic approach and applications. Transportation Science [online]. 43(2), 129–143. ISSN 15265447. Dostupné z: <https://doi.org/10.1287/trsc.1080.0250>
- YANG, Xin-She, 2009. Firefly Algorithms for Multimodal Optimization. In: Osamu WATANABE a Thomas ZEUGMANN, ed. Stochastic Algorithms: Foundations and Applications: 5th International Symposium, SAGA 2009, Sapporo, Japan, October 26-28, 2009. Proceedings [online]. s. 169–178. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6_14)
- YANG, Xin-she, Suash DEB a A Cuckoo Breeding BEHAVIOUR, 2009. Cuckoo Search via Lévy Flights. Ieee. 210–214.
- YANG, Xin She, 2010. A new metaheuristic Bat-inspired Algorithm. Studies in Computational Intelligence [online]. 284, 65–74. ISSN 1860949X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6_6)
- YANG, Xin She, 2012. Flower pollination algorithm for global optimization. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) [online]. 7445 LNCS, 240–249. ISSN 03029743. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32894-7\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32894-7_27)
- YI, Wei a Arun KUMAR, 2007. Ant colony optimization for disaster relief operations. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review [online]. 43(6). ISSN 13665545. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.05.004>

- YIH-LONG, Chang, 1999. Winqsb: Decision Support Software for MS/Om. B.m.: John Wiley & Sons Inc. ISBN 978-0471248125.
- ZÁBOJ, Michal, 2015. Bourání Dukly: Z bývalého hotelu už zmizela první dvě patra. Zrcadlo Boskoviccka a Blanenska [online]. Dostupné z: <http://zrcadlo.net/clanky/FOTO-Bourani-Dukly-Z-byvaleho-hotelu-uz-zmizela-prvni-dve-patra-2154/>
- ZAHARIEVA, Roumiana, François BUYLE-BODIN, Frédéric SKOCZYLAS a Eric WIRQUIN, 2003. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. Cement and Concrete Composites [online]. 25(2), 223–232. ISSN 09589465. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00010-0)
- ZAHRAIE, Banafsheh a Mehdi TAVAKOLAN, 2009. Stochastic Time-Cost-Resource Utilization Optimization Using Nondominated Sorting Genetic Algorithm and Discrete Fuzzy Sets. Journal of Construction Engineering and Management [online]. 135(11), 1162–1171. ISSN 0733-9364. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000092](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000092)
- ZAPA A.S., 2019. Find a plant. ZAPA beton [online]. Dostupné z: <https://www.zapa.cz/find-plant/?l=eng>
- ZARECOR, Kimberly Elman, 2011. Manufacturing a socialist modernity: Housing in Czechoslovakia, 1945-1960 [online]. Russian an. B.m.: University of Pittsburgh Press. ISBN 0822944049. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/09668136.2013.833696>
- ZBOŘIL, Ivan, 2015. Blansko - odstranění objektu Hotelu Dukla - č.p. 1928, projektová dokumentace bouracích prací. Brno: Ing. Ivan Zbořil, Vedlejší 8, 39 221 Brno.
- ZEGA, C. J., Y. A. VILLAGRÁN-ZACCARDI a A. A. DI MAIO, 2010. Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. Materials and Structures/Materiaux et Constructions [online]. 43(1–2), 195–202. ISSN 13595997. Dostupné z: <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9480-4>
- ZEPIKO GROUP, 2019. Betonová kalkulačka. Beton, doprava betonu, čerpání betonu | TRANSBETON [online]. Dostupné z: <http://www.transbeton.cz/betonova-kalkulacka>
- ZHANG, Hong, Xiaodong LI, Heng LI a Fulai HUANG, 2005. Particle swarm optimization-based schemes for resource-constrained project scheduling. Automation in Construction [online]. 14(3), 393–404. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.08.006>
- ZHANG, Yang, Menglei LI a Zhenyuan LIU, 2011. Vehicle scheduling and dispatching of ready mixed concrete. In: Proceedings of 4th International Workshop on Advanced Computational Intelligence, IWACI 2011 [online]. s. 465–472. ISBN 9781612843735. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IWACI.2011.6160052>
- ZHENG, Daisy X. M., S. Thomas NG a Mohan M. KUMARASWAMY, 2004. Applying a Genetic Algorithm-Based Multiobjective Approach for Time-Cost Optimization. Journal of Construction Engineering and Management [online]. 130(2), 168–176. ISSN 0733-9364. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2004\)130:2\(168\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2004)130:2(168))



ZHOU, F., S. M. ABOURIZK a H. AL-BATTAINAH, 2009. Optimisation of construction site layout using a hybrid simulation-based system. *Simulation Modelling Practice and Theory* [online]. 17(2). ISSN 1569190X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2008.09.011>

ZOUEIN, P. P., H. HARMANANI a A. HAJAR, 2002. Genetic Algorithm for Solving Site Layout Problem with Unequal-Size and Constrained Facilities. *Journal of Computing in Civil Engineering* [online]. 16(2). ISSN 0887-3801. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3801\(2002\)16:2\(143\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3801(2002)16:2(143))

## 8. TERMINOLOGIE A DEFINICE

Alkalicko-karbonátová reakce	Reakce alkálií z dolomitových vápenců, která má expanzivní charakter. Ke vzniku trhlin betonu dochází již po 5 letech.
Alkalicko-silikátová reakce	Reakce alkálií s kamenivem, která může způsobit některé formy oxidu křemičitého. V betonech s takovýmto druhem kameniva může dojít ke vzniku trhlin již za 10 let.
Beton z přírodního kameniva	Beton, jehož plnivo tvoří pouze přírodní kamenivo, z angl. natural aggregate concrete.
Beton z recyklovaného kameniva	Beton, jehož plnivo alespoň z části obsahuje recyklované kamenivo, z angl. recycled aggregate concrete.
Brownfields	Lokality a nemovitosti, které byly ovlivněny původním využíváním, které jsou opuštěné nebo nedostatečně využívané.
Celostěnový panelový systém	Konstrukční typ panelových domů, který je tvořen z železobetonových prefabrikovaných panelů, vysokých po celé výšce podlaží.
Datový formát	Způsob reprezentace určité informace v elektronické podobě a její následné interpretace. Definiuje uspořádání dat uvnitř souboru pro jeho čitelnost jinou aplikací.
Datový standard staveb	Smluvní dokument, který stanovuje požadavky objednatele na informační model stavby a v něm obsažená data.
Definice sady vlastností	Property Set Definition, zkráceně PSD, je skupina souvisejících vlastností objektů a stylů objektů, které mají být uvedeny v plánu. Po připojení k objektu nebo jeho stylu se sada vlastností stane kontejnerem pro data vlastností přidružená k objektu
Degradace	Proces, který při kombinaci se synergickým spolupůsobením vnějších podmínek (voda, teplota, agresivita prostředí apod.) způsobí změnu technického stavu určitého materiálu nebo konstrukce.
Dekonstrukční metody / projekty	Způsob likvidace konstrukce, která spočívá v systematické a pečlivé ruční demontáži.
Demolice	Bourání budov a konstrukcí.
Design-Bit-Build	Tradiční metoda dodávky výstavbových projektů, kde projektant přebírá odpovědnost za návrh a zhotovitel se podílí pouze na realizaci stavby.

Design-Build	Tradiční metoda dodávky výstavbových projektů, kde zhotovitel je na základě jednoho kontraktu odpovědný za projektový návrh a jeho následnou realizaci.
Dobývací prostor	Administrativní hranice stanovená pro těžbu nerostů povrchově i dolem.
Downcycling	Termín pro opětovné zpracování materiálu, avšak neplnohodnotným způsobem oproti typické recyklaci. Toto zpracování se vyznačuje nízkým počtem cyklů recyklací daného materiálu.
Drobné kamenivo	(fine aggregate) Kamenivo obsahující zrna maximální velikosti od 0.063 mm do 2 mm.
Engineer-Procure-Construct	Tradiční metoda dodávky výstavbových projektů, kde samostatná řídicí organizace dohlíží na vypracování projektové dokumentace a zajistí rov-něž zhotovení stavby.
Expandokeramzitbeton	Materiál, ze kterého byly vyráběny prefabrikované panely, zpravidla průčelní a okenní.
Exploze	Typ demoliční techniky inženýrského přístupu, kdy za využití výbušnin je konstrukce vymršťena do okolí (opak imploze).
Filer (jako kamenivo)	Kamenivo, jehož většina propadne sítím 0,063 mm, které se může přidat k stavebnímu materiálu pro dosažení jeho určitých vlastností.
Frakce kameniva	Je hrubost drti kameniva, která spočívá v intenzitě mletí či drcení kameniva. Je vyjádřena podle velikosti dolního a horního síta, kterými zrna propadnou.
Hrubé kamenivo	Kamenivo obsahující zrna od 2 do 63 mm.
Hydraulické pojivo	Vazná látka spojující částice jiné tuhé hmoty v celek. Hydrauličita je schopnost tvrdnout pod vodou.
Impoze	Typ demoliční techniky inženýrského přístupu, kdy za využití výbušnin je konstrukce zborcena do vlastního objemu (opak exploze).
JavaScriptový objektový zápis	JavaScript Object Notation, zkráceně JSON, je způsob zápisu dat nezávislý na počítačové platformě, určený pro přenos dat, která mohou být organizována v polích nebo agregována v objektech
JavaScriptový objektový zápis pro propojená data	JavaScript Object Notation for Linked Data, zkráceně JSON-LD, je serializací RDF v syntaxi JSON, umožňující poskytovat jedním způsobem propojená data jak vývojářům, kteří znají pouze JSON, tak vývojářům znalým technologií propojených dat

Jazyk webové ontologie	Web Ontology Language, zkráceně OWL, je sémantický značkovací jazyk určený pro definování, publikování a sdílení ontologií
Jemné částice	Z angl. fines, je kamenivo obsahující zrna do 0.063 mm.
Kamenivo	Zrnitý materiál přírodního nebo umělého původu, určený pro stavební účely. V betonu plní funkci plniva.
Karbonatace betonu	Proces reakce oxidu uhličitého se složkami cementového tmele, především s portlanditem, za vzniku uhličitanu vápenatého.
Keramzitbeton	Lehký beton z uměle vyrobeného keramického kameniva.
Klasifikační systém CCI	Mezinárodní klasifikační systém pro klasifikaci celých stavebních entit (druhů staveb) a dílčích fasad pro vybudované prostory (vnitřní i vnější), technické systémy, konstrukční systémy a sruhy jednotlivých detailních elementů stavby.
Konstrukční beton	Beton, který je použit pro zhotovení nosných konstrukcí a proto vykazuje střední a vyšší pevnostní třídu betonu.
Konstrukční soustava	(typizovaná konstrukční soustava)
Koroze betonu	Proces destrukce materiálu, který vede ke zhoršení vlastností, a dokonce zničení konstrukce. Tento proces může být fyzický, biologický a chemický.
Mateční beton	Z angl. Parental Concrete (PC) nebo též Maternal Concrete, je beton, který je extrahován z původní, již realizované konstrukce a který slouží jako zdrojová surovina pro zpracování a vyhotovení betonového recyklovaného kameniva a následnou směs ke zhotovení recyklovaného betonu.
Metody vícekritériálního rozhodování	Rozhodovací úlohy, v nichž se důsledky rozhodnutí posuzují dle více kritérií
N-Triples	N-Triples je nejpřímochařejší RDF serializace dat vhodná pro účely, kde záleží na jednoduchosti a rychlosti zpracování a nezáleží tolik na lidské čitelnosti a na velikosti dat
Náhrada kameniva	Objemové nebo procentní vyjádření záměny přírodního kameniva za kamenivo recyklované, též nazývána substitute.
Nasákavost	Hmotnost absorbované vody, vyjádřená jako procento hmotnosti v sušárně vysušeného vzorku kameniva (dle ČSN EN 1097-6).
Nativní formát	Specifický formát softwaru použitého pro přípravu dat.
Návrhová životnost	Předpokládaná doba po kterou má být konstrukce užívána pro zamýšlený účel při běžné údržbě, avšak bez podstatné opravy ČSN EN 1990

Nekonstrukční beton	Beton, který je použit pro zhotovení nenosných konstrukcí zpravidla nižších pevnostních tříd betonu.
Objemová hmotnost zrn předem vysušených	Ukazatel, získaný dělením hmotnosti předem vysušeného vzorku kameniva objemem, který zaujímá ve vodě, včetně objemu všech vnitřních uzavřených pórů a objemu všech vodě přístupných pórů (dle ČSN EN 1097-6).
Objemová hmotnost zrn vodou nasáklých a povrchově osušených	Ukazatel, získaný dělením součtu hmotnosti vzorku kameniva vysušeného v sušárně a hmotnosti vody ve všech vodě přístupných pórech objemem, který zaujímá ve vodě, včetně objemu vnitřních uzavřených pórů a objemu vodě přístupných pórů (dle ČSN EN 1097-6).
Objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně	Ukazatel, získaný dělením hmotnosti v sušárně vysušeného vzorku kameniva objemem, který zaujímá ve vodě, včetně objemu všech vnitřních uzavřených pórů a objemu všech vodě přístupných pórů (dle ČSN EN 1097-6).
Panelový dům	Dům vybudovaný pomocí konstrukčního stěnového systému z prefabrikovaných železobetonových panelů. Stavba panelových domů sloužila jako rychlé a levné bydlení, přesto se nikde v západních zemích nestavěly v tak masovém měřítku, jako v bývalém východním bloku Evropy.
Pazderový beton	Beton s plnivem z lněného nebo konopného pazdeří, máčeného v roztoku vodního skla. Pazdeří je odpadním produktem zemědělství. Pazderový beton má objemovou hmotnost $\rho=650 \text{ kg / m}^3$ až $1200 \text{ kg/m}^3$ a součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,093 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ až $0,151 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Jeho nepříznivou vlastností je poměrně velká nasákavost
Pevnostní třída betonu	Označení jakosti betonu podle válcové a krychelné pevnosti v tlaku, zkoušené dle ČSN EN 206-1.
Plán pro nakládání s odpady	(Waste Management Plan) Dokument, který stanovuje souhrn zásad a pravidel pro nakládání s odpady a stanovení jejich identifikace v jednotlivých etapách realizace stavby.
Plán realizace BIM	Dokument, ve kterém se specifikuje plnění požadavků objednatele, případně je konkretizuje a rozvíjí. Jednou z částí BEP je v ideálním případě rovněž CDE, z angl. BIM Execution Plan.
Plnivo	Plnivo v betonu tvoří objemově hlavní složku a je jím kamenivo různých druhů.
Portlandit	Je oxidový minerál. Je to přirozeně se vyskytující forma hydroxidu vápenatého.

Průčelní panely	Panel, umístěný v průčelní stěně panelového domu. Průčelí je zpravidla fasáda, která je více reprezentativní či zdobná. U liniové panelové budovy je to zpravidla fasáda s okenními otvory a vstupem.
Předdemoliční audit	(Pre-demolition Audit) Dokument, ve kterém jsou identifikovány všechny odpadní materiály, které vzniknou během demolice, s uvedením množství, kvality a umístění v budově nebo objektu a následné informace o
Přírodní kamenivo	Kamenivo, získávané těžením z přírodních zdrojů. Rozlišujeme lomové a říční přírodní kamenivo.
Pyknometr	Nádobka určená ke stanovování hustoty kapalin, případně tuhých nenasákavých tělísek. Je založený na tom, že při úplném naplnění a uzavření zábrusovou zátkou s kapilárou pojme vždy stejný, snadno reprodukovatelný objem kapaliny. Hustota kapaliny se pak určuje z její hmotnosti a objemu.
Rámec popisu zdrojů	Resource Description Framework, zkráceně RDF, je obecný rámec dat, která popisují zdrojový dokument tak, že je jeho popis čitelný jak lidsky, tak strojově
Recyklace	Proces nakládání s odpadem, který vede k jeho dalšímu využití. Jedná se o opětovné cyklické využití odpadů a jejich vlastností jako druhotné suroviny ve výrobním procesu.
Recyklované Kamenivo	Kamenivo získané při úpravě anorganického materiálu dříve použitého v konstrukci.
Recyklovaný beton	viz Beton z recyklovaného kameniva
Regenerace	Zlepšování energetických vlastností domů, snižování energetické náročnosti, ale také ve zkvalitňování vnitřního prostředí domů a zvyšování kvality bydlení dle aktuálních standardů a potřeb současné generace.
Rekonstrukce	Fyzický návrat ke staršímu nedochovanému stavu nebo výraz pro znázornění takového stavu.
Revitalizace	Komplexní oprava všech důležitých částí budovy, která zlepší kvalitu bydlení, sníží náklady za energii či prodlouží jeho celkovou životnost.
Rozpon	Rozpětí mezi dvěma konstrukcemi, zpravidla svislými. Udává se pro definování délky překlenutí jinou konstrukcí, zpravidla stropem, průvlakem apod. U panelových budov je rozponem nazýván základní modul konstrukční soustavy
Rozšiřitelný značkovací jazyk	Extensible Markup Language, zkráceně XML, je obecný značkovací jazyk pro účelové značkování různých typů dat

Separace	Roztřídění materiálu dle předem stanovených parametrů. Při likvidaci železobetonových konstrukcí je to například separace výztuže od betonových částí.
Specifikace betonu	Konečná sestava dokumentovaných technických požadavků předaných výrobcí ve formě požadovaných vlastností nebo složení betonu.
Společné datové prostředí	Hlavní zdroj sdílených informací. Prostřednictvím CDE se shromažďují, udržují, sdílí a poskytují informace, včetně veškerých dokumentů pro členy projektového týmu, z angl. Common Data Environment.
Standard pro výměnu dat o produktu	Standard for the Exchange of Product, zkráceně STEP, je standard ISO pro počítačově interpretovatelné zastoupení a výměnu informací o výrobě produktů. Jeho oficiální název je: Automatizační systémy a integrace - Reprezentace a výměna dat o produktech
Stavební a demoliční odpad	Odpad vznikající při stavebních a demoličních činnostech (dle zákona č. 541/2020 Sb., o odpadech)
Struskopemzobeton	Druh betonu vyroben ze zpeněné strusky (odpad při výrobě oceli) o objemové hmotnosti 850 až 1150 kg/m <sup>3</sup> .
Sulfatace betonu	Korozní děj betonu, způsobený působením SO <sub>2</sub> z ovzduší.
Štítové panely	Panel, umístěný ve štítové stěně panelového domu. Průčelí je zpravidla fasáda, která je více reprezentativní či zdobná. U liniové panelové budovy je to zpravidla fasáda s okenními otvory a vstupem.
Terse RDF Triple Language	Terse RDF Triple Language, zkráceně TURTLE, je možný způsob, jak vyjádřit RDF grafy v kompaktní a přirozené textové podobě v uživatelsky přívětivé formě
Top-down demolice	Sekvenční demolice s postupem od shora dolů a jasně definovanými prostředky.
Transportbeton	Beton dodávaný v čerstvém stavu.
Trvanlivost	Trvanlivost je synergií působení použitelnosti, pevnosti a stability po celou dobu návrhové životnosti stavby.
Udržitelná výstavba	Výstavba, která uvádí v soulad environmentální, sociální a ekonomické aspekty při výstavbě a provozu budov.
Udržitelný rozvoj	Způsob rozvoje lidské společnosti, který uvádí v soulad hospodářský a společenský pokrok s plnohodnotným zachováním životního prostředí
Unifikovaný Modelovací Jazyk	Unified Modeling Language, zkráceně UML, je grafický jazyk pro navrhování, specifikování, vizualizaci, a pro dokumentaci počítačových programů.

---

Ústálená hmotnost	Hmotnost, která se při vážení po vysušení trvajícím nejméně 1 h nemění o více než 0,1 % (dle ČSN EN 1097-6).
Vodní součinitel	Poměr určitého obsahu vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu.
Zkušební navážka	Vzorek, který se celý použije při jednotlivé zkoušce (dle ČSN EN 1097-6).
Zrnitost	(grading) Veličina, vyjádřena poměrným zastoupením zrn o určité velikosti v celkovém množství kameniva.



## 9. SEZNAM ZKRATEK A AKRONYMŮ

AP	Assignment problem, přeloženo jako Přiřazovací problém
API	Application Programming Interface, přeloženo jako rozhraní pro programování aplikací
APO	Artificial Plant Optimization, přeloženo jako optimalizace umělou rostlinou
ARP	Arc routing problém, volně přeloženo jako Okružní dopravní úloha
ASR	Alkali-silica reaction, přeloženo jako Alkalicko-křemičitá reakce
ASTM	American Society for Testing and Materials
BA	Bat Algorithm, přeloženo jako netopýří algoritmus
BEP	BIM Execution Plan, přeloženo jako Plán realizace BIM
BFO	Bacterial Foraging Optimization, přeloženo jako optimalizace bakteriálního potravního chování
BIM	Building Information Management nebo též Building Information Model, volně přeloženo jako Informační management/model budovy
BIR	Bureau of International Recycling, volně přeloženo jako Mezinárodní úřad pro recyklaci
BOZP	Bezpečnost a ochrana zdraví při práci
BREAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method, volně přeloženo jako Environmentální posuzovací metoda budov
BS	British Standard, přeloženo jako Britská norma
CARP	Capacitated arc routing problém, přeloženo jako Kapacitní okružní dopravní úloha
CBCSD	Czech Business Council for Sustainable Development, volně přeloženo jako Česká podnikatelská rada pro udržitelný rozvoj
CCAA	Cement Concrete & Aggregates Australia
CDE	Common Data Environment, přeloženo jako Společné datové prostředí
CDm	Cihla děrovaná maloformátová
CIB	Z franc. Conseil International du Batiment, volně přeloženo mezinárodní rada pro výstavbu
CPP	Chinese postman problem, přeloženo jako Problém čínského listonoše
CS	Cuckoo Search, přeloženo jako kukaččí vyhledávání
CSD	Z angl. Commission on Sustainable Development, volně přeloženo jako Komise pro udržitelný rozvoj
CSI	Cement Sustainability Initiative, volně přeloženo jako Iniciativa pro udržitelnost cementu

---

CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
CSLP	Construction Site Layout Planning, přeloženo jako Problém plánování situace staveniště
ČSN	Česká státní norma
ČSÚ	Český statistický úřad
D-B	Design – Build, přeloženo jako Vyprojektovat – postavit
D-B-B	Design – Bid – Build, přeloženo jako Vyprojektovat – nabídnout – postavit
DBF	Dansk Betonforening, volně přeloženo jako Dánská betonářská společnost
DE	Differential Evolution, přeloženo jako diferenciální rovnice
DIN	Deutsches Institut für Normung, přeloženo jako Německý ústav pro průmyslovou normalizaci
DOSS	Dotčené orgány státní správy
DPS	Dokumentace provedení stavby
DSS	Datový standard stavebnictví
DSS	Direct Search, přeloženo jako přímé vyhledávání
EEA	European Economic Area, volně přeloženo jako Evropský hospodářský prostor
EHP	Evropský hospodářský prostor
EN	Evropská norma
EPC	Engineer Procure Construct, přeloženo jako Vyprojektovat – Zadat – Postavit
ERR	Enhanced Entity-Relation, volně přeloženo jako Vylepšený model vztahu mezi entitami
ES	Evolution Strategies, přeloženo jako evoluční strategie
EU	Evropská Unie
FA	Firefly Algorithm, přeloženo jako optimalizace hejnem světlušek
FI	Flakiness Index, přeloženo jako index plochosti
FIDIC	Z franc. Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils neboli angl. International Federation of Consulting Engineers, přeloženo jako Mezinárodní federace konzultačních inženýrů
FPA	Flower Pollination Algorithm, přeloženo jako algoritmus opylení květin
GA	Genetic Algorithms, přeloženo jako genetické algoritmy
Global ABC	Global Alliance for Buildings and Construction, volně přeloženo jako Globální aliance pro budovy a výstavbu
GSO	Group Search Optimizer, přeloženo jako optimalizace skupinového vyhledávání

---

---

GUID	Globally Unique Identifier, přeloženo jako globálně jedinečný identifikátor
HPC	High Performance Concrete, přeloženo jako Vysoce hodnotný beton
HS	Harmony Search, přeloženo jako harmonické vyhledávání
HTTP	Hypertext Transfer Protocol, přeloženo jako hypertextový přenosový protokol
IFC	Industrial Foundation Classes
iiSBE	International Initiative for a Sustainable Build Environment, volně přeloženo jako mezinárodní iniciativa pro udržitelnou výstavbu
IWD	Intelligent Water Drops Algorithm, přeloženo jako algoritmus inteligentních kapek
JSON	JavaScript Object Notation, přeloženo jako JavaScriptový objektový zápis
JSON-LD	JavaScript Object Notation for Linked Data, volně přeloženo jako JavaScriptový objektový zápis pro propojená data
KPÚ	Krajský projektový ústav (již neexistující organizace)
LA	Los Angeles index
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design, volně přeloženo jako Vedení v oblasti energetického a environmentálního navrhování
LP	Linear Programming, přeloženo jako lineární programování
MCDM	Multiple-criteria decision-making
MCS	Multiple criteria solver
MILP	Mixed-Integer Nonlinear Programming, přeloženo jako smíšené celočíselné lineární programování
MINLP	Mixed-Integer Linear Programming, přeloženo jako smíšené celočíselné nelineární programování
MSPS	Model skutečného provedení stavby
MŽP	Ministerstva životního prostředí ČR
NA	Natural Aggregate, volně přeloženo jako přírodní kamenivo
NAC	Natural Aggregate Concrete, volně přeloženo jako beton z přírodního kameniva, nebo též přírodní beton
NLP	Nonlinear Programming, přeloženo jako nelineární programování
NN	Neural Networks, přeloženo jako neuronové sítě
NWRA	National Waste & Recycling Association, volně přeloženo jako Národní asociace pro odpady a recyklaci
ODD	Oven-dried particle density, přeloženo jako objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně

---

---

ON	Oborová norma
ÖNORM	Österreichische Normen, přeloženo jako Rakouská národní norma
OSN	Organizace spojených národů
OWL	Web Ontology Language, přeloženo jako Jazyk webové ontologie
PC	Parental Concrete nebo též Maternal Concrete, volně přeloženo jako Mateční nebo mateřský beton
PM	Project Management, přeloženo jako projektové řízení nebo též projektový management
PN	Podniková norma
PPP	Public Private Partnership, přeloženo jako Partnerství veřejného a soukromého sektoru
PSD	Property Set Definition, volně přeloženo jako Definice sady vlastností
PSO	Particle Swarm Optimization, přeloženo jako optimalizace hejnem částic
PSP	Project Scheduling Problem, přeloženo jako Problém časového plánování
RAC	Recycled Aggregate Concrete, volně přeloženo jako beton z recyklovaného kameniva, nebo též recyklovaný beton
RCA	Recycled Concrete Aggregate, volně přeloženo jako kamenivo z recyklovaného betonu, nebo též recyklované kamenivo
RDF	Recourse Description Framework, přeloženo jako Rámec popisu zdrojů
RDS	Realizační dokumentace stavby
RILEM	Z franc. Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages, angl. International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, volně přeloženo jako Mezinárodní unie laboratoří a expertů v oblasti stavebních materiálů, systémů a konstrukcí
RMA	Recycled Masonry Aggregates, volně přeloženo jako Recyklát z cihelného zdiva
SA	Simulated Annealing, přeloženo jako simulované žíhání
SBE	Sustainable Build Environment, volně přeloženo jako Udržitelná výstavba nebo Udržitelné výstavbové prostředí
SBTool	Sustainable Building Tool
SDO	Stavební a demoliční odpad
SFLA	Shuffled Frog Leaping Algorithm, přeloženo jako optimalizace skákajícími žábami
SIA	Schweizerische Ingenieur und Architektenverein, přeloženo jako Švýcarský společenost inženýrů a architektů

---

---

SIA	Swarm Intelligence, přeloženo jako heno částic
SNIM	Standard negrafických informací modelu
SSDD	Saturated and surface-dried particle density, přeloženo jako objemová hmotnost zrn vodou nasáklých a povrchově osušených
STEP	Standard for the Exchange of Product, volně přeloženo jako Standard pro výměnu dat o produktu
TCRO	Time-cost-resource optimization, přeloženo jako Optimalizace času a nákladů na zdroje
TCTO	Time-cost trade-off, volně přeloženo jako Časově-nákladové porovnání
TDS	Technický dozor stavebníka
TP	Transport problém, přeloženo jako Dopravní problém
TS	Tabu Search, přeloženo jako zakázané hledání
TSP	Traveling salesman problém, přeloženo jako Problém obchodního cestujícího
TURTLE	Terse RDF Triple Language,
UEPG	Union Européenne des Producteurs de Granulats, volně přeloženo jako Evropská asociace producentů kameniva
UML	Unified Modeling Language, přeloženo jako Unifikovaný Modelovací Jazyk
UNEP-SBCI	United Nations Environment Programme – Sustainable Building and Climate Initiative, volně přeloženo jako program spojených národů pro životní prostředí – iniciativa pro udržitelné budovy a klima
UUID	Universal Unique Identifier, přeloženo jako univerzální jedinečný identifikátor
VRP	Vehicle routing problém, přeloženo jako Problém dopravních tras
WA	Water absorption, přeloženo jako Nasákavost
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development, volně přeloženo jako Světová podnikatelská rada pro udržitelný rozvoj
WRAP	Waste and Resources Action Programme, volně přeloženo jako Akční program pro odpady a zdroje
WSA	Wolf Search Algorithm, přeloženo jako vlčí algoritmus
XML	Extensible Markup Language, přeloženo jako Rozšiřitelný značkovací jazyk

---

## 10. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Surovinový přehled EU .....	30
Obr. 2 Diagram pro rozhodování o odpadu versus vedlejším produktu .....	31
Obr. 3 Příklad znázornění vzniku odpadů na začátku a konci životnosti stavby .....	32
Obr. 4 Celkový tok zpracování stavebních a demoličních odpadů .....	35
Obr. 5 Management stavebního a demoličního odpadu .....	36
Obr. 6 Podíl typů kameniva v rámci produkce 39 států EU .....	40
Obr. 7 Národní produkce kameniva Evropských států v roce 2016 .....	40
Obr. 8 Národní produkce recyklovaného kameniva Evropských států v roce 2016 .....	41
Obr. 9 Vliv tržní hodnoty recyklovaného kameniva v závislosti na tržní hodnotě přírodních zdrojů dle UPEG .....	42
Obr. 10 Normově povolená náhrada hrubého přírodního kameniva recyklovaným ze známého zdroje pro beton C 20/25, XC1 v jednotlivých státech .....	52
Obr. 11 Normální rozložení ODD a SSDD .....	55
Obr. 12 CT 3D scan analýza kameniva (2D řezy): přírodního a recyklovaného .....	56
Obr. 13 Klasifikace kameniva na základě vztahu mezi nasákavostí a objemovou hmotností. 57	
Obr. 14 Křivky hustoty pravděpodobnosti účinku zatížení S a odolnosti konstrukce R s vyznačenou oblastí možného vzniku poruchy .....	66
Obr. 15 Schéma investičního cyklu .....	68
Obr. 16 Model poškozování konstrukce v čase .....	70
Obr. 17 Změna technického stavu v závislosti na době provozu .....	71
Obr. 18 Životní cyklus stavebního objektu .....	74
Obr. 19 Vývojový diagram metodického rámce nakládání s recyklovaným kamenivem - 1. část .....	100
Obr. 20 Vývojový diagram metodického rámce nakládání s recyklovaným kamenivem - 2. část .....	101
Obr. 21 Schéma chronologického postupu funkčních modulů optimalizačního modelu .....	115
Obr. 22 Dekonstrukce objektu hotelu Dukla v Blansku: Transport panelu při využití metody shora-dolů (top-down) .....	146
Obr. 23 Dekonstrukce objektu hotelu Dukla v Blansku: Demontované a odstrojené obvodové a vnitřní stěnové panely určené k separaci .....	146

Obr. 24 Ukázka dokumentu <i>Podnikové spotřební normy materiálu HSV</i> .....	147
Obr. 25 Ukázka dokumentu <i>Podnikové spotřební normy materiálu HSV</i> .....	148
Obr. 26 Průřezy vzorků matečního betonu.....	149
Obr. 27 Průběh drcení na frakci 0-62 mm v areálu recyklačního střediska Moravostav a.s..	150
Obr. 28 Fotografie rozdrcených a prosetých vzorků RCA-01 a RCA-02 .....	151
Obr. 29 Křivka zrnitosti pro zkušební vzorek RCA-01 .....	155
Obr. 30 Křivka zrnitosti pro zkušební vzorek RCA-02.....	155
Obr. 31 Grafické porovnání nasákavosti W-24 kameniv NA, RCA-01 a RCA-02.....	156
Obr. 32 Pevnost v tlaku na krychlích směsi RAC-01-40 ve srovnání s NAC a EN normou .	159
Obr. 33 Pevnost v tlaku na krychlích směsi RAC-02-40 ve srovnání s NAC a EN normou .	159
Obr. 34 Případová studie –Výzkumné centrum CEITEC, vizualizace, celý areál .....	166
Obr. 35 Případová studie –Výzkumné centrum centra CEITEC, BIM model v prostředí Autodesk Revit, objekt A .....	165
Obr. 36 Mapa s pozicemi externích betonáren splňující kritérium dojezdového času pro objekt v rámci případové studie.....	168
Obr. 37 Mapa s pozicemi interních betonáren vyrábějící recyklovaný beton a splňující kritérium dojezdového času pro objekt v rámci případové studie.....	169
Obr. 38 Mapa optimálního řešení s pozicemi interních a externích betonáren ve vztahu k umístění objektu řešené stavby a dopravních tras .....	173
Obr. 39 Mapa s dopravními trasami optimálního řešení s pozicemi interních a externích betonáren ve vztahu k umístění objektu řešené stavby a dopravních tras .....	174
Obr. 40 Výsledkový graf – prvek č. 1 o objemu 0,2 m <sup>3</sup> – optimální řešení interních a externích dodavatelů betonu.....	180
Obr. 41 Výsledkový graf – prvek č. 12 o objemu 2,4 m <sup>3</sup> – optimální řešení interních a externích dodavatelů betonu.....	181
Obr. 42 Výsledkový graf – prvek č. 37 o objemu 7,4 m <sup>3</sup> – optimální řešení interních a externích dodavatelů betonu.....	182
Obr. 43 Výsledkový graf – prvek č. 41 o objemu 8,2 m <sup>3</sup> – optimální řešení interních a externích dodavatelů betonu.....	183

## 11. SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Podíl produkce recyklovaného a přírodního kameniva v EU v roce 2016 .....	39
Tab. 2 Maximální procento nahrazení hrubého kameniva (% hmotnosti).....	51
Tab. 3 Kategorie složek hrubého recyklovaného kameniva, upraveno dle .....	51
Tab. 4 Lokalizace typů panelových soustav - rozdělená podle krajů ČSR.....	64
Tab. 5 Informativní návrhové životnosti dle Tabulky 2.1 normy ČSN EN 1990.....	68
Tab. 6 Vyhodnocení obsahu jemných částic pro frakci 0–4mm.....	108
Tab. 7 Příklad vstupní matice konstrukčního prvku .....	117
Tab. 8 Příklad vstupní matice seznamu externích betonáren.....	118
Tab. 9 Příklad vstupní matice seznamu interních betonáren .....	118
Tab. 10 Příklad vstupní matice seznamu externích betonáren.....	118
Tab. 11 Příklad vstupní matice ceníků interních betonáren (struktura listu betonárny).....	119
Tab. 12 Příklad vstupní matice cen dopravy z externích betonáren .....	120
Tab. 13 Platformy pro hledání dodavatelů betonu.....	121
Tab. 14 Geoprostorová vstupní data .....	122
Tab. 15 Vrácená data z Google Maps API pomocí Python skriptu .....	122
Tab. 16 Příklad základního 64 znakového kódování IFC-GUID.....	143
Tab. 17 Složení různých typů prefabrikovaných betonových panelů.....	149
Tab. 18 Chemické složení a typ cementu, použitého v experimentu pro výrobu RAC.....	152
Tab. 19 Fyzikální a mechanické vlastnosti RCA a NA, komplexní přehled výsledků.....	153
Tab. 20 Porovnání fyzikálních a mechanických charakteristik hrubého RCA s příslušnými normovými požadavky.....	154
Tab. 21 Návrh betonové směsi s kamenivem RCA a NA.....	157
Tab. 22 Pevnost v tlaku pro směsi RAC-01-40 a RAC-02-40.....	158
Tab. 23 Pevnost v tahu za ohybu na hranolech pro směsi RAC-01-40 a RAC-02-40.....	160
Tab. 24 Jednotkové tržní ceny kameniva.....	160
Tab. 25 Jednotkové tržní ceny cementu a záměsové vody .....	160
Tab. 26 Seznam parametrů pro charakterizaci betonových prvků v BIM modelu pro datový formát IFC dle definice SNIM .....	162
Tab. 27 Rozšíření parametrů pro charakterizaci RAC prvků v BIM pro datový formát IFC	162
Tab. 28 Zkrácená ukázka vstupních dat z BIM modelu – seznam konstrukčních prvků .....	170



Tab. 29 Zkrácená ukázka vstupní matice – Seznam externích betonáren .....	171
Tab. 30 Zkrácená ukázka vstupních dat pro jednu betonárnu – matice cen ext. betonáren ...	171
Tab. 31 Zkrácená ukázka vstupních dat– matice cen dopravy externích betonáren .....	171
Tab. 32 Vstupních data – seznam interních betonáren .....	171
Tab. 33 Zkrácená ukázka vstupních dat pro jednu betonárnu – matice interních betonáren .	172

## 12. SEZNAM ROVNIC A VZTAHŮ

Rovnice 1 Závislost mezi nasákavostí a množstvím starého cementového tmele, vázaného k zrnům recyklovaného kameniva .....	56
Rovnice 2 Vztah mezi nasákavostí a objemovou hmotností recyklovaného kameniva .....	57
Rovnice 3 Obecná rovnice karbonatace betonu .....	72
Rovnice 4 Obecný vztah optimalizačního problému .....	87
Rovnice 5 Stanovení procenta zachyceného kameniva dílčí frakce .....	106
Rovnice 6 Stanovení celkového zbytku na síť .....	107
Rovnice 7 Stanovení celkového propadu dílčím sítím .....	107
Rovnice 8 Vztah mezi k-modulem a D-modulem pro křivku zrnitosti kameniva .....	107
Rovnice 9 Vztah pro k-modul dle Abramse .....	107
Rovnice 10 Vztah pro D-modul dle Rothfuchse .....	107
Rovnice 11 Stanovení obsahu jemných částic ve vzorku kameniva .....	108
Rovnice 12 Stanovení charakteristické hodnota $F$ křivky zrnitosti dle Hummela .....	108
Rovnice 13 Logaritmický tvar křivky zrnitosti .....	108
Rovnice 14 Vztah pro stanovení tvarového indexu $SI$ .....	109
Rovnice 15 Stanovení zdánlivé objemové hmotnosti $\rho_a$ .....	109
Rovnice 16 Stanovení objemové hmotnosti navážky vysušené v sušárně $\rho_{rd}$ .....	109
Rovnice 17 Stanovení objemové hmotnosti navážky nasycené a povrchově osušené $\rho_{ssd}$ .....	109
Rovnice 18 Vztah pro výpočet nasákavosti kameniva .....	110
Rovnice 19 Vztah pro stanovení součinitele Los Angeles $LA$ .....	110
Rovnice 20 Fullerova rovnice pro stanovení poměru hrubé a jemné frakce ve směsi .....	111
Rovnice 21 Základní rovnice absolutních objemů .....	111
Rovnice 22 Vztah pro výpočet mezerovitosti kameniva .....	112
Rovnice 23 Vztah pro stanovení jednotkové ceny čertsvé směsi recyklovaného betonu ....	112
Rovnice 24 Vztah pro jednotkovou cenu přírodního kameniva všech frakcí ve směsi .....	113
Rovnice 25 Vztah pro výpočet ceny dle dopravního pásma za autodomíchávač .....	129
Rovnice 26 Vztah pro výpočet ceny dle daného dopravního pásma za objem betonu .....	130
Rovnice 27 Stanovení nákladů na dopravu dle dopravního pásma za autodomíchávač .....	131
Rovnice 28: Stanovení celkové ceny za beton, dodávaný externím dodavatelem .....	132
Rovnice 29 Stanovení celkové ceny za beton, dodávaný interním dodavatelem .....	135

## 13. PŘÍLOHY

### 13.1. SYNOPTICKÝ PŘEHLED NORMATIVNÍCH POŽADAVKŮ NA RECYKLOVANÉ KAMENIVA

(vlastní zpracování na základě tabulek a přehledů z uvedených zdrojů)

Země / norma (příručka)	Třída dle normy / označení / využití	Náhrada přírodního kameniva recyklátem [hmotnostních % kameniva]	Obsah fileru v kamenivu [%]	Přípustná pevnost v tlaku betonu (28 dní) [MPa]	Objemová hmotnost kameniva $\rho_{rd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Nasákavost kameniva [%]	Zdroj
Česká republika / ČSN EN 206+A1 (2018); ČSN EN 12620+A1 (2008)	Typ A (hrubé kamenivo)	≤ 50 % (pro X0)	nespec. možné kategorie (< 63μm) jsou:	nespec.	≥ 2000	nespec. (avšak hodnota musí být určena, vč. uvedení střední hodnoty)	(CEN 2016; 2008)
	Typ B (hrubé kamenivo)	≤ 50 % (pro X0)	≤ 4... f <sub>4</sub> > 4... f <sub>deklarovaná</sub>	≤ C30/37	≥ 2000		
RILEM / ISO 6783; ISO 7033	RMA Typ I	≤ 100 %	≤ 3 (< 63μm)	C16/20	≥ 1500	≤ 20	(RILEM 1994; Rao et al. 2019a; de Brito a Nabajyoti 2013; Pepe 2015b)
	RCA Typ II		≤ 2 (< 63μm)	C50/60	≥ 2000	≤ 10	
	RCA Typ III (namícháno)	≤ 20 % (≤ 10 % RMA; ≥ 80 % NA)	≤ 2 (< 63μm)	nespec.	≥ 2400	≤ 3	
Velká Británie / BS 8500-2; BS EN 206-1 (2000)	RA	≤ 100 % RMA	≤ 3 (< 63μm)	pro betony GEN 0 až GEN 3: C6/8 až C16/20	≥ 2000	–	(Pepe 2015b; Rao et al. 2019a; BRE Ltd. 1998)
	RCA	≤ 20 % (≤ 5% RMA)	≤ 5 (< 63μm)	pro betony RC20/25 až RC40/50: C20/25 až C40/50		–	

Země / norma (příručka)	Třída dle normy / označení / využití	Náhrada přírodního kameniva recyklátem [hmotnostních % kameniva]	Obsah fileru v kamenivu [%]	Přípustná pevnost v tlaku betonu (28 dní) [MPa]	Objemová hmotnost kameniva $\rho_{rd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Nasákavost kameniva [%]	Zdroj
Velká Británie / BRE Digest 433	RCA (I)	nespec. (až 100% RMA)	10 % písku může být nahrazeno (zrna nezachycena normovým sítem s okem 5mm nejsou doporučena)	≤ C16/20 až C35/45 (dle obj. hmotnosti)	< 2000 pro C20/25 < 2000 pro C35/45	± 1%	(BRE Ltd. 1998)
	RCA (II)	nespec. (až 10% RMA)		C50/60	C50/60	± 5%	
	RCA (III)	≤ 20 % (větší množství nutno ověřit) (až 50% RMA)		nespec.	nespec. pro 20% RCA (III) + 80% NA		
Německo / DIN 4226-100; DIN 1045-2; DIN EN 206-1; DAfStb	Typ 1 RA	≤ 10 % (25 až 45*)	nespec. / avšak min. průměr 2 mm	C30/37	≥ 2000	≤ 10	(Pellegrino a Faleschini 2016; McNeil a Kang 2013)
	Typ 2 RA	≤ 30 % (25 až 35*)				≤ 15	
	Typ 3 MRA	≤ 80 %			≥ 1800	≤ 20	
	Typ 4 směs RA a MRA	≤ 20 %			≥ 1500	nespec.	
Itálie / DM 14/01/2008	nekonstrukční	≤ 100 %	–	C8/10	–	–	(Martinelli et al. 2017; Pepe 2015b; Pellegrino a Faleschini 2016)
	konstrukční	≤ 30 %	–	C30/37	–	–	
		≤ 60 %	–	C20/25	–	–	
	prefabrikáty	≤ 15 %	–	C 45/55	–	–	
	prefabrikáty > C45/55	≤ 15 %	–	stejná jako původní beton	–	–	
Belgie / COPRO PTV 406; CRIC TRA 550	GBSB-I	≤ 20 %	< 5	C 16/20	≥ 1600	< 18	(Ministry of Public Works 2010; de Brito a Nabajyoti 2013; Tam a Tam 2008)
	GBSB-II		< 3	C30/37	> 2100	< 9	
	RCA	≤ 20 %	–	C40/50		–	

Země / norma (příručka)	Třída dle normy / označení / využití	Náhrada přírodního kameniva recyklátem [hmotnostních % kameniva]	Obsah fileru v kamenivu [%]	Přípustná pevnost v tlaku betonu (28 dní) [MPa]	Objemová hmotnost kameniva $\rho_{rd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Nasákavost kameniva [%]	Zdroj
Nizozemí / NEN 5905; PTV 406	MRA	–	–	C16/20	≥ 2000 ( $p_{ssd} \geq 1100$ )	–	(de Brito a Nabajyoti 2013; Pellegrino a Faleschini 2016)
Norsko / Nb 26	Typ 1 (RCA)	nespec.	nespec.	nespec.	≥ 2000	< 10	(de Brito a Nabajyoti 2013; Karlsen et al. 2002)
	Typ 2 (MRA)	nespec.	nespec.	nespec.	≥ 1500 ( $p_{ssd} \geq 1800$ )	< 20	
Dánsko /	GP1 testováno	≤ 20 %	(zrno < 4 mm)	C40/50	≥ 2200 (95% betonu)	–	(de Brito a Nabajyoti 2013; Hansen a RILEM TC37 1992)
		≤ 100 %	(zrno > 4 mm)			–	
	GP1 netestováno	–	–	–	–	–	–
	GP2	–	–	C 20/30	≥ 1800 (95% betonu + cihelné složky)	–	–
Švýcarsko / OT 70085; SIA 162/4; SIA 2030	Klasifikovaný beton – Scénář A	20% hrubého; 20% jemného (pro vnější konstrukce)	nespec.	C25/30	–	–	(de Brito a Nabajyoti 2013; Rao et al. 2019a)
		Klasifikovaný beton – Scénář B	20% hrubého (pro vnější konstrukce);		C 25/ 30	–	
		25% hrubého; 20% jemného (pro vnitřní konstrukce);		C 30/37	–	–	
		35% hrubého; 20% jemného (pro vnitřní konstrukce);		C 20/30	–	–	
		≤ 100 (pro drobné komponenty)		C 15/20	–	–	

Země / norma (příručka)	Třída dle normy / označení / využití	Náhrada přírodního kameniva recyklátem [hmotnostních % kameniva]	Obsah fileru v kamenivu [%]	Přípustná pevnost v tlaku betonu (28 dní) [MPa]	Objemová hmotnost kameniva $\rho_{rd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Nasákavost kameniva [%]	Zdroj
	Klasifikovaný beton – Scénář C	100% hrubého (pro vnitřní konstrukce);		C 30/37	–	–	
	Neklas. Beton - Scénář A	100% betonového recyklátu (s obsahem cementu 150 až 230 kg/m <sup>3</sup> )			–	–	
		100% smíšeného recyklátu (s obsahem cementu < 150 kg/m <sup>3</sup> )			–	–	
Portugalsko / LNEC E 471; NP EN 12620	ARB 1	≤ 25 % (≤ 100% pro nevyztužené nekonstrukční betony)	≤ 4	C 40/50 (pro X0, XC1 až XC4, XS1, XA1)	≥ 2000	≤ 7	(de Brito a Nabajyoti 2013)
	ARB 2	≤ 20 % (≤ 100% pro nevyztužené nekonstrukční betony)		C 35/45			
	ARC	≤ 100% pro nevyztužené nekonstrukční betony	≤ 3	–			
Španělsko / EHE-08	d/D-T-R**	≤ 20 %	≤ 1,5 (< 0.063 mm; obsah částic menších 4mm ≤ 5%)	C 40/50	≥ 2300 (prostý beton) ≥ 2500 (vyztužený beton)	≤ 7	(Rao et al. 2019a; Ministry of Public Works 2010)
Čína / DG/TJ07-008	Typ 1	–		–	≥ 2400	≤ 7	(Rao et al. 2019a)
	Typ 2	–		–	≥ 2200	≤ 10	
	Level 1 (hrubé kam.)	–	< 1	nespec.	≥ 2450	< 3	

Země / norma (příručka)	Třída dle normy / označení / využití	Náhrada přírodního kameniva recyklátem [hmotnostních % kameniva]	Obsah fileru v kamenivu [%]	Přípustná pevnost v tlaku betonu (28 dní) [MPa]	Objemová hmotnost kameniva $\rho_{rd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Nasákavost kameniva [%]	Zdroj
Čína / GB/T 25177-2010	Level 2 (hrubé kam.)	–	< 2	C 40/50	≥ 2350	< 5	
	Level 3 (hrubé kam.)	–	< 3	C 25/30	≥ 2250	< 8	
Hong Kong / WBTC 12	nekonstrukční	≤ 100 %	≤ 4	C25/30 až C30/37	≥ 2000	≤ 10	(Rao et al. 2019a)
	konstrukční	≤ 20 %		14 C20/25			
USA / ASTM C33; ASTM 125-14	nespec.	≤ 20 %	nespec.	nespec.	–	–	
		≤ 100 %	nespec.		–	–	
Japonsko / JIS A5021; JIS A 5021:2011	Typ H (hrubé)	nespec.	≤ 1	< 45	≥ 2500	≤ 3	(Pellegrino a Faleschini 2016)
	Typ H (jemné)		≤ 5			≤ 3,5	
	Typ M (hrubé)		≤ 1	–	≥ 2300	≤ 5	
	Typ M (jemné)		≤ 7		≥ 2200	≤ 7	
	Typ L (hrubé)		≤ 1	–	nespec.	≤ 7	
	Typ L (jemné)		≤ 7	–		≤ 13	
Austrálie / CSIRO H155 (2002); CCAA (2008)	Class 1A Grade 1	≤ 30 %	pouze hrubé 4-32mm	≤ 40	–	–	(CCAA 2008; Pellegrino a Faleschini 2016; Pepe 2015b)
	Class 1A Grade 2	≤ 100 %	pouze hrubé 4-32mm	≤ 40	–	–	
	Class 1B Grade 2	≤ 100 %		≤ 25	–	–	
Brazílie / ABNT NBR 15116	ARC hrubé	nespec.	≤ 7 (<75 $\mu$ m)	≤ 15	nespec.	≤ 7	
	ARC jemné		≤ 15 (<75 $\mu$ m)			≤ 12	

<b>Země / norma (příručka)</b>	<b>Třída dle normy / označení / využití</b>	<b>Náhrada přírodního kameniva recyklátem [hmotnostních % kameniva]</b>	<b>Obsah fileru v kamenivu [%]</b>	<b>Přípustná pevnost v tlaku betonu (28 dní) [MPa]</b>	<b>Objemová hmotnost kameniva <math>\rho_{rd}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Nasákavost kameniva [%]</b>	<b>Zdroj</b>
	ARM hrubé		≤ 10 (<75 $\mu$ m)	nespec.	nespec.	≤ 12	(Alaejos et al. 2013; de Brito a Nabajyoti 2013; Rao et al. 2019a)
	ARM jemné		≤ 20 (<75 $\mu$ m)	nespec.		≤ 17	

Pozn.:

\* Dle stupně vlivu prostředí;

\*\* Specifické označování kameniva dle EHE-08: d/D = minimální a maximální velikost zrn;

T: Drcené kamenivo;

R: Recyklované kamenivo;

nespec.: Normativní dokument parametr nespecifikuje nebo není striktním požadavkem;

–: Informaci se nepodařilo dohledat;

NA: Přírodní kamenivo;

RA / RCA: Recyklované kamenivo obecné / z betonové drtě;

MRA: Namíchané recyklované kamenivo z betonové drtě a z cihelné drtě;

RMA: Recyklované kamenivo z cihelné drtě;

$\rho_{rd}$ : Objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně;

$\rho_{ssd}$ : Objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených



## 13.2. PŘEHLED MATEMATICKÝCH OPTIMALIZAČNÍCH PROBLÉMŮ

(vlastní zpracování dle uvedených zdrojů)

Oblast	Optimalizační problém	Popis řešeného problému	Zdroj
Problémy s optimalizačními zdroji	Přiřazovací problémy (Assignment Problem – AP)	AP se zabývá otázkou, jak přiřadit daný počet agentů, kde každý agent může být přiřazen k provedení jakékoli úlohy, což generuje určité náklady, které se mohou měnit v závislosti na přiřazení agenta k úloze. Všechny úkoly by měly být provedeny přiřazením právě jednoho agenta ke každé úloze, a právě jednoho úkolu každému agentovi tak, aby byly minimalizovány celkové náklady na přiřazení.	(Kuhn 1955)
	Problém časového plánování (Project Scheduling Problem – PSP)	PSP představuje celou řadu problémů, které jsou obvykle shrnuty do jedné dominantní účelové funkce pro minimalizaci celkových nákladů projektu. Jsou-li rozšířeny o účelové funkce pro minimalizaci času a nákladů projektu, jsou známy jako problémy kompromisů s časovým nákladem (time-cost trade-off problems – TCTO), a pokud jsou zahrnuty i optimalizace dalších zdrojů, jsou identifikovány jako problémy s optimalizací časových nákladů (time-cost-resource optimization problems – TCRO).	(Cemeli et al. 1993)
	Dopravní problém (Transportation Problem – TP)	TP je definován jako program pro řešení přepravy zboží z více zdrojů do více destinací s účelovou funkcí pro minimalizaci nákladů dopravy. TP obecně představuje problém s optimalizací toku materiálu. Z pohledu formulace TP jsou náklady na dopravu, množství nabídky a poptávky často označovány jako vstupní parametry, zatímco transportní toky představují rozhodovací proměnné.	(Sachs et al. 1988)
Problémy s optimalizací rozvržení a trasy	Okružní dopravní úloha (Arc Routing Problem – ARP)	ARP je reprezentován daným připojeným grafem, sestaveným ze dvou sad bodů (start a cíl), pro které je nutné najít uzavřenou cestu, která proběhne každou cílovou hranou alespoň jednou, nebo určí, že taková trasa neexistuje.	(Golden et al. 2008)
-	Kapacitní okružní dopravní úloha (Capacitated Arc Routing Problem – CARP)	CARP má za cíl nalézt několik rozvozů tak, aby každý okruh s pozitivní poptávkou byl obsluhován přesně jedním vozidlem, zatímco součet poptávky těchto okruhů, obsluhovaných každým vozidlem, nepřesáhne danou kapacitu a celkové náklady na rozvoz je minimalizován.	(Golden a Wong 1981)

---

<b>Oblast</b>	<b>Optimalizační problém</b>	<b>Popis řešeného problému</b>	<b>Zdroj</b>
-	Problém Čínského listonoše (Chinese Postman Problem – CPP)	CPP je definován spojeným nepřímým grafem se známou maticí vzdáleností a problémem je najít takovou trasu, která prochází každou hranou alespoň jednou nejkratším možným způsobem.	(Mei-Ko 1962)
-	Problém obchodního cestujícího (Traveling Salesman Problem – TSP)	TSP byl definován jako problém optimalizace obchodního zástupce, který potřebuje cestovat z místa bydliště na každé místo určení uvedené v seznamu a po provedení všech návštěv se vrátit do místa bydliště, přičemž bere v úvahu cíle nejkratší celková trasa nebo minimální celková doba cesty.	(Flood 1956)
-	Problém směřování vozidla (Vehicle Routing Problem – VRP)	VRP je definován jako problém pro optimální nasměrování "flotily" identických vozidel z centrálního výchozího místa do zásobované destinace se známými požadavky, podléhajícími omezením kapacity vozidla.	(Dantzig a Ramser 1959)

---

### 13.3. PŘEHLED HEURISTICKÝCH OPTIMALIZAČNÍCH PŘÍSTUPŮ, ZAMĚŘENÝCH NA DOPRAVNÍ PROBLÉMY PŘI REALIZACI STAVEB

(vlastní zpracování dle uvedených zdrojů)

Rok zveřejnění publikace	Popis řešeného problému	Metody, modely a nástroje	Hlavní nálezy a závěry	Zdroj
2004	Najít způsob, jak dodávat čerstvý beton, aby dorazil k cíli včas, a to s jakýmkoliv zpožděním.	Autoři kombinovali hybridní evoluční algoritmus (GA) s konstruktivní heuristikou pro řešení výroby a dodávky s časovými omezeními předčasné a opožděné dodávky.	Tato metoda ukazuje, že množství žádostí, které jsou přesměrovány na externí společnosti nebo které potřebují dodatečně najaté automobily pro jejich dodání, je obecně velmi malé ve srovnání s jinými strategiemi plánování a rovněž umožňuje definovat bezpečnostní rozpětí pro minimalizaci vlivů zpoždění dopravy. Celkové náklady na řešení získané pomocí GA jsou o 20 % nižší než náklady při využití nejbližšího dodavatele.	(Naso et al. 2004)
2005	Najít způsob, jak vyřešit objednávky od klientů, kteří jsou z různých výrobních center a poskytování těchto příkazů v časových oknech.	Autoři použili kombinaci GA, která řeší problém s konkrétním doručením a algoritmy ACO (ant colony optimization = optimalizace mravenčí kolonií), což řeší problém s přidělením dopravního prostředku.	Tyto metody používané v různých experimentálních situacích výrazně snižují konkrétní náklady na doručení betonu, náklady na dopravu. ACO algoritmus je schopen najít řešení, které je o 20 % lepší než řešení nalezené heuristikou. Toto zlepšení však bylo dosaženo za drastického navýšení výpočetního času.	(Silva et al. 2005)
2006	Tento článek navrhuje uplatnění přístupu distribuovaného řízení k konkrétnímu dodavatelskému u řetězci.	Bylo použito spojení dvou problémů, a to přiřazení pracovního střediska a kombinatorických problémů při přiřazení dopravního prostředku. Kontrola každého subsystému je optimalizačním problémem řešeným meta-heuristickou optimalizací a kolonií mravenců (ACO).	Výkon distribučního algoritmu je o méně než 10% lepší než hybridní ACO, resp. přibližně o 20% méně než hybridní přístup GA. Zlepšení o 10 % znamená průměrné úspory nákladů o 5000 měnových jednotek.	(Faria et al. 2006)

<b>Rok zveřejnění publikace</b>	<b>Popis řešeného problému</b>	<b>Metody, modely a nástroje</b>	<b>Hlavní nálezy a závěry</b>	<b>Zdroj</b>
2007	Vývoj realtime platformy pro podporu rozhodování při zpracování operací dodávky čerstvého betonu.	Integraci systému sledování vozidel, algoritmu simulace diskrétních událostí a algoritmu evoluční optimalizace byla vyvinuta platforma pro podporu rozhodování vytvořená speciálně pro zpracování operací čerstvého betonu.	Systém představuje novou simulační aplikaci založenou na dynamických datech ve stavebním inženýrství a řízení a má vysoký potenciál ke zvýšení efektivity nákladů na stavební práce, správu logistiky a řízení vztahů se zákazníky v oblasti obchodu s betonem. Jeden z problémů, který je třeba řešit v budoucnu, je to, že nejistá a neopakovatelná povaha skutečného systému stavebních operací ztěžuje validaci stochastické systémové simulace na krátkodobém základě.	(Naso et al. 2007)
2008	Tento článek se zabývá problematikou logistického rozdělení vozidel. To znamená optimalizaci rozvrhu distribučních vozidel.	Autoři vytvořili vylepšený hybridní genetický algoritmus zavedením nového křížícího operátoru RC. Tento algoritmus byl vytvořen spojením genetického algoritmu a algoritmu kolonie. Porovnání algoritmu proběhlo s Hopfieldovým algoritmem, algoritmem SA a vylepšeným třífázovým algoritmem.	Výsledky výzkumu ukazují, že tento postup je velmi účinný při řešení rozvrhu distribučních vozidel. Autoři se snaží minimalizovat jízdní vzdálenosti vozidel, které mají plné kapacity. V porovnání celkové vzdálenosti mezi algoritmy byla tato metoda nejlepším výsledkem.	(Ren 2008)
2009	Článek se zabývá problémem směřování vozidel. Autoři naplánovali trasy vozidel s betonem během jednoho pracovního dne od betonáren až po konkrétní staveniště.	Autoři tento problém řešili mnoha způsoby. Použili model MIP, lokální vyhledávací model, genetický algoritmus, algoritmus k-nejbližších sousedů. MIP je nasazeno pro hlavní problém a další algoritmy pro sub-problémy.	Autoři vytvořili místní vyhledávací model, který pracuje v dobré kvalitě. V praxi tento model prozatím nelze využít, protože není schopen reagovat na změny, které v průběhu dne běžně v praxi nastávají, jako jsou změny objednávek či zpoždění. Model lze použít pro krátký základní plán, mlže být časem rozšířen o možnosti zpoždění dodávky.	(Asbach et al. 2009)

Rok zveřejnění publikace	Popis řešeného problému	Metody, modely a nástroje	Hlavní nálezy a závěry	Zdroj
2010	Problémem je nalezení řešení, jakým způsobem rozdělit čerstvý beton na stavenišť.	Autoři řešili tento problém kombinací přesného matematického algoritmu a algoritmu k-nejbližších sousedů. Přesná metoda je založena na smíšeném celočíselném programování (MILP).	Výsledky byly příznivé zejména při řešení středně velkých problémů, což jsou problémy, které se vyskytují ve velkém množství v rakouských společnostech. V případě, že společnost je větší, řešitel obvykle sdruží max. pět betonáren a stanoví sdružený plán pro daný den.	(Schmid et al. 2010)
2009	Článek se zabývá problémem nejkratší cesty. Jedná se o problém, který představuje mnoho dalších problémů při konstrukci grafů, které by měly například ukázat nejkratší vzdálenost trasy nebo nejnižší výdaje.	Autor použil dva algoritmy, kterými jsou Dijkstrův algoritmus a algoritmus minimálního označování.	Výsledky ukazují, že algoritmus minimálního označování je mnohem jednodušší než algoritmus Dijkstra. Konzistence mezi výsledky výpočtu dvou algoritmů ukazuje korekci minimálního značkovacího algoritmu.	(Jin et al. 2009)
2009	Tento článek se zabývá problematikou logistického rozdělení otevřeného dopravního systému, což je hlavní krok k jeho optimalizaci. Jedná se o efektivní využití vozidel jejich nosnost a také vzdálenosti, které jsou zbytečně dlouhé.	Byl použit hybridní genetický algoritmus s vylepšeným křížením.	Ze studie vyplývá, že hybridní genetický algoritmus je stabilnější a dosahuje lepších výsledků než klasický GA.	(Chunyu et al. 2009)

Rok zveřejnění publikace	Popis řešeného problému	Metody, modely a nástroje	Hlavní nálezy a závěry	Zdroj
2011	Článek je zaměřen na problematiku směrování vozidel Min-Max (MMVRP)	S ohledem na složitost MMVRP byl vytvořen model MMVRP a byl navržen algoritmus zakázaného hledání (TABU search) pro jeho vyřešení.	Experimenty ukázaly, že tento algoritmus může dosáhnout nejen lepších výsledků, ale i lepší výpočetní efektivity. Algoritmus může rozšířit rozsah vyhledávání řešení; vyhnout se místní optimalizaci, aby byla zajištěna různorodost řešení. Celkově ani nemůže rozptylovat řešení pro zpomalování konvergenční rychlosti, ani nemůže řešení překonat do lokální optimalizace.	(Ren 2011)
2011	Cílem tohoto příspěvku je představit přístup ke zlepšení provozu výroby betonu a snížit náklady na celý proces jeho dodávky.	Autoři formulovali matematický model s využitím GA.	V příspěvku byla představena problematika dispečinku betonové směsi a byl formulován matematický model. Zejména je zdůrazněn integrovaný pohled na dispečink nákladních vozidel i čerpadel, protože tyto dva typy vozidel jsou v součinnosti a nemohou být samostatně provozovány. Vedle plánovací sekvence a kritických časových bodů je důležitým cílem ověřit provoz čerpadel. Do budoucna by se více práce mělo věnovat zdokonalení a optimalizaci jak modelu, tak simulace. Ke zvýšení efektivity a přesnosti by do řešení měly být zahrnuty další algoritmy, jako jsou kombinační algoritmy.	(Zhang et al. 2011)
2012	Studie je zaměřena na problematiku kapacitního směrování vozidel (CVRP).	Vzhledem ke složitosti oblasti CVRP byl v článku zaveden model a vytvořen algoritmus k jeho řešení.	Navržený genetický algoritmus má mnohem vyšší rychlost konvergence, snadněji se dostává do dílčí optimální stability. Proto má větší praktický význam a hodnotu a také šetří náklady a tím zvyšuje ekonomický profit.	(Chunyu 2012)
2013	Vývoj kapacitního směrování vozidel VRP.	V článku byla vyvíjena matematická formulace pro VRPTW (Vehicle routing problem with time windows) a dále navržen zdokonalený genetický algoritmus pro jeho efektivní řešení.	Článek, vycházející z tradičního genetického algoritmu, přidává časové omezení k zajištění realizace algoritmu v reálném čase. Jedná se o strategické kódování přirozených čísel, které přetvoří genetický algoritmus tak, aby vyhovoval potřebám odlišných typů poptávky.	(Baker a Ayechev 2003)

Rok zveřejnění publikace	Popis řešeného problému	Metody, modely a nástroje	Hlavní nálezy a závěry	Zdroj
2014	Problém dodávky betonové směsi skupině poptávajících zákazníků.	Autoři vyvinuli matematickou formulaci k řešení dopravního problému s celočíselnými proměnnými. Cílem je uspokojení poptávky maximálního počtu zákazníků s minimálními náklady na dopravu.	V příspěvku byla představena nová formulace pro dispečerský problém čerstvého betonu, který usiluje o nalezení nejlevnějších tras pro zajištění obsluhy maximálního počtu zákazníků, přičemž respektuje trasové a časové omezení. Navrhovaná formulace zvolňuje plánovací omezení a zajišťuje optimální přiřazení vozidel zákazníkovi tak, aby vyhovoval časovým potřebám každého zákazníka.	(Rey et al. 2014)
2014	Příspěvek se soustřeďuje na logistickou a distribuční část operace: trasování a dopravy čerstvého betonu.	Autoři představují tři alternativní matematické modely, založené na MIP. Dále navrhuji dva heuristické přístupy k řešení. První využívá efektivní konstruktivní postup a druhý se opírá o model MIP.	Práce představuje obecnější verzi dopravního problému betonu, který má silnou podobnost se dvěma studovanými problémy: Problémem s plánováním paralelních strojů a problémem s kapacitou trasování vozidel. Jsou navrženy nové přesné heuristické a hybridní řešení. Model MIP se zdá být neúčinný při řešení velkých problémových instancí, ale může být použit k výpočtu hranic. Programování s omezujícími podmínkami je na druhou stranu vysoce efektivní při hledání kvalitních řešení v poměrně malém čase nebo ke zlepšení stávajících plánů. Pokud je výpočetní čas omezujícím faktorem, heuristická metoda nejstrmějšího spádu (Steepest-Descent) je výhodná.	(Kinable et al. 2014)
2015	Problém dodávky čerstvého betonu skupině poptávajících zákazníků.	V příspěvku je představen nový Lagrangianův relaxační přístup k řešení RMCDP (Ready mixed concrete dispatching problems)	Bylo zkoumáno řešení RMCDP pomocí Lagrangianova relaxačního algoritmu. Problém může nastat použitím MIP, což úzce souvisí s VRP, s tím rozdílem, že v provozním období mohou být zákaznické uzly navštívené vícekrát. Nový algoritmus Lagrangianovy relaxace byl implementován na realistických příkladech s výbornými výsledky. Dualizovaná MIP byla schopna najít globální optimum.	(Narayanan et al. 2015)

<b>Rok zveřejnění publikace</b>	<b>Popis řešeného problému</b>	<b>Metody, modely a nástroje</b>	<b>Hlavní nálezy a závěry</b>	<b>Zdroj</b>
2016	Vývoj algoritmu generování sloupců k řešení problému s trasováním vozidel (VRP) s omezeními tzv. časových oken, které se vztahují k problémům s dispečinkem.	Byl navržen matematický model založený na metodě generování sloupců (Column Generation) technice pro řešení problému dispečinku s časovým oknem i bez něj. Metoda Dantzig-Wolfe byla použita k reformulování problému a následně k řešení v rámci dvoufázového postupu.	Navrhovaná metoda byla porovnána s IP (Integer Programming) a MIP (Mixed Integer-Programming). Pro hodnocení byla použita reálná databáze patřící k aktivnímu RMC (Ready Mix Concrete) a z dostupných dat bylo vybráno náhodně devět instancí různých velikostí. Počet nepřřižených zákazníků navrhovanou metodou v situacích s časovým oknem i bez něj je nulový.	(Maghrebi et al. 2016)
2016	Autoři vyvinuli model pro strategické plánování dopravy, a to zejména v oblasti vývoje nákladních terminálů a návrhu sítě meziregionální nákladní dopravy.	Příspěvek představil model, který pomůže efektivně rozšířit systém multimodální sítě nákladní dopravy. Obsahuje GLS (genetic local search), což je evoluční výpočetní technika založená na GA pro řešení diskrétního problému návrhu sítě.	Předběžné výsledky testů s dopravní sítí v západní Jávě v Indonésii ukázaly, že pokud je velikost dopravní sítě relativně velká a vyhledávací prostor je poměrně malý, může GLS nabídnout nejlepší výkon mezi testovanými postupy na bázi GA a TS, s ohledem na jeho robustnost a rychlejší schopnost vyhledávání.	(Yamada et al. 2009)



## 13.4. PŘEHLED MATEMATICKÝCH OPTIMALIZAČNÍCH PŘÍSTUPŮ, ZAMĚŘENÝCH NA PROBLÉMY OPTIMALIZACE ZDROJŮ PŘI REALIZACI STAVEB

(vlastní zpracování dle uvedených zdrojů)

Rok zveřejnění publikace	Popis řešeného problému	Metody, modely a nástroje	Hlavní nálezy a závěry	Zdroj
1997	Problém Time-Cost Trade-Off (TCTO) pro projekt s osmnácti aktivitami.	Autoři vyvinuli nový algoritmus pomocí GA a Paretova přístupu.	Představený nový algoritmus prokázal účinnost i přesnost při řešení problému prohledáním pouze malého zlomku celkového prostoru pro vyhledávání. Autoři také vyvinuli počítačový program TCGA, který využívá Microsoft Excel a který automatizuje provádění navrhovaného algoritmu.	(Feng et al. 1997)
1999	Problém TCTO generovaný šestnácti stavebními projekty, složený z jedenácti aktivit.	Systém GA se strojovým učením (Machine learning GA system – MLGAS).	Předchozí analytické techniky omezovaly použití GA kvůli nutnosti manuálního vytváření časově-nákladových křivek pouze v lineárním vztahu. MLGAS překonává tato omezení začleněním metody strojového učení do GA.	(Li et al. 1999)
1999	Multi-objektivní optimalizace alokace a vyrovnání zdrojů na projektu případové studie s dvaceti aktivitami a šesti zdroji.	Autor použil GA pomocí Microsoft Visual Basic (VBA).	Byly zaznamenány hlavní přínosy zmíněného přístupu: efektivní zlepšení heuristiky alokace zdrojů pomocí priorit náhodných aktivit; praktická modifikace heuristiky při vyrovnávání zdrojů pomocí dvojmomentového přístupu; multi-objektivní optimalizace alokace a vyrovnání zdrojů pomocí GA.	(Hegazy 1999)

Rok zveřejnění publikace	Popis řešeného problému	Metody, modely a nástroje	Hlavní nálezy a závěry	Zdroj
2000	Problém s vyrovnáním zdrojů stavebního projektu s devíti činnostmi s více dostupnými zdroji s cílem minimalizovat variabilitu využití zdrojů za podmínek pevné doby projektu.	Systém vyrovnávání zdrojů založený na GA (GA based resource levelling system – GARLS).	Model GARLS se nutně nemusí zavázat k žádnému konkrétnímu heuristickému pravidlu, proto je flexibilnější pro řešení složitých problémů s vyrovnáváním a plánováním. GARLS poskytuje několik proveditelných nebo téměř optimálních řešení, která mohou poskytnout více dostatečných informací pro rozhodování o projektu. V této studii autoři úspěšně použili nejrozumnější software pro implementaci GARLS (tj. MS Project, MS Access, MS Excel a VBA). Jako doporučení pro další vývoj autoři navrhuji úpravy modelu pro řešení problémů TCTO.	(Leu et al. 2000)
2001	Problém opakovaného plánování se sdílenými omezeními zdrojů pro případ výroby prefabrikátů.	GA založené na zdrojově omezeném modelu opakovaného plánování pomocí využití VBA.	Autoři poukázali na to, že jejich model zahrnuje efektivní výpočetní techniku pro alokaci prostředků a vhodnější způsob modelování sdílení prostředků v opakovaném plánování ve srovnání s technikou lineárního plánování. Model založený na GA nemusí páchat žádná konkrétní heuristická pravidla, a je tedy flexibilnější. Model opakovaného plánování založený na GA může prozkoumat a využít několik téměř optimálních řešení, která obecně nejsou poskytována konvenčními technikami opakovaného plánování.	(Leu a Hwang 2001)
2001	Problém opakovaného plánování projektu se skládal ze čtyř podobných sekcí nebo jednotek a každá z nich zahrnuje opakované aktivity s vazbou konec-začátek bez časových prodlev.	Automatizovaný model založený na formulaci dynamického programování.	Bylo zjištěno, že jelikož je model automatizovaný, zmírňuje tak potřebu, aby uživatel před plánováním poskytl libovolnou sadu vektorů přerušení. Kromě toho racionálním způsobem významně snižuje počet vektorů přerušení, čímž je optimalizační proces proveditelný a umožňuje generování optimálního řešení.	(El-Rayes a Moselhi 2001)

Rok zveřejnění publikace	Popis řešeného problému	Metody, modely a nástroje	Hlavní nálezy a závěry	Zdroj
2004	Plánování zdrojů a problém TCTO projektu výstavby s dvanácti aktivitami a předpokladem, že neexistují žádná omezení prioritních vazeb mezi následujícími aktivitami.	Rozšířený model vyrovnání zdrojů pomocí Lagrangeova GA.	Navrhovaný model umožňuje jakékoli lineární nebo nelineární funkce pro prezentaci vztahů náklady – doba trvání a zdroj – doba trvání. Model je prezentovaný jako schopný zvládnout širokou škálu velikostí projektů, včetně velkých stavebních projektů, zahrnujících velké množství aktivit. Model byl efektivně implementován v programovacím jazyce FORTRAN za účelem řešení problémů s plánováním zdrojů v několika stavebních projektech.	(Senouci a Eldin 2004)
2004	Multi-objektivní problém TCTO, který bere v úvahu adaptivní váhy kritérií optimalizace na případové studii, sestávající se ze sedmi aktivit.	Model založený na GA s upraveným přístupem adaptivní vah kritérií.	Autoři uvádějí, že tento přístup propůjčuje GA větší svobodu hledání v multi-objektivním prostoru, který překonává nevýhody TCTO s jediným objektem. Protože však model používá GA z hlediska vyhledávače, mohla by jeho náhodnost ovlivnit spolehlivost výsledků.	(Zheng et al. 2004)
2005	Zdrojem omezený PSP (neboli RCPSP) s cílem minimalizovat dobu trvání projektu.	Metaheuristická metoda založená na PSO.	Na základě výpočtových analýz autoři uvádějí, že permutační PSO překonává prioritně-orientovanou PSO a že metodika založená na PSO má dobrý výkon, podobný jiným metaheuristickým metodám jako GA nebo SA při řešení RCPSP.	(Zhang et al. 2005)
2009	Stochastický multi-objektivní TCRO problém s časovými a nákladovými proměnnými, považovanými za fuzzy.	Stochastický model optimalizace pro více objektů za využití nedominovaných třídících GA (NSGA-II).	Představený model vylepšuje dříve vyvinuté přístupy ke stanovení vah kritérií tím, že využívá trojrozměrných Paretoovou front. Rovněž využívá FS k začlenění nejistot času a přímých nákladů při projektové fázi a je schopen zohlednit různé úrovně nejistoty změnou úrovní $\alpha$ -řezu. Autoři navrhli další vývoj modelu zaměřit na poskytnutí možnosti rozdělení činností v modelu.	(Zahraie a Tavakolan 2009)

Rok zveřejnění publikace	Popis řešeného problému	Metody, modely a nástroje	Hlavní nálezy a závěry	Zdroj
2010	PSP pro případy vícesměnných stavebních projektů s cílem minimalizovat dobu trvání projektu, náklady a negativní dopady večerních a nočních směn.	Optimalizační model sestává ze tří modulů: i) inicializační modul pro plánování optimalizačních výpočtů; ii) plánovací modul iii) multi-objektivní modul GA	Bylo prokázáno, že model je schopen vyhodnotit a identifikovat optimální systémy řazení pro projekt s jedním záběrem a rovněž vytvořit optimální kompromisní řešení při minimalizaci doby trvání projektu, nákladů a využití pracovní síly na večerních a nočních směnách, kde každé řešení identifikuje optimální harmonogram a pracovní plán s více směnamí pro každou činnost. Kromě toho model generuje optimální plány pro distribuci omezené dostupnosti pracovních sil mezi ostatní směny, aby se minimalizovaly negativní dopady pracovních omezení na výkon projektu.	(Jun a El-Rayes 2010)
2011	Nelineární kvadratický AP (tzv. QAP) umístění věžového jeřábu a umístění materiálu.	MILP model.	Na základě numerického příkladu autoři zjistili, že výsledky získané MILP jsou lepší než výsledky získané pomocí GA. Bylo dosaženo snížení celkových nákladů na dopravu materiálu o 7 %. Kromě toho bylo zjištěno, že formulace MILP je pružnější, pro zahrnutí dalších sad návrhových omezení k dosažení skutečných podmínek umístění.	(Huang et al. 2011)
2012	Nelineární diskrétní TCTO (NDTCTO) probléms menostrací na projektu sestávajícího se z dvacetidevíti aktivit.	MINLP model.	Navrhovaný model je složitější a vyžaduje vyšší analytické a výpočetní úsilí než model MILP. Autoři však poznamenali, že výhoda modelu MINLP-NDTCTO ve vztahu k modelu MILP spočívá v jeho schopnostech modelování. Navrhovaný model poskytuje přesné optimální řešení NDTCTP, zatímco heuristické modely vypočítávají pouze přibližné optimální řešení.	(Klanšek a Pšunder 2012)
2014	PSP pro modulární konstrukci lešení.	Multi-objektový omezený optimalizační model založený na diskrétním FA (tzv. DFA).	Výsledky prokázaly důvěryhodnost optimalizačního modelu vytvořením lepšího řešení alokace pracovní síly z důvodu časové a nákladové rovnováhy.	(Liu et al. 2014)

<b>Rok zveřejnění publikace</b>	<b>Popis řešeného problému</b>	<b>Metody, modely a nástroje</b>	<b>Hlavní nálezy a závěry</b>	<b>Zdroj</b>
2015	TCTO problém projektu s menším počtem aktivit, významných pro projekt.	Metoda PSO pro optimalizaci globálních diagramů kritických cest pomocí programovacího prostředí MATLAB.	Autoři úspěšně použili metodu PSO pro optimalizaci realizace stavebních projektů. Navrhovaný model poskytuje dobré výsledky a představuje několik výhod ve srovnání s metodami založenými na použití simplexních algoritmů pro lineární programování a jinými tradičními metodami matematického programování.	(Praščevič a Praščevič 2015)
2016	NDTCTO problém stavebního projektu při nekonvexních nákladech.	MINLP model.	Bylo zjištěno, že optimalizace MINLP pro zpracování nekonvexních závislostí snižuje úsilí uživatele při práci s velkými daty a při aktualizaci modelu v případech, že dojde ke změně okolností, za kterých byl původně project plánován. Použití nelineárních výrazů může umožnit kompaktnější formulaci modelu a také rychlejší provádění úloh správy modelu, jako je transformace dat do parametrů a modifikací modelu.	(Cajzek a Klanšek 2016)
2016	Problém AP a problem optimálního přidělování zdrojů na několika současně probíhajících projektech.	Binární simulační model multi-objektového scénáře.	Model se osvědčil jako užitečný nástroj pro řešení problémů malého a středního rozsahu. Je přizpůsobitelný změnám vstupních dat. Rovněž umožňuje srovnání optimálních a neoptimálních scénářů s odpovídajícími výstupními daty.	(Galić et al. 2016b)
2016	PSP za omezených nákladů.	MINLP model.	Navrhovaný model MINLP bere v úvahu nákladovou účelovou funkci, obecná omezení prioritních vazeb, omezení doby trvání projektu, logické podmínky a omezení nákladů.	(Klanšek 2016)
2016	TP pro horké asfaltové směsi.	Evoluční algoritmus pro řešení s více kritérii (tzv. MCS).	Výsledky prokázaly, že evoluční algoritmus MCS je užitečným nástrojem k řešení řešeného problému. Stále však vyžaduje úpravy, aby se vyřešily problémy ve velkém měřítku a aby se do nich začlenily i ostatní vstupní parametry, které úzce souvisejí s dílčími procesy v řetězci.	(Galić et al. 2016a)

## 13.5. PŘEHLED MATEMATICKÝCH OPTIMALIZAČNÍCH PŘÍSTUPŮ, ZAMĚŘENÝCH NA PROBLÉMY OPTIMALIZACE ROZVRŽENÍ A TRAS PŘI REALIZACI STAVEB

(vlastní zpracování dle uvedených zdrojů)

Popis řešeného problému	Metody, modely a nástroje	Hlavní nálezy a závěry	Zdroj
Plánování přístupových cest pro velká vozidla na průmyslových stavbách.	Systém plánování trasy byl dosažen pomocí expertního systému Nexpert Object a geografického informačního systému (GIS) Arc/Info ve spojení s balíčkem Microstation, tabulkovým editorem Excel a dalšími vlastními programy.	Autoři zdůrazňují, že uživatel může použít předložený systém k přístupu k informacím, požadovaným pro výběr parametrů pro modifikaci, úpravu vybraných parametrů a testování výsledků modifikace. Další možný rozvoj autoři spatřují ve vývoji v oblasti nejistoty modelu a schopnosti identifikovat oblasti rizik na potenciálních trasách, kvantifikaci preferencí uživatele pomocí fuzzy-logického přístupu nebo reprezentaci strategií a znalostí, potřebných pro modifikaci scénáře s cílem usnadnit přístup do sítě.	(Varghese a O'Connor 1995)
Problém plánování situace staveniště (CSLP) s cílem minimalizovat náklady na dopravu materiálu.	GA generuje počáteční populaci rozvržení prostřednictvím sekvence mutačních operací a vyvíjí rozvržení této populace prostřednictvím posloupnosti genetických operací, zaměřených na nalezení optimálního rozvržení.	Autoři prezentují jako klíčovou vlastnost navrhovaného algoritmu fakt, že používá velké množství různých operátorů GA ke změně pozic objektů v rámci staveniště. Operátory GA jsou naprogramovány v takovém pořadí, aby šance na nalezení proveditelné pozice pro vybraný blok byla maximalizována a sice pomocí funkce, která vyhledá a uloží sady proveditelných pozic pro každý vybraný objekt. Další klíčovou vlastností je, že v každé generaci zachovává chromozomy představující částečná řešení rozložení. Tyto takzvané „špatné“ chromozomy byly zachovány, aby pomohly evolučnímu procesu dostat se z lokálních optim.	(Zouein et al. 2002)
Časové plánování, plánování zdrojů a optimalizační problém nákladů velkých výstavbových projektů a při jejich údržbě, které zahrnují více distribuovaných stavenišť s cílem najít optimální sadu konstrukčních metod a tras mezi staveništi.	Autoři navrhli model distribuovaný lánovací model plánování (DSM), který pomocí GA určuje optimální sadu konstrukčních metod a optimální pořadí tras mezi staveništi.	Pro možnost rozhodnout o vhodné technologii a rozumném a proveditelném seznamu zařízení, která mají být zahrnuta do programů městské výstavby/údržby, byl systém DSM shledán jako nezbytný doplňkový nástroj pro podporu skutečného provádění těchto projektů ve smyslu nákladově efektivního způsobu. Přínosem je možnost stanovení počtu pracovních čt a jejich podrobného plánu. Další přínos je ve studiích analýzy citlivosti, související s určením nejvhodnější doby pro zahájení provádění a možnost poskytnout dynamické prostředí, potřebné ke splnění omezení a rozhodnout o správných nápravných opatřeních během provádění.	(Hegazy et al. 2004)

<b>Popis řešeného problému</b>	<b>Metody, modely a nástroje</b>	<b>Hlavní nálezy a závěry</b>	<b>Zdroj</b>
Logistický a dispečerský problém, vznikající při činnostech v rámci odstraňování následků katastrof. Jendá se o problém, rozložený na sestavení trasy vozidla a multikomoditní expediční problém.	Meta-heuristická metoda optimalizace kolonií mravenců (ACO), která rozkládá původní problém logistiky záchranných složek na dvě postupné fáze a iterace mezi nimi.	Ve srovnání s řešením CPLEX je kvalitního řešení získaného pomocí ACO dosaženo za minute výpočetního času, což je přijatelné pro uživatele v reálné nouzi za nepřetržité nejistoty a informační dynamiky. Místní meta-heuristiky založené na místním vyhledávání, jako je tabu vyhledávání, však potřebují další studium, aby prokázaly účinnost pro tento typ problému. Je třeba poznamenat, že zavedení lokálního vyhledávání do postoptimalizačního postupu nezvyšuje celkovou účinnost řešení, i když se v procesu zlepšuje kvalita některých provizorních řešení. Výpočtové výsledky naznačují, že tento přístup pomocí rozkladu může být efektivní pro další složité kombinatorické problémy se vzájemně závislými rozhodovacími proměnnými.	(Yi a Kumar 2007)
Problém se zpožděním a plánováním provozu na základě chování účastníků silničního provozu při změně trasy.	Mikrosimulační model, který využívá týmový ACO (tzv. TACO) k hledání téměř optimálního harmonogramu s využitím simulačního softwaru VISSIM.	Výsledky ukazují, že navrhovaný model může výrazně snížit celkové dopravní zpoždění. Ve srovnání s jinými matematickými metodami vyžaduje mikroskopická simulace více výpočetního času, ale je blíže situaci v reálném čase, díky čemuž je predikce a odhad spolehlivější.	(Lee 2009)
VRP autodomíchavačů betonu během pracovního dne od betonáren až po konečné zákazníky a naopak.	Kombinace MILP s obecným přístupem k místnímu vyhledávání s využitím CPLEX.	Bylo prokázáno, že obecný řešitel MILP je pro řešení problému velkého modelu v reálném čase nedostatečný. Aby bylo možné vyřešit velké dopravně trasovací problémy, autoři jej zkombinovali s přístupem lokálního vyhledávání. Navrhovaný přístup je založen na předpokladu, že všechna vstupní data jsou k dispozici v době výpočtu řešení. Autoři jej proto navrhuji jako užitečný nástroj pro základní plán.	(Asbach et al. 2009)
Simulační systém rozložení staveniště (CSLP) pro realizaci tunelů.	Integrovaný simulační systém, zahrnující složité vyhledávání a GA s využitím platformy Symphony.	Bylo zjištěno, že navrhovaný simulační systém lze snadno rozšířit tak, aby vyhovoval více disciplínám a strategiím pro dosažení pokročilejších výstupů. Vyvinutý modelovací systém umožňuje odborníkům v tunelování vytvořit model a experimentovat s různými scénáři bez pokynů vývojáře.	(Zhou et al. 2009)
Dynamický, multi-objektový CSLP s nerovnoměrnou oblastí.	Max – Min Ant Systém (MMAS) a Paretově upravený ACO algoritmus. Ve fázi hodnocení a výběru je využita intuitivní fuzzy metoda TOPSIS.	Výkon rozhodovacího systému CSLP byl ověřen na případové studii bytového domu. Ukázalo se, že je to užitečný nástroj, který pomáhá projektovým manažerům a projektantům navrhovat jejich staveniště podle více protichůdných cílů nebo při stanovení většího množství shodných cílů. Rovněž pomáhá uživatelům navrhnout rozložení staveniště s přihlédnutím k dalším kvalitativním faktorům, jako je dobrý přehled a kontrola.	(Ning et al. 2011)

<b>Popis řešeného problému</b>	<b>Metody, modely a nástroje</b>	<b>Hlavní nálezy a závěry</b>	<b>Zdroj</b>
VRP modelovaný jako multi-kapacitní ARP s časovými okny (MTCARPTW).	MTCARPTW byl transformován do metody TSP za účelem použití heuristického algoritmu ACO.	Výsledky naznačují, že navrhovaný přístup účinně pracuje s MTCARPTW, obsahujícím méně než padesát uzlů, což přináší dobré řešení během krátké výpočetní doby. Autoři doporučují, že budoucí studie by měly prozkoumat rozšíření současného problému do sítí praktické velikosti, aby bylo možné prozkoumat, zda algoritmus ACO překonává všechny známé heuristiky na MTCARPTW, a také uvádějí nutnost zkoumat, jak zvýšení typů služeb změní účinnost algoritmu.	(Huang a Lin 2012)
CSLP jako problém s rozvržením umístění věžového jeřábu a s optimalizací nabídky a poptávky materiálu.	Autoři porovnali relativní výkon PBA, PSO a BA při řešení zmíněného problému.	Bylo prokázáno, že PBA celkově fungoval lépe než ostatní dva algoritmy. Ačkoli PBA funguje dobře při optimalizaci umístění věžových jeřábů, tento algoritmus není schopen minimalizovat provozní náklady s ohledem na kapacitu odběrného místa a místa požadavku pro rozsáhlé problémy.	(Lien a Cheng 2014)
Problém s nabídkou a dodávkou čerstvého betonu.	Autoři porovnali robustní GA a generování sloupců (CG) pro řešení reálných problémů různých velikostí.	Na výsledcích bylo prokázáno, že CG poskytuje řešení s v průměru o 20% nižšími náklady. Robustní GA však konverguje o 40% rychleji než CG. Počet nepřirazených zákazníků pro obě techniky je téměř stejný.	(Maghrebi et al. 2014)
Problém s nabídkou a dodávkou čerstvého betonu.	Autoři představili model simulačního scénáře pomocí softwaru Enterprise Dynamics.	Předkládaný model je považován za užitečný nástroj pro řešení diskretních malých a středních problémů v rámci dodávek čerstvé betonové směsi. Model poskytuje optimální řešení a také soubor suboptimálních řešení, která zlepšují rozhodovací proces. Závislost modelu na webových mapách však omezuje jeho použitelnost.	(Galić a Kraus 2016)



## 13.6. VYUŽITÍ AKTIVNÍHO BIM PŘÍSTUPU PRO PŘÍŘAZOVACÍ PROBLÉMY A PROBLÉMY ROZVRŽENÍ

(vlastní zpracování dle uvedených zdrojů)

Rok zveřejnění publikace	Popis řešeného problému	Metody, modely a nástroje	Hlavní nálezy a závěry	Zdroj
2003*	AP pro hledání optimálních pozic dočasných zařízení v CSLP.	Autoři vyvinuli nový algoritmus pomocí GA na CAD platformě	Článek dospěl k závěru, že samotný GA nezajišťuje optimální řešení CSLP, ale může dosáhnout téměř optimálního řešení. Minimalizací účelové funkce GA plní komplexní úkol přidělování dočasných zařízení stavenišť na pozice odpovídající pravidlům jejich vzájemných odstupů.	(Osman et al. 2003)
2005*	AP pro optimalizaci umístění jeřábů a příslušenství.	Pro nalezení optimálního umístění jeřábů a příslušenství byla použita metoda za využití GA.	Významné časové úspory lze dosáhnout použitím modelu GA pro umístění jeřábů na staveništi. Pro generování modelu GA se ukázalo být užitečné nastavení dvou typů chromozomů. První chromozom označuje kód polohy jeřábu, zatímco druhý označuje počet jeřábů. V budoucnu lze model rozšířit o integraci a hybridizaci modelu, založených na GA s obohacením o 3D vizualizace.	(Khalil a Jean-Claude 2005)
2010*	CSLP pro projekty rozšíření letišť.	Nástroj s GA, založeném na optimalizaci více cílů za účelem maximalizovat bezpečnost stavby, bezpečnost letového provozu, související se stavbou a zajistit maximální úroveň zabezpečení při minimalizaci nákladů.	Výsledky byly generovány a vizualizovány pomocí softwarových systémů CAD. Autoři dospěli k závěru, že přístup je užitečný pro plánování rozvržení zařízení stavenišť a přispívá k pokroku v optimalizaci plánování rozvržení stavenišť při projektech rozšíření letišť. Aplikovaný 2D model však obsahuje omezení a následující výzkum bude možné zaměřit více na 3D modelování.	(Khalafallah a El-Rayes 2011)
2014	CSLP založený na BIM s ohledem na skutečné dopravní trasy.	GA byl použit ke generování dynamického modelu CSLP. Jako nástroj BIM byl použit Autodesk Revit a pro časové plánování byl použit Microsoft Project. Byl vyvinut vlastní software pro čtení tabulky v aplikaci Microsoft Excel.	Výsledky prokázaly, že optimalizace založená na lineární vzdálenosti, které byly využity, aby se minimalizovaly přepravní vzdálenosti pracovníků pracoviště, by mohla vést k vytvoření neoptimálních rozvržení. Proto byla využita skutečná vzdálenost dopravní trasy. Metoda vygenerovala rozvržení, které snížilo celkové dopravní vzdálenosti na staveništi o 16,5%. Budoucí výzkum tohoto modelu může vzít v potaz integraci 4D simulací.	(Cheng a Kumar 2014)

2015	Automatizovaný model CSLP pro přetížená staveniště, založený na BIM.	Byl využit GA ke generování dynamických modelů rozvržení staveniště. Výpočty byly založeny na údajích z BIM.	Byly prezentovány výsledky variant s úsporou (Kumar a Cheng 2015) přibližně 13,5% skutečných dopravních vzdáleností v rámci staveniště ve srovnání s konvenčními metodami. Autoři dospěli k závěru, že konvenční algoritmus, který v procesu optimalizace využívá přímé vzdálenosti, není dostatečný. Model obsahuje potenciál pro rozšíření o plány výstavby v reálném čase a modely logistiky materiálu.
2015	Automatizovaný model CSLP pro optimalizaci nákladů na staveništi, založený na BIM	Byly zkombinovány BIM, RFID a GA za účelem optimalizace generování rozvržení staveniště v reálném čase.	Z výsledků bylo vyvozeno, že vyvinutý systém, (Akanmu et al. 2016) který používal výpočetní genetické algoritmy a BIM model, byl schopen automaticky sledovat dočasná zařízení a modelovat dostupné prostory staveniště ve vztahu k optimálním nákladům.
2014; 2015	AP pro generování optimálního umístění věžového jeřábu.	K automatickému generování množství materiálů, potřebného k jeho přepravě, byla využita aplikace BIM. Pro nalezení optimálního umístění věžových jeřábů a přípojných a odběrných míst byla použita optimalizace založená na FA.	Bylo zjištěno, že k vytvoření schématu (Wang et al. 2014; 2015) rozvržení věžových jeřábů na staveništi pomocí navržené metody je zapotřebí méně času ve srovnání s tradičními metodami, zejména pokud se navrhuje více než jeden věžový jeřáb. Metoda je lepší než původní schéma totožných autorů a dosahuje nižších celkových nákladů na dopravu materiálu a eliminuje v kolize. Pracovníci díky vizualizaci mohou snadno a přesně pochopit a implementovat schéma rozložení věžových jeřábů na staveništi.
2015	AP pro optimální pozici a výběr typu věžového jeřábu.	Pro výběr typu jeřábu byla použita metoda AHP jakožto multikriteriální metoda (MCDM). Pro optimální rozmístění jeřábů, nejkratší délku kolejové dráhy a optimální plán přiřazení zvedání bylo použito GA. BIM model byl použit pro export výkazu výměr a množství, potřebných pro optimalizaci pomocí GA.	Výsledky odhalily, že pro výběr optimálního (Marzouk a Abubakr 2016) typu jeřábu metodou AHP je významná analýza citlivosti k odhalení rozhodujících kritérií. Prezentovaný příklad ukázal, že věžový jeřáb s horní otočí je nejcitlivější, protože je spojen s nejvyššími koeficienty citlivosti. Autoři dospěli k závěru, že BIM model věžových jeřábů lze vyvinout přidáním dalších funkcí, jako je povolení pokročilých funkcí prostorové definice nebo modelování mobilních jeřábů.

2016	AP pro odhad dopravních frekvencí v rámci staveniště. Účelová funkce minimalizuje dopravní náklady.	Je představena integrace vstupních dat, pocházejících z BIM a harmonogramu pro odhad cestovních frekvencí. Pro propojení informací shromážděných z BIM a z harmonogramu projektu byl naprogramován analyzátor v rámci VBA. Odhadované cestovní frekvence byly nastaveny jako vstupní data pro model CSLP založený na MILP.	Výsledky odhalily schopnost navrhovaného rámce automatizovat proces odhadu cestovní frekvence. Autoři dospěli k závěru, že hodnoty kmitočtů vnitrostaveništní dopravy, použité z jiných projektů, mohou v procesu optimalizace generovat určité chyby. Pro další vývoj a zlepšení přesnosti modelu se doporučuje shromáždit vlastní databázi z více typů projektů.	(Hammad et al. 2016)
2016	AP pro pozici jeřábu a místa dodávky materiálu s ohledem na provozní a nájemní náklady.	Model MILP pro optimalizaci umístění jeřábu, který minimalizuje celkové náklady. Model případové studie byl linearizován a vyřešen pomocí řešitele CPLEX.	Z výsledků umístění věžového jeřábu jsou patrné značné rozdíly při zanedbání kapacity věžového jeřábu. Pomocí prezentovaného modelu MILP bylo dosaženo přibližně 30% snížení celkových nákladů. Výsledky také prokázaly, že přehlížení požadavků na kapacitu jeřábu v kontextu s umístěním jeřábu může vést k chybám, vedoucím k až 20% navýšení oproti optimálním celkovým nákladům.	(Moussavi Nadoushani et al. 2017)

## **14. ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY**

Vzhledem k rozsahu Jsou některé přílohy uvedeny pouze v elektronické části práce, dostupné na paměťovém nosiči USB, který je nedílnou přílohou práce a součástí elektronické verze práce v souboru \*.zip. Kompletní práce je rovněž archivována online v repozitáři VUT v Brně na adrese: <https://dspace.vutbr.cz>.

### **14.1. NÁVRH RECEPTUR RECYKLOVANÝCH BETONOVÝCH SMĚSÍ RAC-01 PRO MATERIÁLOVÝ EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM**

Podrobný návrh receptur je zpracován ve formě tabulky ve formátu \*.xls a PDF, která obsahuje receptury pro jednotlivé směsi RAC-01 s ohledem na podíl náhrady přírodního kame-niva recyklátem.

### **14.2. NÁVRH RECEPTUR RECYKLOVANÝCH BETONOVÝCH SMĚSÍ RAC-02 PRO MATERIÁLOVÝ EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM**

Podrobný návrh receptur je zpracován ve formě tabulky ve formátu \*.xls a PDF, která obsahuje receptury pro jednotlivé směsi RAC-02 s ohledem na podíl náhrady přírodního kame-niva recyklátem.

### **14.3. VSTUPNÍ DATA – MATICE DAT Z INFORMAČNÍHO MODELU BUDOVY (BIM)**

Kompletn zdrojová data pro optimalizační výpočet ve formátu \*.xls a PDF. Zkrácená verze této přílohy je uvedena v kapitole 5.3.4. Příloha obsahuje vygenerovanou tabulku seznamu prvků budovy a jejich objemy.

### **14.4. VSTUPNÍ DATA – SEZNAM INTERNÍCH BETONÁREN**

Kompletn zdrojová data pro optimalizační výpočet ve formátu \*.xls a PDF. Zkrácená verze této přílohy je uvedena v kapitole 5.3.4.

---

## **14.5. VSTUPNÍ DATA – SEZNAM EXTERNÍCH BETONÁREN**

Kompletn zdrojová data pro optimalizační výpočet ve formátu \*.xls a PDF. Zkrácená verze této přílohy je uvedena v kapitole 5.3.4.

## **14.6. VSTUPNÍ DATA – MATICE CEN BETONŮ INTERNÍCH BETONÁREN**

Kompletn zdrojová data pro optimalizační výpočet ve formátu \*.xls. Zkrácená verze této přílohy je uvedena v kapitole 5.3.4.

## **14.7. VSTUPNÍ DATA – MATICE CEN BETONŮ EXTERNÍCH BETONÁREN**

Kompletn zdrojová data pro optimalizační výpočet ve formátu \*.xls. Zkrácená verze této přílohy je uvedena v kapitole 5.3.4.

## **14.8. VSTUPNÍ DATA – MATICE CEN DOPRAVY EXTERNÍCH BETONÁREN**

Kompletn zdrojová data pro optimalizační výpočet ve formátu \*.xls a PDF. Zkrácená verze této přílohy je uvedena v kapitole 5.3.4.

## **14.9. PODROBNÉ VÝSLEDKOVÉ GRAFY OPTIMALIZACE**

Podrobné výsledkové grafy je souhrn exportovaných grafů v podobě obrázků \*.png, číslovaných dle ID jednotlivých prvků. Popis těchto dat je uveden v kapitole 5.3.4. Tato příloha obsahuje i výsledkové grafy testovacího ověřovacího modelu s objemy prvků po krocích, prezentovaného v závěru kapitoly 5.3.4.

## **14.10. KOMPLETNÍ OPTIMALIZAČNÍ ALGORITMUS V JAZYCE PROSTŘEDÍ MATLAB**

Optimalizační algoritmus je programován v jazyce prostředí MATLAB a má podobu samostatného textového souboru dokumentu MS Word a PDF. Popis algoritmu s uvedenými příklady algoritmu jsou uvedeny chronologicky v kapitole 4.4.3.

