

UNIVERZITA PARDUBICE

DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

Jiří Zeman

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Aplikovatelnost odpadních materiálů do prefabrikovaných betonových konstrukcí

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jiří Zeman**
Osobní číslo: **D18246**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Téma práce: **Aplikovatelnost odpadních materiálů do prefabrikovaných betonových konstrukcí**
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Zásady pro vypracování

Nezbytnou součástí udržitelného rozvoje je recyklace materiálů a odpadů.

Recyklace betonu a následné použití recyklovaného kameniva chrání životní prostředí a eliminuje potřeby skládek. V souvislosti s hojnou výrobou prefabrikovaných prvků se požaduje zpracovat rešerše stávající míry poznání ve využití recyklátu při výrobě prefabrikovaných dílců.

Kromě betonového recyklátu je možné zaměřit se i na cihelný recyklát. Případně na aplikaci plastového odpadu do betonu.

Na autorem zhotovených zkušebních tělesech se požaduje stanovit pevnostní a trvanlivostní charakteristiky betonu. Doporučuje se doplnit i nedestruktivní zkoušku (ultrazvukovou impulsovou metodou).

Experimentální část práce bude částečně prováděna ve společnosti Prefa Produkt s.r.o. (Předměřice nad Labem) a částečně v Ústavu stavebního zkušebnictví, s.r.o. (Pardubice).

Požadované výstupy:

Úvod

Přehled stanovených cílů

1) Teoretická část

Analýza současného stavu poznání v ČR a v zahraničí

Prefabrikace, výroba prefabrikovaných dílců

Druhy a vlastnosti recyklátu / odpadu do betonu

Požadavky na recyklované kamenivo

2) Experimentální část

Popis vlastností vybraného recyklátu

Výroba čerstvého recyklovaného betonu

Provedení zkoušek čerstvého recyklovaného betonu / betonu s přidanými odpadními materiály

Výroba zkušebních těles

Provedení zkoušek ztvrdlého recyklovaného betonu (pevnostní a trvanlivostní charakteristiky, nedestruktivní zkoušky)

3) Vyhodnocení dosažených výsledků

Verifikace a závěr

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 206+A2. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

ČSN P 73 2404. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

ČSN EN 12 350-X. Zkoušení čerstvého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12 390-X. Zkoušení ztvrdlého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

TP 210, 2011: Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací. In: Technické podmínky. Praha: Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební.

COLLEPARDI, M., 2009. Moderní beton. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.

MEHTA, P. Kumar a Paulo J. M. MONTEIRO. Concrete: microstructure, properties, and materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-179787-0; MHID 0-07-179787-4.

PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.

Xiao, J. ZH., Li, J. B., Zhang, CH. On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: an overview, Materials and structures, 2006. 39. pp. 655-664.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladimír Suchánek, Ph.D.

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce: **12. října 2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2024**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.

děkan

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.

vedoucí katedry

Prohlašuji:

Práci s názvem Aplikovatelnost odpadních materiálů do prefabrikovaných betonových konstrukcí jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 06. 08. 2024

Jiří Zeman v.r.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Vladimírovi Suchánkovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, odborný dohled a cenné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce. Děkuji také Ing. Mojmírovi Malému – jednatelem firmy PREFA PRODUKT, s.r.o., který mi poskytl potřebný materiál k výrobě betonu a hlavnímu technologovi Petrovi Chládkovi, který mi byl nápomocen při výrobě a zkouškách zkušebních těles. Mé poděkování patří také jednatelem firmy ENVISTONE, s.r.o. – Jozefu Kukulovi za důvěru a poskytnutí potřebného materiálu. Samozřejmě děkuji jednatelem Jiřímu Kudrnovi z Ústavu stavebního zkušebnictví, za cenné rady a odborný dohled při prováděných zkouškách. Velké díky patří technickému zástupci – Tomášovi Klausovi z Chryso Chemie, s.r.o., za návrh receptury, a jednatelem Mgr. Jaroslavovi Šatrovi za poskytnutí plastového recyklátu. Mé poděkování směřuje také k Ing. Ivaně Jansové, obchodní manažerce pro životní prostředí, za cenné rady ohledně plastového recyklátu a problematiky životního prostředí. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat Jaroslavě Soukupové ze Zkušebny kamene a kameniva, s.r.o. v Hořicích za odborné rady a zkušenosti během zkoušek. Závěrem děkuji i své rodině, přítelkyni a přátelům za trvalou podporu po celou dobu mého studia.

ANOTACE

Bakalářská práce je zaměřena na aplikovatelnost odpadních materiálů v prefabrikovaných betonových konstrukcích, s důrazem na porovnání vlastností přírodního kameniva a recyklovaného kameniva ze stavebních a demoličních odpadů. Práce rovněž analyzuje potenciální budoucí problémy spojené s nedostatkem přírodního kameniva a zkoumá alternativní suroviny. Jedním z klíčových aspektů je ochrana životního prostředí a využití odpadu jako druhotné suroviny pro stavební účely. Experimentální část této práce se soustředí na porovnání vlastností přírodního kameniva s druhotnými surovinami, které mohou mít srovnatelné vlastnosti. Tento výzkum zahrnuje jak destruktivní, tak nedestruktivní zkoušky, které umožňují přesné porovnání přírodního kameniva a potenciálních alternativních materiálů v kontextu stavebního inženýrství.

KLÍČOVÁ SLOVA

stavební odpad, demoliční odpad, cihelný recyklát, směsný recyklát, betonový recyklát, plastový recyklát, životní prostředí

TITLE

Applicability of waste materials in precast concrete structures

ANNOTATION

The bachelor thesis is focused on the applicability of waste materials in precast concrete structures, with emphasis on the comparison of the properties of natural aggregates and recycled aggregates from construction and demolition waste. The thesis also analyses potential future problems associated with the shortage of natural aggregates and explores alternative raw materials. One of the key aspects is environmental protection and the use of waste as a secondary raw material for construction purposes. The experimental part of this thesis focuses on comparing the properties of natural aggregates with secondary raw materials that may have comparable properties. This research includes both destructive and non-destructive tests that allow an accurate comparison between natural aggregates and potential alternative materials in the context of civil engineering.

KEYWORDS

Construction waste, Demolition waste, Brick recyclate, Mixed recyclate, Concrete recyclate, Plastic recyclate, Environment

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	12
SEZNAM TABULEK	14
SEZNAM GRAFŮ	15
ÚVOD A CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	16
TEORETICKÁ ČÁST	17
1 Historie betonu.....	17
1.1 Význam betonu v dnešním stavitelství	18
1.2 Přednosti a vady betonu	19
1.3 Rozdělení betonů	20
1.4 Ochrana životního prostředí.....	22
1.4.1 Zátěž životního prostředí	23
1.4.2 Zacházení a využití odpadu v betonářské technologii.....	24
1.4.3 Legislativní předpisy.....	25
1.5 Životnost konstrukce.....	25
2 Složky betonu	27
2.1 Kamenivo.....	29
2.1.1 Současný stav disponibilních zásob u využívaných ložisek stavebního kamene a štěrkopísku v ČR.....	29
2.1.2 Analýza využitelnosti a životnosti zásob ložisek stavebního kamene a štěrkopísku	30
2.1.3 Studie aktuálního stavu a perspektiv	32
2.2 Cement	36
2.3 Voda.....	39
2.4 Přísady a příměsi.....	40
2.4.1 Vlastnosti příměsí do betonu	40
2.4.2 Vlastnosti přísad do betonu.....	40
3 Vlastnosti betonu a zkušebnictví	42
3.1 Čerstvý beton	42
3.2 Ztvrdlý beton.....	43
3.2.1 Pevnost betonu.....	44
3.2.2 Pružnost betonu.....	45
3.2.3 Trvanlivost betonu	45
3.2.4 Odolnost betonu.....	46

3.3 Zkoušky betonu.....	46
3.4 Klasifikace betonu do tříd.....	47
4 Recyklované stavební a demoliční odpady jako jeden z pilířů cirkulární ekonomiky ve stavebnictví.....	48
4.1 Produkce stavebních a demoličních odpadů.....	49
4.2 Recyklace stavebních a demoličních odpadů.....	49
4.3 Cesty ke zvyšování podílu recyklovaných SDO na trhu minerálních materiálů ve stavebnictví.....	51
4.4 Techniky pro úpravu a recyklaci stavebního a demoličního odpadu.....	52
4.5 Vlastnosti recyklovaného kameniva.....	53
4.5.1 Objemová hmotnost recyklovaného kameniva.....	53
4.5.2 Nasákavost recyklovaného kameniva.....	54
4.5.3 Látky kontaminující recyklované kamenivo.....	55
4.6 Druhy recyklovaného kameniva.....	56
4.6.1 Cihelný recyklát.....	57
4.6.2 Betonový recyklát.....	58
4.6.3 Směsný recyklát.....	59
4.6.4 Asfaltový recyklát.....	60
4.7 Národní technické požadavky na recyklované kamenivo.....	61
5 Definice plastu.....	62
5.1 Historie plastů a česká stopa v jejich vývoji.....	63
5.2 Plasty z hlediska životního prostředí.....	63
5.3 Struktura a vlastnosti plastů.....	64
5.3.1 Základní vlastnosti plastů.....	64
5.3.2 Základní fyzikální vlastnosti.....	65
5.3.3 Klasifikace, značení a přizpůsobení plastů.....	66
5.3.4 Diverzifikace plastů pro různé aplikace.....	68
5.4 Recyklace plastů.....	69
5.4.1 Problémy recyklace plastů.....	70
5.4.2 Druhy recyklace plastů.....	71
5.5 Zpracování odpadních plastů.....	73
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	75
1 Přehled zkoušených receptur.....	75
1.1 Receptura PREFA PRODUKT.....	75
1.2 Receptura plastového recyklátu.....	76

1.3 Receptura směsného recyklátu.....	77
2 Výroba zkušebních těles	79
3 Provedené zkoušky	81
3.1 Provedené zkoušky čerstvého betonu	82
3.2 Provedené zkoušky na ztvrdlém betonu	83
4 Postup měření a výsledky zkoušek na čerstvém betonu	85
4.1 Výsledky zkoušek na čerstvém betonu	88
4.1.1 Receptura PREFA PRODUKT	88
4.1.2 Receptura plastového recyklátu	89
4.1.3 Receptura směsného recyklátu.....	89
4.2 Souhrnné výsledky zkoušek na čerstvém betonu	90
5 Postup měření a výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu	93
5.1 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu	97
5.1.1 Receptura PREFA PRODUKT	97
5.1.2 Receptura plastového recyklátu	98
5.1.3 Receptura směsného recyklátu.....	100
5.2 Souhrnné výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu.....	102
ZÁVĚR BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	104
POUŽITÁ LITERATURA	106

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Křivky hustoty pravděpodobnosti [12]	26
Obrázek 2: Pec pro výrobu slínku [13].....	27
Obrázek 3: Mlýn pro mletí slínku [13]	27
Obrázek 4: Komponenty a složky běžného betonu, upraveno podle [13]	28
Obrázek 5: Schéma výroby betonu: z cementárny až na stavbu [13].....	28
Obrázek 6: Životnost vytěžitelných zásob v kamenolomech dle krajů (Leden 2020) [17].....	33
Obrázek 7: Životnost vytěžitelných zásob v pískovnách dle krajů (Leden 2020) [17]	35
Obrázek 8: Měření normální konzistence na pastě (A) a počátku tuhnutí (B) [13].....	37
Obrázek 9: Schéma pece na výpal slínku [13].....	38
Obrázek 10: Schéma cementářské mlýnice pro mletí slínku a sádrovce [13]	38
Obrázek 11: Výpočet sypané hmotnosti dle ČSN EN 1097-3.....	42
Obrázek 12: Výpočet mezerovitosti dle ČSN EN 1097-3	42
Obrázek 13: Srovnání původního a recyklovaného kameniva	53
Obrázek 14: Vliv měrné hmotnosti recyklovaného kameniva [13].....	54
Obrázek 15: Cihelný recyklát [20].....	58
Obrázek 16: Betonový recyklát [32].....	59
Obrázek 17: Směsný recyklát [32].....	60
Obrázek 18: Asfaltový recyklát [32]	60
Obrázek 19: Ilustrace definice plastů [29]	62
Obrázek 20: Schéma rozdělení mechanických charakteristik plastů [29]	65
Obrázek 21: Klasifikace a bližší specifikace plastů [29].....	66
Obrázek 22: Způsoby recyklace [29].....	70
Obrázek 23: Rozsah teploty tavení vybraných plastů [29]	70
Obrázek 24: Plastový recyklát	77
Obrázek 25: Směsný recyklát	78
Obrázek 26: Odlévání těles do forem	79
Obrázek 27: Výroba zkušebních těles	79
Obrázek 28: Výroba čerstvého betonu.....	80
Obrázek 29: Zkoušky čerstvého betonu.....	83
Obrázek 30: Pevnostní zkoušky ztvrdlého betonu.....	84
Obrázek 31: Zkoušky odolnosti ztvrdlého betonu.....	84
Obrázek 32: Výpočet objemové hmotnosti čerstvého betonu [42].....	85

Obrázek 33: Výpočet obsahu vzduchu v betonu [43].....	86
Obrázek 34: Dutý kužel a dusadlo [44]	87
Obrázek 35: Zkouška rozlitím [44].....	87
Obrázek 36: Zkouška sednutím [45].....	88
Obrázek 37: Výpočet objemové hmotnosti ztvrdlého betonu [46].....	93
Obrázek 38: Výpočet pevnosti v tlaku [47]	94
Obrázek 39: Vyhovující porušení (A), nevyhovující porušení (B) [47].....	94
Obrázek 40: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu [48]	95
Obrázek 41: Zkouška odolnosti CHRL [50].....	96
Obrázek 42: Receptura PREFA PRODUKT	98
Obrázek 43: Receptura plastového recyklátu	100
Obrázek 44: Receptura směsného recyklátu	101

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Zdroje kameniva v ČR v [kt] [9]	23
Tabulka 2: Měrná spotřeba energie na jednotku výroby [9].....	24
Tabulka 3: Klasifikace cementu dle ČSN EN 197-1	37
Tabulka 4: Materiálové složení SDO [20]	49
Tabulka 5: Objemové hmotnosti recyklovaného a přírodního kameniva [13]	54
Tabulka 6: Požadavky na recyklované kamenivo v závislosti na typu betonu. [13].	56
Tabulka 7: Odkazy na systémy pro značení plastů, elastomerů a aditiv [29].....	67
Tabulka 8: Komoditní plasty [29].....	68
Tabulka 9: Technické plasty [29]	68
Tabulka 10: Výsledky zkoušek čerstvého betonu receptury PREFA PRODUKT	89
Tabulka 11: Výsledky zkoušek čerstvého betonu receptury plastového recyklátu	89
Tabulka 12: Výsledky zkoušek čerstvého betonu receptury směsného recyklátu.....	90
Tabulka 13: Shrnutí výsledků zkoušek na čerstvém betonu (různé složení receptur).....	90
Tabulka 14: Zkouška pevnosti v tlaku receptury PREFA PRODUKT	97
Tabulka 15: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu receptury PREFA PRODUKT	97
Tabulka 16: Zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou receptury PREFA PRODUKT	98
Tabulka 17: Zkouška CHRL receptury PREFA PRODUKT	98
Tabulka 18: Zkouška pevnosti v tlaku receptury plastového recyklátu.....	99
Tabulka 19: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu receptury plastového recyklátu	99
Tabulka 20: Zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou receptury plastového recyklátu	99
Tabulka 21: Zkouška CHRL receptury plastového recyklátu	99
Tabulka 22: Zkouška pevnosti v tlaku receptury směsného recyklátu	100
Tabulka 23: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu receptury směsného recyklátu.....	101
Tabulka 24: Zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou receptury směsného recyklátu.....	101
Tabulka 25: Zkouška CHRL receptury směsného recyklátu	101
Tabulka 26: Souhrnné výsledky zkoušky pevnosti v tlaku.....	102
Tabulka 27: Souhrnné výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu	102
Tabulka 28: Souhrnné výsledky zkoušky průsaku tlakovou vodou	103
Tabulka 29: Souhrnné výsledky zkoušky CHRL	103

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Celková roční produkce kameniva z výhradních (fialová šrafa) a z nevýhradních (červená šrafa) ložisek stavebního kamene v ČR [17]	31
Graf 2: Celková roční produkce štěrkopísku a písku z výhradních (hnědá šrafa) a z nevýhradních (modrá šrafa) ložisek v ČR [17]	32
Graf 3: Procentuální rozdělení životnosti kamenolomů v ČR (Leden 2020) [17].....	33
Graf 4: Životnost vytěžitelných zásob v kamenolomech dle krajů (Leden 2020) [17]	34
Graf 5: Procentuální rozdělení životnosti pískoven v ČR (Leden 2020) [17]	34
Graf 6: Životnost vytěžitelných zásob v pískovnách dle krajů (Leden 2020) [17]	35
Graf 7: Produkce a nakládání se SDO [20].....	50
Graf 8: Nakládání se SDO vybraných skupin [20]	51
Graf 9: Suťové recyklované kamenivo – cenová úspora [22]	57
Graf 10: Betonové recyklované kamenivo – cenová úspora [22].....	59
Graf 11: Použití plastů podle odvětví v Evropě [29]	69
Graf 12: Obsah vzduchu čerstvého betonu	91
Graf 13: Objemová hmotnost čerstvého betonu	91
Graf 14: Zkouška konzistence sednutím kužele	92
Graf 15: Zkouška konzistence rozlítím.....	92

ÚVOD A CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

„Vědec neusiluje o okamžitý výsledek. Neočekává, že jeho pokročilé myšlenky budou snadno uchopeny. Jeho práce je jako ta zahradníková – pro budoucnost. Jeho povinností je položit základy pro ty, kteří přijdou, a ukázat jim cestu.“ (Nikola Tesla).

Stavební a demoliční odpady, podle zákona č. 541/2020 Sb., představují více než polovinu celkové produkce odpadů v ČR a významný zdroj druhotných surovin. Původci těchto odpadů musí dodržovat správné postupy nakládání s vybouranými materiály, aby se maximalizovalo jejich opětovné použití a recyklace, což je podpořeno směrnicí 2008/98/ES Evropského parlamentu a Rady. Používání recyklovaných stavebních materiálů se v posledních letech výrazně zvýšilo, což je důsledkem omezených zásob tradičních materiálů a snahy snížit množství odpadu a náklady na jeho likvidaci. Hlavní překážkou je však nedůvěra v jejich kvalitu a možné škodlivé účinky. Také nedostatečné a nevyhovující demoliční postupy a nízké povědomí o problematice zpomalují širší přijetí těchto materiálů. [34]

Hlavním cílem bakalářské práce je podílet se na zavedení nových stavebních recyklátů na český trh. Úspěch by mohl zabránit dalšímu těžení přírodního kameniva v ČR, což by vedlo k nižším nákladům na prefabrikované výrobky a mělo pozitivní vliv na ekologický prospěch. Lze si pamatovat dobu, kdy byla letadla či přenosné počítače považovány za nemožné? Každá inovace, včetně té, která mění bezcenný plast či jiný odpad na stavební materiál, vyžaduje odvahu. I kdyby to vypadalo jako utopie, naše budoucnost závisí na odvaze realizovat tyto "bláznivé" nápady. Svět potřebuje otevřenost vůči novým ideálům, neboť jen tak lze dosáhnout skutečného pokroku.

Bakalářská práce je zaměřena na recyklaci stavebních materiálů a její aplikovatelnost ve stavebnictví. Jedním z cílů je dokázat, že správně upravený plastový a jiný recyklát může dosahovat srovnatelných vlastností s přírodním kamenivem. Tento výzkum bude rozvinut i v navazujícím studiu a diplomové práci. Smyslem je ukázat, že ochrana životního prostředí není zátěž, ale smysluplná činnost.

Obsahem teoretické části je úvod do problematiky stavebních a demoličních odpadů, historie betonu, složky a vlastnosti betonu a ochrana životního prostředí. Dále je řešena cirkulární ekonomika ve stavebnictví a základní vlastnosti plastů a jejich recyklace.

V úvodu experimentální části práce bude pozornost zaměřena na přehled zkoušených receptur a jejich složení. Následně bude kladen důraz na výrobu a zkoušení zkušebních těles. Závěrem experimentální části budou dané receptury porovnány a bude učiněn pokus o jejich zavedení do výrobního procesu.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Historie betonu

Tisíce let lidstvo zkoumalo využití materiálů, které lze formovat nebo odlévat v tekutém stavu a poté zpevnit do trvanlivých výrobků. Ačkoli považujeme beton za moderní stavební materiál, má historii sahající do minulosti. Existují záznamy o "umělém kameni" používaném v egyptském labyrintu (4. tisíciletí př. n. l.), a Římané jistě znali beton, jak dokazují pozůstatky jejich staveb, jako například 80 km dlouhý akvadukt z pohoří Eifel do Colonia Agrippina. První zmínka o betonu po Římanech se objevuje až v roce 1796, kdy inženýr Smeaton provedl opravu majáku v anglickém Edystone. [1] [2]

V polovině minulého století začal rychlý rozvoj betonu díky mechanizaci výroby a využívání lokálních surovin pro výrobu cementu. Nicméně skutečný průlom v používání betonu jako konstrukčního materiálu nastal až s vynálezem vyztužení betonu ocelí. Myšlenka kombinace kovu a kamene je velmi stará, jak dokládají zmínky z dob římské říše a později z Francie za vlády Ludvíka XIV. Tuto myšlenku zvažoval i L. Navier v první polovině 19. století, a první kroky k její realizaci provedl Rondelet při stavbě pařížského Pantheonu v 19. století. [2]

Francie je považována za kolébkou železobetonu. „*Zahradník J. Monier přišel na myšlenku hotovit cementové květináče, menší vodní nádrže vyztužené drátěnou sítí, a dal si ji v roce 1867 patentovat* [2].“ Současně s ním se za vynálezce železobetonu pokládá Fr. Coignet, který ve větším rozsahu uplatnil princip železobetonu ve stavitelství. Dalším významným průlomem v používání betonu byl vynález předpjatého betonu. Již v roce 1888 Němec Döhring patentoval způsob výroby předpjatých nosníků, ale nedostatečné znalosti o vlastnostech betonu a oceli bránily jeho rozvoji. Až francouzský inženýr E. Freyssinet, považovaný za vynálezce předpjatého betonu, odstranil tyto nedostatky a vyvinul metody výroby betonu vysoké kvality a požadoval ocel vysoké pevnosti. Důvěra ve spolehlivost konstrukcí z předpjatého betonu se však upevnila až po skončení 2. světové války. [2]

Po skončení války a poválečná výstavba, která zahrnovala obnovu průmyslu, dopravy a občanských staveb, přinesla éru výrazného rozvoje železobetonových a předpjatých betonových konstrukcí. Sovětští odborníci a vědci, jako byl akademik A.A. Gvozďev a další, sehráli klíčovou roli v tomto procesu a přispěli k významnému zdokonalení technologie betonu. V českých zemích vynikl jako průkopník v oboru betonářství profesor J. Melan, který působil na německé technické univerzitě v Praze. Českoslovenští inženýři a vědci se díky svým významným konstrukcím a teoretickým pracím zařadili mezi světovou špičku v oblasti

betonářství. Jejich práce v oblasti mostních konstrukcí, silničních stavbách, vodních děl a dalších oblastech pozemního stavitelství jsou dokladem jak vysokého tempa socialistické výstavby, tak i světové úrovně těchto stavebních děl z betonu, železobetonu a předpjatého betonu. Za těmito úspěchy stojí řady vynikajících inženýrů, projektantů, staticů a stavitelů. Mezi nejvýznamnější stavební inženýry minulého století patří František Klokner, Stanislav Bechyně, Rudolf Kukač, Konrád Jaroslav Hruban a další. [2]

Můžeme říct, že moderní betony zachovávají starověké přednosti a zároveň významně rozšiřují škálu technických cílů. Každé století přináší do oblasti stavebního inženýrství nové inovace a myšlenky. Lze očekávat, že 21. století bude charakterizováno jako **období recyklace a využívání druhotných stavebních materiálů**, což přinese další pokroky a poznatky. A tento trend nás opět přibližuje k novým technologiím a vynálezům. [1]

1.1 Význam betonu v dnešním stavitelství

Stavby jsou součástí lidské historie po staletí. Díky zlepšené energetické účinnosti, vysoké úrovni strukturální integrity a esteticky příjemným povrchovým úpravám se moderní zemní stavba stala jednou z hlavních možností pro výstavbu udržitelných nízkoenergetických budov. [4]

V dnešní době je beton klíčovým stavebním materiálem ve všech odvětvích. S jistou mírou přesnosti lze říci, že je to materiál univerzálního využití a bez omezení měřítko: od nejmenších předmětů denní potřeby, jako dlaždice, trub, květináčů a podobných výrobků, do obrovských údolních hrází, mostů a mrakodrapů. Zhotoví se z něho nejen sloupy, stropy, střechy, překlady, římsy, balkony, arkýře, schodiště a jiné části obytných budov, ale i úplné kostry mnohopatrových budov obchodních, kancelářských a obytných, nejrozmanitější konstrukce budov zvláštních, průmyslových, skladištních, chrámových, nemocničních, sportovních, divadelních, na něž se kladou zvláštní požadavky co do tvaru, rozpětí, zatížení, čistoty, ohnivzdornosti a bezpečnosti proti násilnému vniknutí. [3]

Téměř výhradně se používá ke konstrukci základů v různých a náročných podmínkách (základové patky, pásy, desky, betonové kesony, studně a piloty). Budují se z něho téměř všechny stavby vodní (jezy, mola, plavidlové komory, přehradní zdi), stejně jako mosty až kilometrových délek a všech rozpětí, silniční i železniční, vodovodní, průplavní, dále vozovky, tunely, stavby zemědělské (sila obilní), válečná opevnění, tovární komíny, majáky a věže vysílačů, jakož i předměty menší důležitosti, ale hromadné spotřeby: zábradlí, dlažby zárubně dveří, koupací vany, umyvadla, napajedla, koryta, obrubní kameny, žlábků, lavičky a ploty. Beton je klíčovým prvkem současné technologie. Díky jeho použití je možné

realizovat stavby, které odpovídají stále rostoucím potřebám veřejnosti. Můžeme tvrdit, že beton poskytuje nepostradatelné služby lidské společnosti, jež nelze vyčíslit. [3] [4]

1.2 Přednosti a vady betonu

Beton je jedním z nejpoužívanějších stavebních materiálů na světě, který má řadu výhod, ale i určitá omezení, jež je třeba zvážit při jeho použití.

Přednosti betonových konstrukcí

Beton je známý svou trvanlivostí a odolností vůči mechanickému poškození. Má vysokou pevnost v tlaku a je ohnivzdorný. Železový beton díky ocelové výztuži umožňuje navržení subtilnějších a únosnějších konstrukcí a přispívá k hospodárnosti celé stavby.

Betonové konstrukce jsou extrémně odolné jak na povrchu, tak pod vodou, a projevují mimořádnou trvanlivost. Faktory jako druh použitého kameniva a množství použitého cementu ovlivňují jejich citlivost na korozi.

Betonová odolnost proti mechanickému poškození se podobá přírodnímu kameni a je závislá na okolním prostředí. V tekoucích vodách může docházet ke kavitaci betonu. Pravidelným omýváním a dynamickým působením proudící vody může dojít k erozi, což se projevuje odplavením cementového tmelu.

Pevnost betonu je variabilní a může být přizpůsobena konkrétním potřebám. Na stavbách se používají betony s pevností v tlaku v rozmezí přibližně od 5 MPa do 30 MPa, zatímco ve výrobních stavebních prvků se může dostat až k 70 MPa. V laboratořích byly vyvinuty betony s pevností v tlaku 100 MPa a více.

Ohnivzdornost betonu je přímo ovlivněna použitým kamenivem. Je výrazně vyšší než u jiných stavebních materiálů běžně používaných pro nosné konstrukce. Například ocelové konstrukce selhávají při teplotách nižších než 600 °C, zatímco u betonových konstrukcí se v této fázi teprve začínají projevovat objemové a chemické změny. Běžný beton odolává delším teplotám kolem 800 °C, než začne selhávat. Při této teplotě začne v kamenivu tát živec. S použitím vhodného kameniva, můžeme vytvořit ohnivzdorný beton, který odolává teplotám až 1000 °C, nebo žáruvzdorný beton, který snese teploty až 1600 °C.

Při monolitických betonových konstrukcích je jednodušnost a formovatelnost betonu obrovskou výhodou. Na místě stavby můžeme vytvářet celistvé struktury s nejrůznějšími tvary a průřezy podle požadavků statického zatížení. Díky tvárnosti lze realizovat představy stavebních architektů, zatímco jednotnost přispívá k pevnosti konstrukce a při správném využití může zvýšit nosnost.

Efektivnost betonové konstrukce plyne z její dlouhé životnosti a cenově dostupné výroby z běžně dostupných surovin. Každé opomenutí správné technologie, ať už při dopravě, výrobě nebo zpracování čerstvého betonu, ohrožuje ekonomickou efektivitu stavby a snižuje její společenský prospěch. Čím rychleji se začne využívat betonová konstrukce, tím efektivněji se využijí investované náklady a tím dříve bude konstrukce přinášet užitek a hospodárnost.

Vady betonových konstrukcí

V tomto světě není nic dokonalého, a to platí i pro beton. Beton trpí hlavně kvůli jeho velké hmotnosti, která se odvíjí od druhu použitého kameniva. Pro výrobu nosných betonů se obvykle volí přírodní kamenivo s vysokou hmotností. Prefabrikované prvky jsou charakteristické svou vysokou hmotností, což vede k nutnosti použít robustní zdvihací zařízení pro manipulaci a speciální vozidla pro přepravu, což následně zvyšuje výrobní náklady.

Jak narůstá hustota betonu, zvyšuje se i jeho tepelná vodivost. Přestože tedy zlepšuje pevnost a únosnost betonu, přispívá rovněž k vyšší tepelné a zvukové vodivosti. Proto je nezbytné, aby u betonových konstrukcí pro pozemní stavby byla zajištěna efektivní tepelná izolace.

Abychom předešli nežádoucím účinkům způsobeným teplotními změnami na konstrukci, zřizujeme dilatační spáry. Tyto spáry snižují objemové změny betonu, které se vyskytují během tuhnutí, tvrdnutí a také při teplotních výkyvech v rámci konstrukce.

Nedodržení předpisů při výrobě, přepravě nebo zpracování čerstvého betonu vede k nevyrovnanosti vlastností, což je nežádoucí při výrobě betonových konstrukcí. Abychom minimalizovali tuto nevyrovnanost, je nezbytné vyrábět čerstvý beton z ověřených složek podle stanovených pravidel, zajistit vhodný způsob přepravy a pečlivě ošetřovat beton během procesu tvrdnutí.

Opravy betonových konstrukcí jsou obvykle náročné a finančně nákladné. Přestože vysoká pevnost a tvrdost betonu jsou výhodami tohoto materiálu, při rekonstrukci způsobují, že každý zásah do betonové konstrukce je obtížný a nákladný. [5]

1.3 Rozdělení betonů

Betony lze klasifikovat podle různých kritérií, včetně způsobu výroby, účelu, statických a konstrukčních vlastností, a struktury. Na základě těchto kritérií rozlišujeme následující typy betonu: [7]

Dle struktury:

Hutné betony: Tyto betony se vyznačují tím, že malta vyplňuje mezery mezi většími zrny kameniva, což vede k minimálnímu výskytu vzduchových pórů a malých dutin s obvyklou velikostí menší než 18 %. [7] [5]

Mezerovité betony: Tyto betony mají charakteristiku částečně vyplněných mezer mezi zrny maltou, s mírou mezerovitosti přesahující 18 %. V jemnozrnném mezerovitém betonu se používá hrubé kamenivo s rovnoměrnou velikostí zrn, přičemž menší zrna tohoto kameniva nejsou přítomná. [2] [6]

Pórovité betony: V případě pórobetonu jsou v jemnozrnné maltě přítomné vylehčovací póry. [5]

Dle statických a konstrukčních vlastností:

Prosté betony: Tyto betony, které nejsou vyztuženy, jsou používány pro stavbu základů, pilířů, opěrných zdí a sloupů. [2]

Slabě vyztužené betony: Jsou betony s ocelovými pruty, které mají nižší stupeň vyztužení než běžné železobetonové konstrukce. [5]

Železové betony: Obsahují ocelové pruty s vyztužením v rozmezí stanoveném normou pro různé stavební prvky, jako jsou desky, trámy a sloupy. [2]

Předpjaté betony: Jsou to konstrukce, kde je záměrně použito předpětí výztuže, aby při zatížení nedocházelo k nežádoucím tahovým napětím. [5]

Na základě jejich účelu můžeme beton klasifikovat:

Nosné betony: Slouží k vytváření nosné konstrukce a přenosu zatížení. [2]

Nenosné betony: Jsou využívány hlavně pro izolační a vyrovnávací funkce. [2]

Typy nosných betonů:

Konstrukční betony: Konstrukční betony, zaměřené na dosažení vysoké pevnosti v tlaku, se používají při stavbě různých nosných prvků v pozemním a inženýrském stavitelství. Příklady zahrnují trámy, překlady, průvlaky, sloupy, základy a skořepiny. [2]

Silniční betony: Silniční betony jsou vhodné pro stavbu vozovek a letištních rozjezdových ploch. Jejich klíčovými vlastnostmi jsou zvýšená odolnost v tahu a vysoká odolnost vůči povětrnostním vlivům i mechanickému opotřebení. [2]

Vodostavební betony: Při stavbě vodních děl, jako jsou hráze, vodojemy a nádrže, se používají vodostavební betony. Tyto betony jsou specificky navrženy tak, aby byly vodotěsné, mrazuvzdorné a odolné vůči mechanickým a chemickým účinkům vody. Přestože pevnost betonu není u těchto konstrukcí klíčová, důraz je kladen na jejich masivnost. [2]

Třídění nosných betonů podle způsobu výroby:

Monolitické betony: Nosné konstrukce jsou vytvářeny přímo na stavbě pomocí postupného vylévání betonu do bednění. Beton nejprve zatuhne a ztvdne uvnitř bednění. Poté se prvek nebo konstrukce demontuje z bednění. [5]

Prefabrikované betony: Jednotlivé konstrukční prvky jsou vyráběny v betonárnách a následně přepravovány na staveniště, kde se montují do finální podoby. [5]

Klasifikace betonu dle objemové hmotnosti:

Objemová hmotnost, známá také jako hustota tělesa, představuje poměr mezi jeho hmotností a objemem, přičemž do úvahy se berou i případné dutiny, póry a schopnost absorpce vlhkosti. [8]

Lehký beton: Dosahuje hmotnosti od 300 kg/m³ do 2 000 kg/m³ a je známý svou nízkou pevnostní třídou, ale výbornými tepelně izolačními vlastnostmi. Je ideální pro renovace starších budov, kde je nutné minimalizovat zatížení konstrukce kvůli stabilitě. Tento typ betonu se často využívá k opravám klenutých stropů, tvorbě podkladových vrstev pro podlahy ve vyšších patrech a při vytváření sklonu plochých střech. [8]

Obyčejný/konstrukční beton: Jeho hmotnost se pohybuje od 2 000 kg/m³ do 2 500 kg/m³ a zahrnuje nejčastěji používané pevnostní třídy C12/15 až C50/60, které se běžně uplatňují při většině staveb svépomocí. Tento druh betonu je využíván pro stavbu základů, základových desek, stropů, překladů a pozedních věnců. [8]

Těžký/vysokopevnostní beton: Jedná se o speciální směs s pevnostní třídou C50/60 nebo vyšší a váží více než 2 500 kg/m³. Tento beton je vyráběn z těžkého kameniva a nachází své využití zejména u výškových staveb. [8]

1.4 Ochrana životního prostředí

Kromě neustálého zvyšování kvality výrobků je ochrana životního prostředí hlavním cílem všech ekonomických aktivit společnosti. Energie, průmyslová i zemědělská výroba a stavebnictví mají dlouhodobý dopad na životní prostředí. Stavebnictví výrazně ovlivňuje životní prostředí, ať už se jedná o urbanismus, architekturu nebo spotřebu surovin a energie pro vytápění budov. Beton, který je klíčovým materiálem ve stavebnictví, hraje významnou roli v této ekologické zátěži. Výroba betonu spotřebovává značné množství přírodních surovin, jako je kamenivo, a také vysoké množství energie pro produkci cementu. Kromě toho, kvůli velkému objemu a hmotnosti betonových konstrukcí, hraje významnou roli i dopravní náročnost. Nakonec všechny výrobky dospějí do fáze, kdy se stávají odpadem, což může způsobovat obtíže při jejich likvidaci. Přesto technologie betonu dokáže částečně

přispět k ochraně životního prostředí tím, že nahrazuje přírodní kamenivo určitými energetickými, průmyslovými a stavebními odpady. [9]

1.4.1 Zátěž životního prostředí

Výroba betonu má negativní dopad na životní prostředí, jelikož vyžaduje těžbu přírodních surovin jako je kamenivo a vápenec, který slouží pro výrobu cementu. Emise z mechanických a tepelných procesů při výrobě, jako je drcení a mletí, spotřebovává energii a znečišťuje ovzduší. Doprava kameniva, cementu a čerstvého betonu také přispívá k environmentálním problémům. Těžba vápence a kamene má negativní dopad na životní prostředí, což zahrnuje narušení vzhledu krajiny, odlesňování a změny v geomorfologii lokalit, což může ovlivnit místní klimatické podmínky. Zásoby přírodních surovin jsou omezené, jak je patrné z konkrétních dat v tabulce 1. [9]

Surovina	Stavební kámen	Štěrkopísky	Vápence
Počet ložisek	495	382	117
Celkové zásoby	3 296 656	4 529 141	6 244 117
Roční těžba	8 224	11 469	10 224

Tabulka 1: Zdroje kameniva v ČR v [kt] [9]

Mechanické procesy při výrobě stavebních materiálů vedou k prašnosti a hlučnosti. Cementárny omezují emise prachu na nejvýše 1,5 gramu na tunu slinku. Hluk překračující 85 dB vzniká při primárním drcení, mechanickém třídění a vibracích během zhutňování betonu. Tabulka 2 uvádí energetickou náročnost jednotlivých složek betonu. Betonové konstrukce však vykazují vyšší energetickou efektivitu než ocelové nebo cihlové konstrukce. [9]

Výrobek	Spotřeba energie na měrnou jednotku			
	Měrná jednotka	Elektrická [kWh]	Tepelná [GJ]	Celková [GJ]
Kamenivo těžené	m^3	1,46	0,005	0,0103
Kamenivo drcené	t	2,22	0,007	0,015
Sílinek	t	83,87	4,24	4,542
Cement	t	46,87	0,06	0,229
Železobetonové dílce	m^3	15,61	0,965	1,021

Tabulka 2: Měrná spotřeba energie na jednotku výroby [9]

1.4.2 Zacházení a využití odpadu v betonářské technologii

Odpady si vyžadují speciální opatření. Jako nadějně řešení pro vyvážení ekonomického a biologického rozvoje se jeví zavádění specifických technologií. Tyto technologie zahrnují recyklaci, maloodpadové postupy a určité biotechnologie. V kontextu výroby transportního betonu lze považovat za maloodpadovou technologii považovat opakované využití zbytků čerstvého betonu. Recyklace spočívá v použití odpadů jako sekundárních surovin během výrobního procesu, čímž se nahrazují přírodní zdroje. [9]

Recyklace nejen snižuje množství odpadů na skládkách, ale zároveň přispívá k úspoře neobnovitelných přírodních surovin. Odhaduje se, že každý obyvatel ročně vyprodukuje 0,6 až 1 tunu stavebního odpadu. Recyklace stavebních materiálů zahrnuje hlavně zpracování minerálních odpadů ze stavebnictví. Je důležité věnovat pozornost i recyklaci zbývajících materiálů, jako jsou dřevo a plasty. [9]

Odpady vyžadují speciální opatření. Jako nadějně řešení pro vyvážení ekonomického a biologického rozvoje se jeví zavádění specifických technologií. Tyto technologie zahrnují recyklaci, maloodpadové postupy a určité biotechnologie. V kontextu výroby transportního betonu můžeme za maloodpadovou technologii považovat opakované využití zbytků čerstvého betonu. Recyklace spočívá v použití odpadů jako sekundárních surovin během výrobního procesu, čímž se nahrazují přírodní zdroje. Recyklace nejen snižuje množství odpadů na skládkách, ale zároveň přispívá k úspoře neobnovitelných přírodních surovin. [9]

1.4.3 Legislativní předpisy

Ochrana životního prostředí je upravena širokou škálou legislativních předpisů, které jsou buď nově přijímány, nebo často upravovány. Těmto zákonům obvykle odpovídají konkrétní vyhlášky. [9]

Zákon 17/1992 Sb. týkající se ochrany životního prostředí vychází z principů trvale udržitelného rozvoje, efektivního využívání přírodních zdrojů a ochrany přírody. Tento zákon zdůrazňuje prevenci, opatrnost a odpovědnost za stav životního prostředí. Kromě toho je zákon 244/1992 Sb. zaměřen na posouzení dopadů plánovaných staveb a technologií na životní prostředí. Zákon 125/1997 o odpadech pak stanovuje definice a povinnosti týkající se nakládání s odpady. [9]

Další zákony se týkají ochrany ovzduší (309/1991 Sb.), o vodách (138/1973 Sb.), o lesích (289/1995 Sb.), o ochraně přírody a krajiny (144/1992 Sb.). Mezinárodně se prosazuje snaha řídit ekonomické činnosti z hlediska ochrany životního prostředí a byly vydány normy řady ČSN EN ISO 14 000 – Systémy enviromentálního managmentu. [9]

1.5 Životnost konstrukce

Životnost nosné konstrukce objektu lze definovat jako období, během kterého by měla konstrukce fungovat v očekávaných podmínkách provozu. Tato doba se obvykle vyjadřuje počtem let, který se může lišit v závislosti na druhu objektu. Běžně se životnost stanovuje podle specifikací, pro které byl objekt původně navržen. [10]

Každá nosná konstrukce má po celou dobu životnosti splňovat základní požadavky jako například: Bezpečnost, použitelnost na předpokládané druhy zatížení, trvanlivost na požadovaný počet roků a hospodárnost. [10] [11]

Na spolehlivost konstrukčního prvku čili celé konstrukce mají vliv zejména tyto veličiny: šířka, výška a tvar průřezu, množství a druh výztuže, kvalita betonu, velikost zatížení a způsob namáhání a vliv prostředí. [10] [11]

Životnost konstrukce může být negativně ovlivněna zejména příčinami: nedostatky v projektu, v přípravě stavby, v průběhu stavby, v průběhu užívání a nepředvídanými událostmi jako jsou živelné pohromy, požáry a výbuchy. [10] [11]

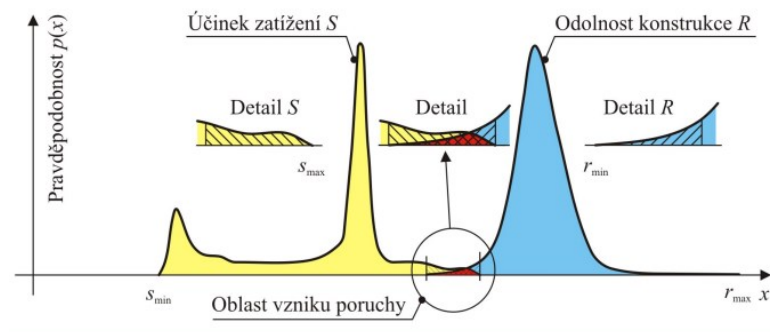
Životnost konstrukce můžeme též definovat jako čas, za něj se konstrukce dostane do mezního stavu a stane se nepoužitelnou. U veřejných budov se obvykle předpokládá životnost kolem 100 až 150 let, zatímco u panelových domů se odhaduje na přibližně 80 let. [10] Klíčovou složkou životnosti konstrukce je její spolehlivost. Tuto spolehlivost lze chápat jako schopnost konstrukce plnit své předpokládané funkce po celou dobu svého životního

cyklu a za stanovených podmínek. Konstrukce je spolehlivá, jestli že je splněna podmínka, že účinek zatížení na konstrukci nebude větší než její odolnost. [10] [11]

Při praktickém návrhu konstrukce je podmínka spolehlivosti specifikována v patřičných normách jako tzv. mezní stav. Pravděpodobností posudek spolehlivosti je založen na podmínce spolehlivost, kterou lze vyjádřit ve tvaru: [12]

$$RF = R - S \geq 0$$

Na levé straně výrazu je identifikována funkce spolehlivosti RF, ale je také označována jako funkce poruchy G nebo rezerva spolehlivosti Z. Na pravé straně výrazu jsou určeny odolnost konstrukce R a účinek zatížení S. Porucha nastane v situaci, kdy odolnost konstrukce R bude menší než účinek jejího zatížení S, jak je znázorněno na obrázku 1. [12]



Obrázek 1: Křivky hustoty pravděpodobnosti [12]

Celková životnost objektu může být buď dlouhodobá nebo krátkodobá. Pojem životnost je relativní a vyžaduje odborné posouzení jak celého objektu, tak jeho jednotlivých částí. Správné určení životnosti je klíčové pro hodnocení hospodárnosti objektu. Při stanovení životnosti objektu nelze stanovit přesnou časovou hranici. [10]

2 Složky betonu

Beton se skládá ze tří hlavních složek: kameniva, cementové matrice a vody. Kamenivo tvoří písek a šterk nebo drť, zatímco cementová matrice vzniká smícháním cementu s vodou. Různé typy cementu se používají pro různé účely, přičemž portlandský cement, ačkoliv nejznámější, není vždy nejpoužívanější. [13]

Portlandský cement, typicky „šedivý prášek“, je výsledkem procesu výroby, který zahrnuje vypálení (viz obr. 2) přírodních surovin v cementářské peci, což produkuje slínek, následované mletím v mlýně (viz obr. 3) s příměsí sádrovce nebo anhydridu. Výsledný produkt je pak nazýván portlandský cement. [13]



Obrázek 2: Pec pro výrobu slínku [13]

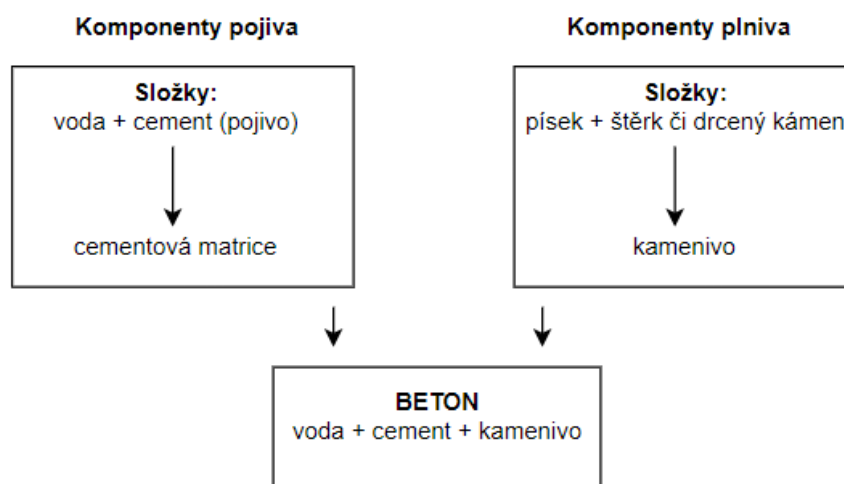


Obrázek 3: Mlýn pro mletí slínku [13]

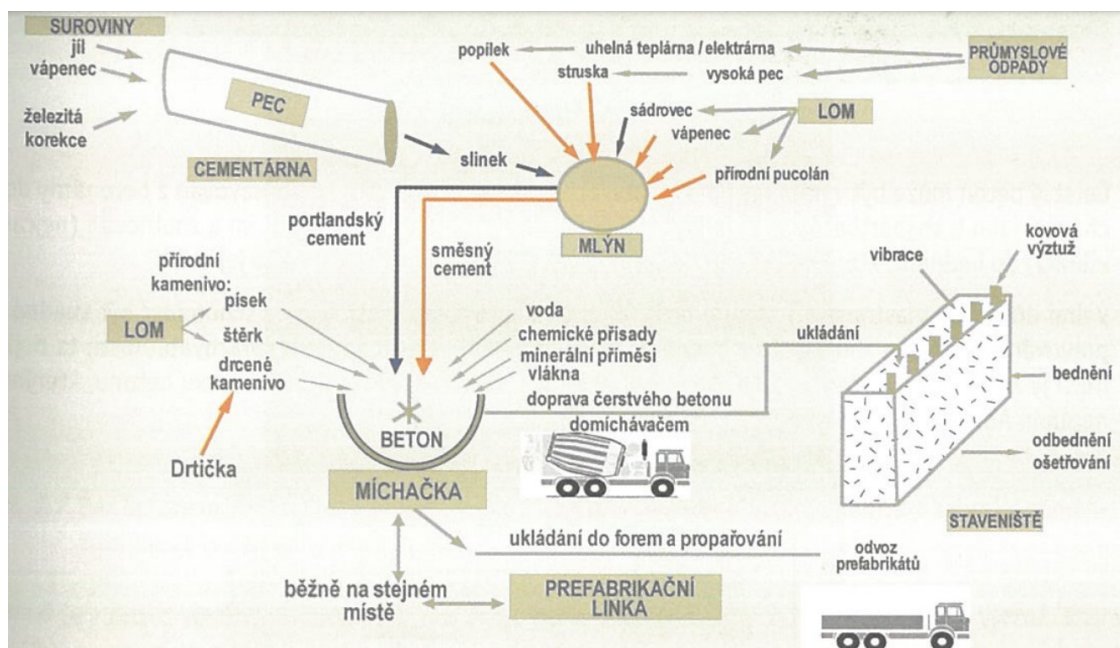
Když se k cementu přidá voda v množství kolem 30 %, vzniká směs, která je velmi tvárná. Vznik směsi je znázorněn na obrázku 5. Tato tvárnost se však postupně snižuje, a přibližně po hodině začne směs tuhnout, nabývající textury podobné přírodnímu kameni. Bez přidání sádrovce by však směs rychle ztratila svou plasticitu (tzv. bleskové tuhnutí), což by ztížilo její zpracování na staveništi. Sádrovec, známý také jako anhydrit, se používá jako regulátor tuhnutí. Když se do slínku a regulátorů tuhnutí během mletí přidají další materiály, jako

je přírodní pucolán, vápenec nebo vedlejší produkty z průmyslu (např. popílek, vysokopecní struska), vznikají různé druhy cementů. Těmito druhy mohou být směsný portlandský cement, vysokopecní cement nebo směsný cement. Název konkrétního produktu závisí na přidaném množství těchto přísad. [13]

Pro výrobu běžného betonu jsou nutné základní složky: voda, cement, písek a přírodní štěrky nebo drť (viz obr. 4). Kromě těchto složek se používají také tekuté chemické přísady, práškové minerální příměsi a kovová nebo polymerní vlákna. Beton prochází dvěma fázemi: čerstvý beton a ztvrdlý beton. Čerstvý beton vzniká smícháním jednotlivých složek a má plastické vlastnosti, zatímco ztvrdlý beton ztrácí plasticitu a získává strukturu podobnou přírodnímu kameni. [13]



Obrázek 4: Komponenty a složky běžného betonu, upraveno podle [13]



Obrázek 5: Schéma výroby betonu: z cementárny až na stavbu [13]

2.1 Kamenivo

Kamenivo tvoří hlavní část betonu, zabírající 75 až 80 % jeho objemu, a jeho klíčovou úlohou je zajistit pevnou strukturu s co nejmenšími mezerami. Toto kamenivo je složeno z různě velkých částic, které jsou pečlivě vybírány a kombinovány. Na stavební účely lze použít jak přírodní, tak umělé kamenivo, které je většinou anorganického původu a má velikost zrna do 125 mm. Kamenivo lze klasifikovat na základě petrografie, velikosti zrn, způsobu vzniku (drcené versus těžené) a pórovitosti. Podle rozměrů a složení zrn můžeme rozlišit několik kategorií kameniva: hrubé kamenivo, s průměrem zrn od 4 do 125 mm, jako je štěrk a drť; drobné kamenivo, zahrnující zrna do 4 mm, což je například písek; a jemné kamenivo, kde zrna mají velikost do 0,25 mm nebo 0,125 mm, jako je moučka či filer. [9] [16]

2.1.1 Současný stav disponibilních zásob u využívaných ložisek stavebního kamene a štěrkopísku v ČR

Kamenivo představuje klíčový nerost pro zajištění surovinové bezpečnosti a soběstačnosti státu. Avšak současné zásoby kameniva v těžebních lokalitách rapidně klesají a mnohé z nich jsou na pokraji vyčerpání. Je zřejmé, že dostupná ložiska nedokáží pokrýt poptávku po přírodním kamenivu pro následující stavební projekty. [17]

Nerostné suroviny jsou základním materiálem pro různé průmysly, jako je stavebnictví, keramika, sklářství, chemický průmysl, metalurgie, papírenství a potravinářství. Ovlivňují téměř všechny oblasti lidského života a mají významný vliv na mezinárodní obchod, buď jako suroviny, nebo hotové výrobky. Nerostné suroviny jsou klíčové pro národní hospodářství a jejich důležitost je nezpochybnitelná. Abychom zajistili surovinovou bezpečnost a soběstačnost, je nutné dlouhodobě rozvíjet vlastní zdroje, které jsou omezené. Ignorováním tohoto přístupu bychom ohrozili práci odborníků v hornictví a geologii, kteří vytvořili základy pro udržitelný rozvoj národního bohatství. [17]

Po roce 1989 došlo k výraznému poklesu těžebního průmyslu, včetně těžby rud, uhlí a stavebního kamene. Veškerá stavební činnost v České republice od té doby spoléhá na starší zdroje. Nová ložiska stavebního kamene s výjimkou několika místních pískoven pro základové materiály nebyla otevřena. Modernizované pískovny a štěrkovny nyní produkují vysoce jakostní betonářské a maltové štěrkopísky a písky. Většina těchto zdrojů však funguje už dlouho a jejich zásoby se postupně vyčerpávají. Dlouhé vzdálenosti při přepravě surovin z vysokokapacitních zdrojů do regionů s nedostatkem způsobují značné náklady a mají negativní vliv na životní prostředí. Tento problém se projevuje hlavně v oblastech, kde jsou

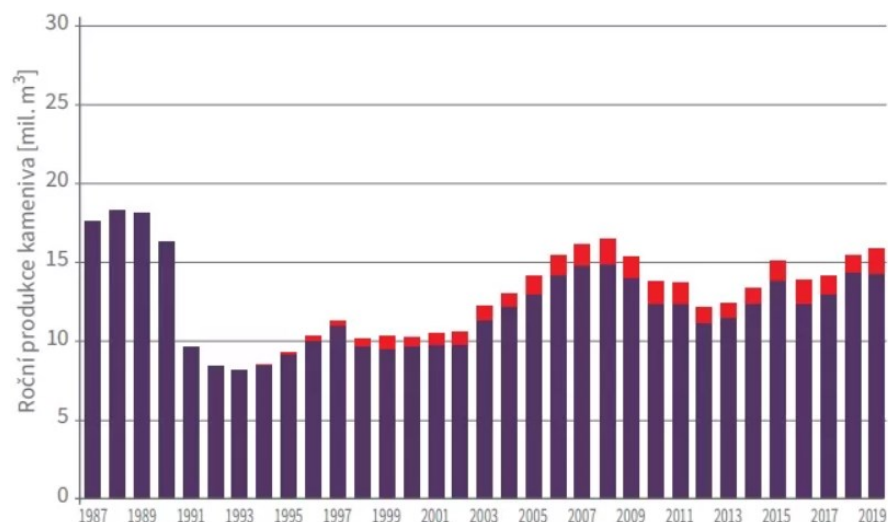
zásoby již vyčerpány, jako ve Zlínském kraji pro stavební kámen nebo na Vysočině pro štěrkopísek. Je běžné, že kamenivo, včetně méně kvalitních druhů pro podkladní vrstvy, musí být přepravováno více než 100 kilometrů, což výrazně komplikuje situaci. [17]

V současné době dochází k poklesu zásob těžitelných stavebních surovin, přičemž mnohá ložiska jsou téměř vyčerpána. I když se používání recyklovaných materiálů zvyšuje, často nesplňují kvalitativní požadavky nutné pro běžné stavební projekty, zejména lineární stavby. Recykláty mohou posloužit jako doplňkový materiál, ale jejich vlastnosti, jako pevnost, odolnost proti otlukování, nasákavost, mrazuvzdornost a další, nejsou srovnatelné s přírodními materiály. To omezuje jejich využití. Navíc trh často čelí nedostatku kvalitních, tříděných recyklátů ze stavebního a demoličního odpadu (SDO). Zahájení těžby nových ložisek stavebních surovin je problematické a většinou se soustředí na zdroje štěrkopísků. Následkem toho je stavební materiál často přepravován na dlouhé vzdálenosti, někdy i přes hranice. Tento jev vede k většímu dopravnímu zatížení na silnicích a zároveň zvyšuje konečnou cenu produktu u spotřebitele. [17]

2.1.2 Analýza využitelnosti a životnosti zásob ložisek stavebního kamene a štěrkopísku

Stavební kámen

V roce 2019 bylo v ČR aktivních 176 z celkového počtu 319 evidovaných výhradních ložisek stavebního kamene a 47 z 222 ložisek nevyhrazeného nerostu mělo povolenou těžbu. Celkem je tedy v ČR 223 aktivních kamenolomů, ačkoli produkci vykazuje pouze 204 z nich. Roční produkce se pohybuje kolem 14,5 až 15,5 milionů m³/rok (viz graf. 1), přičemž spotřeba kameniva včetně štěrkopísku jen do betonu činí přibližně 5,5 až 6,7 milionů m³/rok. [17]

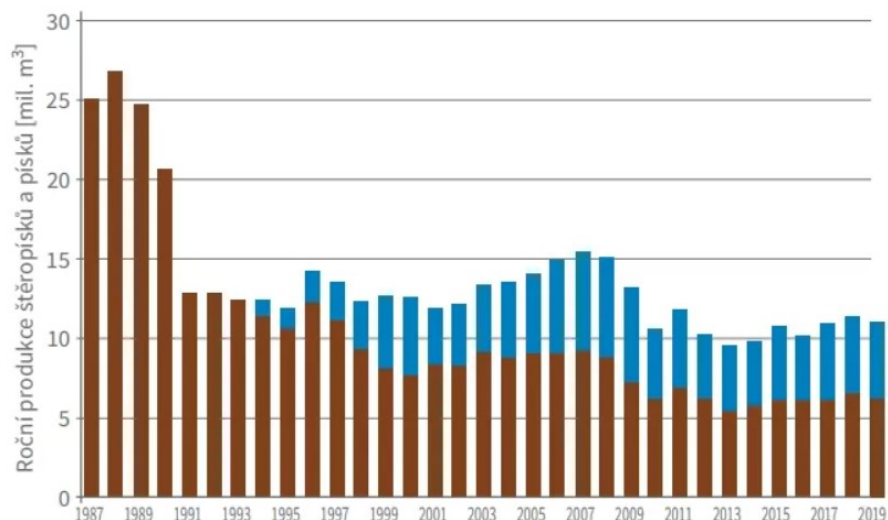


Graf 1: Celková roční produkce kameniva z výhradních (fialová šrafa) a z nevýhradních (červená šrafa) ložisek stavebního kamene v ČR [17]

V posledních deseti letech výrazně vzrostla těžba a spotřeba drceného kameniva, což souvisí se zvyšující se životní a ekonomickou úrovní státu. S rostoucí poptávkou po kvalitních stavebních materiálech rostou i ceny drceného kameniva; během posledních dvou let stouply průměrné ceny z přibližně 334 Kč/t na 360 Kč/t. Kromě toho jsou již v nedostatku některé jemné frakce drceného kameniva (0–4, 2–4, 2–5 a 4–8 mm) i hrubé frakce (8–11, 11–16, 16–22, 8–16, 16–32 a 32–63 mm), včetně kvalitního štěrku pro železniční lože. Ve východních a severních Čechách, zvláště ve Zlínském kraji, je nedostatek stavebního kameniva pro beton. Kvůli tomu se kameny dovážejí z Olomouckého, Jihomoravského kraje a Vysočiny, což zvyšuje cenu o 15-25 % a negativně ovlivňuje životní prostředí dlouhými přepravami. Do Středočeského kraje a Prahy se kamenivo vozí až z Ústeckého kraje a jižní části Středočeského kraje. [17]

Štěrkopísek

V roce 2019 bylo v ČR 72 aktivních z 205 evidovaných ložisek výhradních štěrkopísků a 107 z 343 ložisek nevyhrazeného nerostu mělo povolenou těžbu. Celkem 179 ložisek mělo povolení k těžbě, z toho 149 vykazovalo produkci. Roční objem těžby štěrkopísků se stabilně pohybuje kolem 11–12 milionů m³/rok (viz graf. 2), což zahrnuje 6,2 milionů m³ výhradních a 4,9 milionů m³ nevýhradních ložisek. [17]



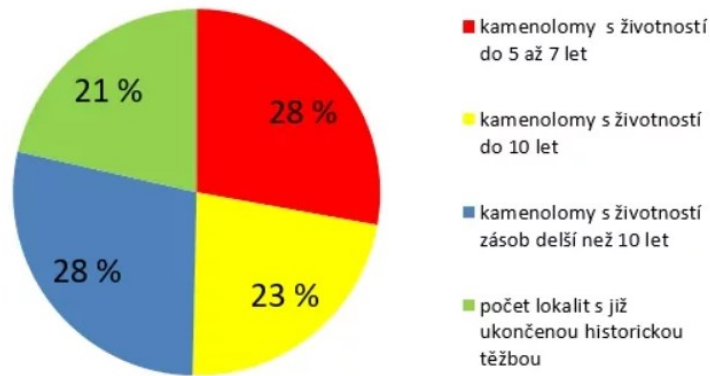
Graf 2: Celková roční produkce štěrkopísku a písku z výhradních (hnědá šrafa) a z nevýhradních (modrá šrafa) ložisek v ČR [17]

Česká republika má rozsáhlé geologické zásoby, včetně štěrkopísku. Nicméně pouze asi 19,5 % z celkových zásob nevyhrazených nerostů je těžitelných, a jen méně než 16 % má povolení k těžbě. Štěrkopísky zaznamenaly postupný růst těžby a spotřeby za posledních deset let. Ačkoli stavebnictví a průmysl stavebních materiálů mají dostatečné výrobní kapacity, dostupnost zásob klesá. Požadavky na kvalitu a množství stavebních surovin stoupají, zejména u hrubších frakcí 4–8, 8–16, a 16–32 mm, což způsobuje jejich nedostatek. Ceny hrubších frakcí od roku 2008 vzrostly o 15 až 25 %. Nedostatek zdrojů je zvláště zřejmý na Vysočině, kam se materiál dováží z Jihočeského a Jihomoravského kraje, a v dalších regionech jako Karlovarský, Plzeňský, Moravskoslezský, Ústecký, Zlínský a jižní část Středočeského kraje. Napříč Českou republikou je nedostatek hrubší frakce štěrkopísku (4–32 mm), zatímco většina pískoven produkuje hlavně písčitou frakci. Ve Zlínském a Olomouckém kraji se štěrk musí dovážet ze Slovenska, což zvyšuje dopravní zatížení a vede ke zdvojnásobení ceny na 600 až 700 Kč/t. [17]

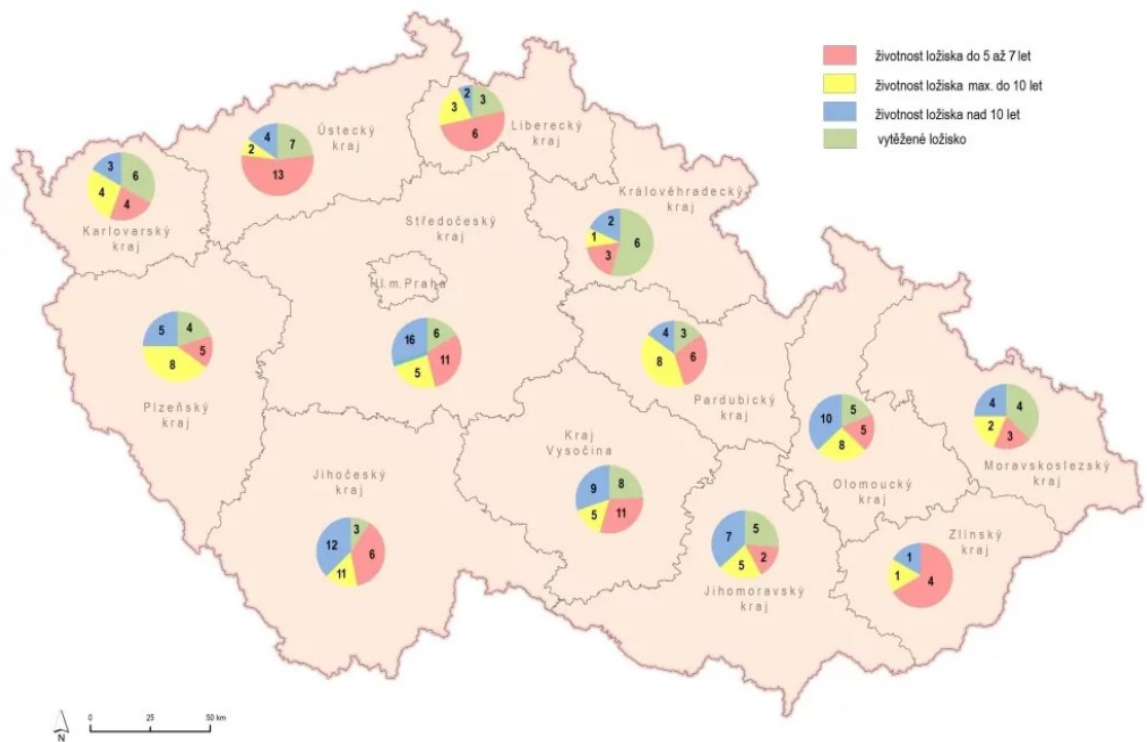
2.1.3 Studie aktuálního stavu a perspektiv

Situace s nedostatkem stavebních surovin v České republice by mohla ohrozit plánovanou stavební produkci i životní prostředí. Kamenivo chybí v mnoha regionech, což znamená nutnost dovážet materiál z větších vzdáleností nebo ze zahraničí. Tento proces by vedl k nárůstu prachu, hluku a dalších negativních dopadů na životní prostředí. Koncem roku 2019 požádalo Ministerstvo průmyslu a obchodu Českou geologickou službu o „Studii vyhodnocení aktuálního stavu a perspektivy využívání stavebních surovin v České republice s důrazem na stavební kámen a štěrkopísky“. Studie má zhodnotit současný stav a budoucí

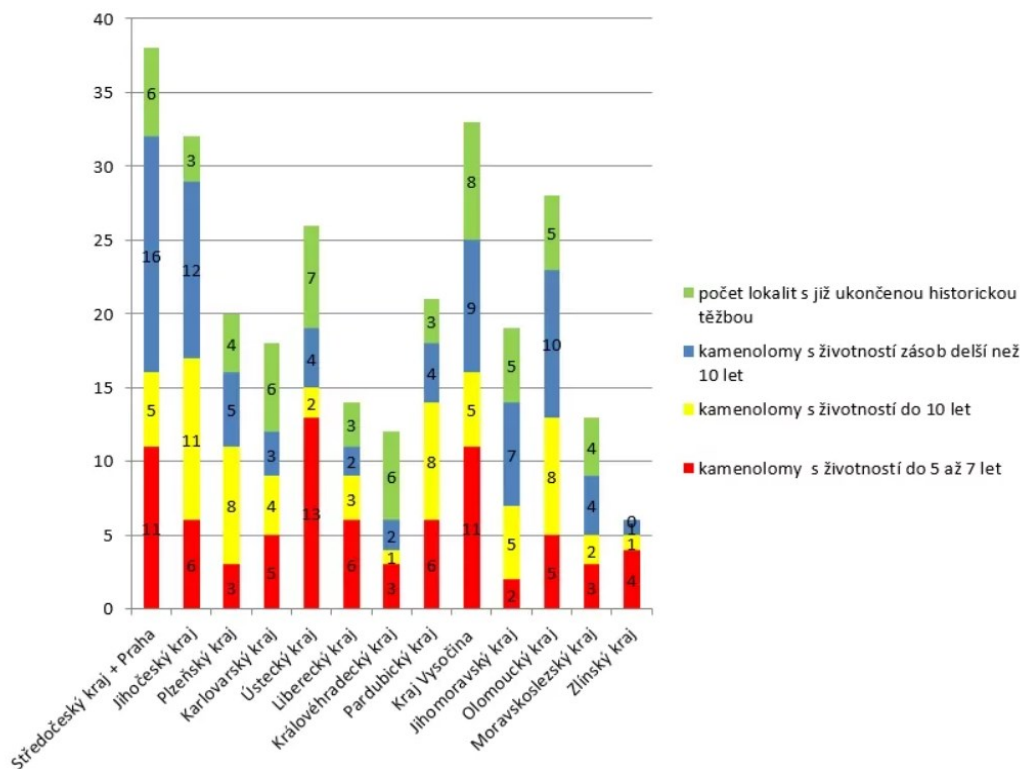
možnosti využití ložisek, analyzovat dostupné zásoby a navrhnout strategie pro budoucí zásobování. Studie taktéž zkoumá další možné lokality a jejich využitelnost a analyzuje možný střet zájmů. Prvotní výsledky studie naznačují, že brzké vyčerpání zásob stavebního kamene by mohlo ohrozit ekonomické potřeby státu. [17]



Graf 3: Procentuální rozdělení životnosti kamenolomů v ČR (Leden 2020) [17]

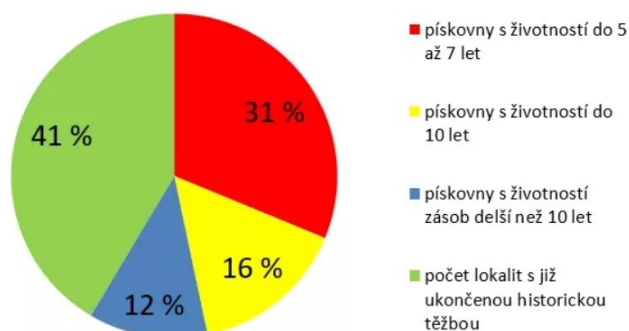


Obrázek 6: Životnost vytěžitelných zásob v kamenolomech dle krajů (Leden 2020) [17]

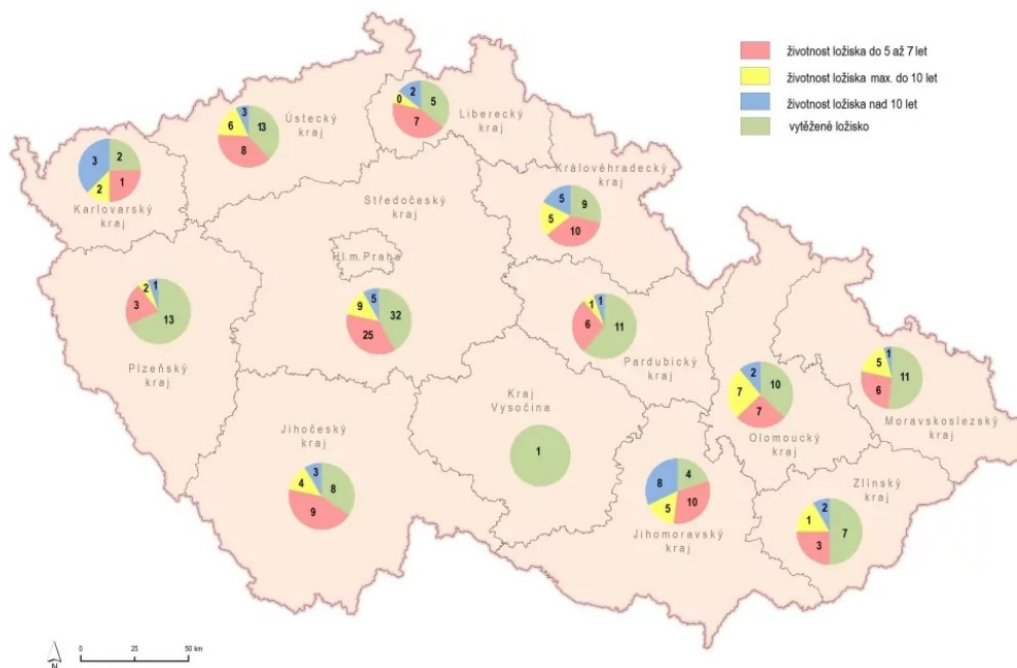


Graf 4: Životnost vytěžitelných zásob v kamenolomech dle krajů (Leden 2020) [17]

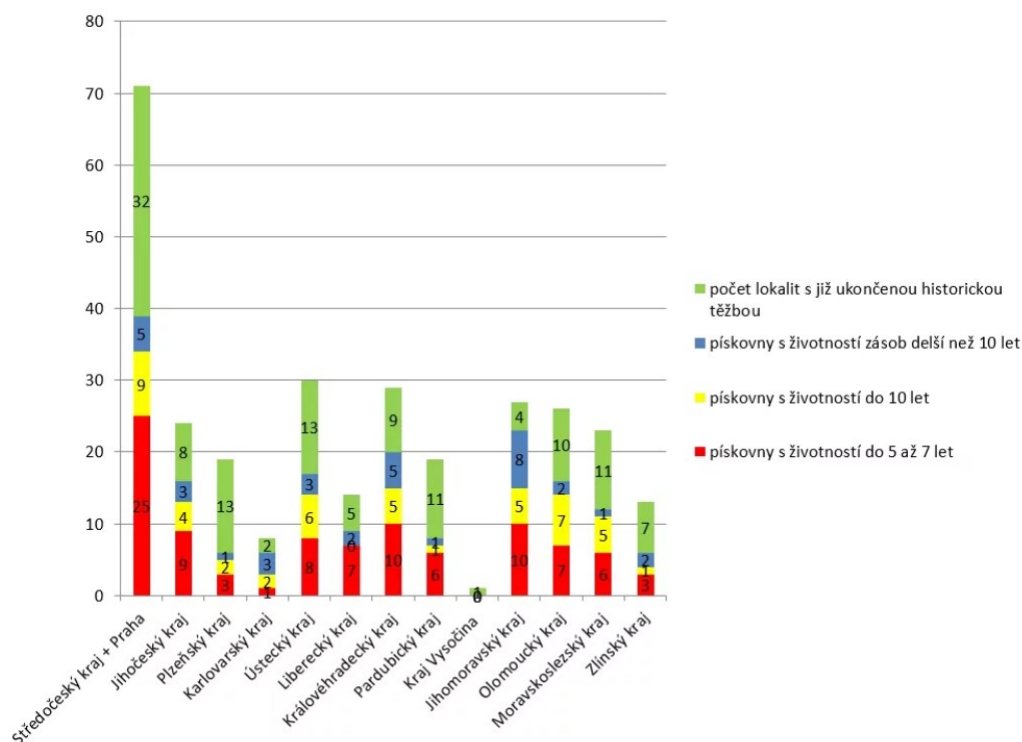
V následujících 10 letech bude ukončeno provozování 50 až 60 % z celkových 204 aktivních kamenolomů a přibližně 60 až 70 % z celkových 149 aktivních pískoven. To znamená, že velká část stávajících kamenolomů a pískoven zřejmě zanikne současně. To povede nejen k poklesu produkce, ale také k zvýšené dopravní zátěži v některých regionech a k horší kvalitě. Na trhu se v současnosti průměrné ceny drceného a těžného kameniva zvyšují rychleji než kdy předtím. Tento trend je důsledkem aktuálního stavu, vývoje a úbytku ložisek určených pro stavební účely. V této současné situaci je zřejmé, že stát pravděpodobně zaměří svou pozornost na dovoz těchto surovin ze zahraničí v krátkodobém horizontu, což však není optimálním řešením. [17]



Graf 5: Procentuální rozdělení životnosti pískoven v ČR (Leden 2020) [17]



Obrázek 7: Životnost vytěžitelných zásob v pískovnách dle krajů (Leden 2020) [17]



Graf 6: Životnost vytěžitelných zásob v pískovnách dle krajů (Leden 2020) [17]

Současná poptávka po kamenivu pro stavební projekty neustále roste a stávající ložiska tuto potřebu nedokážou uspokojit. Nedostatek kameniva je patrný v mnoha regionech, včetně Prahy, Středočeského, Pardubického, Libereckého, Vysočiny, Královéhradeckého, Moravskoslezského, Ústeckého, Zlínského, Karlovarského a Jihočeského kraje, což

znemožňuje spoléhání se na zásoby z jiných oblastí. Řešení nedostatku stavebních surovin vyžaduje státní podporu pro efektivní využití dostupných zásob, průzkum nových lokalit a zejména zvýšení využívání recyklovaného kameniva pro udržitelnost průmyslu v České republice. [17]

2.2 Cement

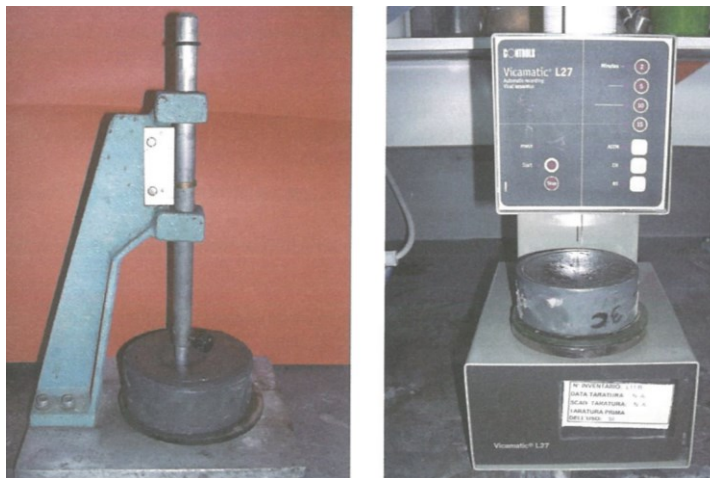
Cement je hydraulické práškovité pojivo, které smíchané s vodou tuhne a tvrdne. Protože tuhne a tvrdne i pod vodou, patří mezi pojiva hydraulická, která nepotřebují k tvrdnutí přístup vzduchu, jako např. vzdušné vápno. Již před naším letopočtem lidé znali hydraulická pojiva. Staří Féničané vyráběli beton ze směsi vápna a cihelné moučky, zatímco Římané používali droliny a sopečný popel z oblasti Puzzoly, což vedlo k názvu pucolánového cementu. [2]

V první polovině 16. století zaznamenal alchymista Bavor Rodovský z Hustiřan první zmínky o hydraulických maltovinách. Velký vzestup výroby vápenného betonu pak přišel v 18. století, kdy se staropražské hydraulické vápno, známé jako "pasti di Praga", vyváželo do zahraničí. Toto pojivo bylo využíváno při stavbě benátských paláců a londýnských nábřeží. Avšak s rozvojem výroby portlandského cementu, který začal průmyslově vznikat v Portlandu, sláva a výroba tohoto pojiva postupně upadala. Do Čech se poté cement dovážel z Anglie, a v menší míře z Německa. [2]

Poměr mezi vodou a cementem je klíčovým faktorem, který určuje kvalitu cementové matrice i celého betonu. Nízký vodní součinitel, tedy menší množství vody vůči cementu, přispívá k vysokým fyzikálně-mechanickým vlastnostem matrice, což je zásadní pro výrobu kvalitního betonu. Do roku 1993 měla každá evropská země vlastní normy pro výrobu a testování cementu. Po zavedení jednotné regulace ve všech zemích EU byla přijata nová norma pro cementy (EN 197-1). [13]

Počátek a doba tuhnutí jsou veličiny, které se stanovují pomocí Vicatova přístroje v souladu s normou EN 196-3: 2005. Pro určení počátku tuhnutí je nejprve připravena pasta normální hustoty. Tato pasta se vytváří smícháním cementu a vody při teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti 65 %. Přípravek se poté nalije do objímky Vicatova přístroje (viz obr. 8. A). Pro stanovení počátku tuhnutí se používá jehla o průměru $1,13 \pm 0,05$ mm, která je s předepsanou hmotností vlačována do pasty normální hustoty (viz obr. 8. B). Důležité je si uvědomit, že není žádný přímý vztah mezi dobou tuhnutí a dosaženou pevností cementu. Doba tuhnutí betonu je stanovena podle ASTM C403-93 a určuje se pomocí penetrace Proctorovy sondy do malty odpovídající malty v daném betonu. [13] Této problematice

se věnoval Martin Drajer ve své bakalářské práci Aplikovatelnost zahraničních portlandských cementů v České republice. [35]



Obrázek 8: Měření normální konzistence na pastě (A) a počátku tuhnutí (B) [13]

Každý typ cementu je klasifikován podle pevnostních tříd, které hrají významnou roli. Teoreticky mohou být cementy dodávány ve třídách pevnosti 32,5, 42,5, 52,5 (viz tabulka 3). Tato čísla udávají minimální tlakovou pevnost malty v jednotkách N/mm², tedy v MPa, měřenou po 28 dnech. Navíc třídy pevnosti mohou být doplněny třemi základními písmeny: N pro normální, R pro rychlý a L pro pomalý, která označují rychlost dosažení počáteční pevnosti. [13]

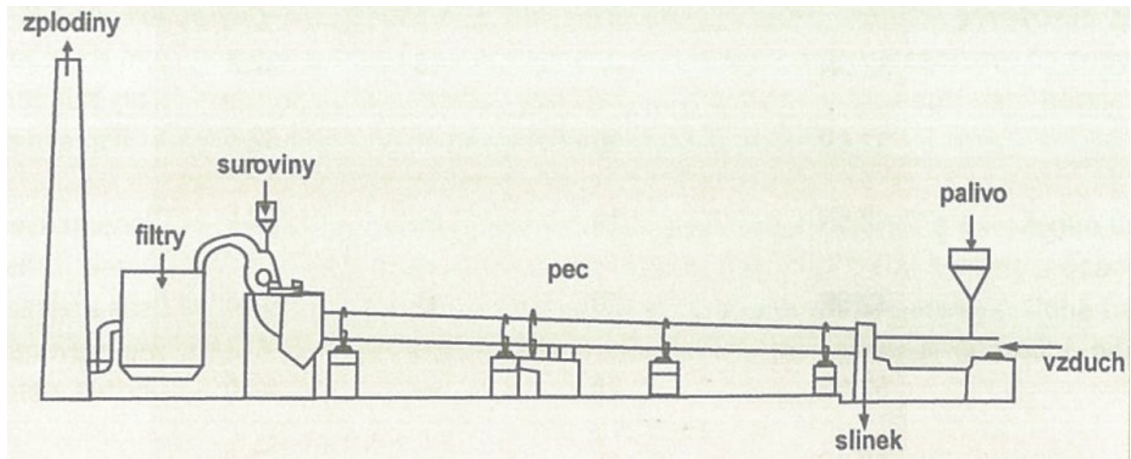
Pevnostní třída	Pevnost v tlaku MPa			Počátek tuhnutí minuta	Objemová stálost (rozeptnutí) mm
	Počáteční pevnost		Normalizovaná pevnost 28 dnů		
	2 dny	7 dnů			
32,5 L ^a	–	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
32,5 N	–	≥ 16,0			
32,5 R	≥ 10,0	–			
42,5 L ^a	–	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60
42,5 N	≥ 10,0	–			
42,5 R	≥ 20,0	–			
52,5 L ^a	≥ 10,0	–	≥ 52,5	–	≥ 45
52,5 N	≥ 20,0	–			
52,5 R	≥ 30,0	–			

^a Třída pevnosti určena pouze pro cementy CEM III.

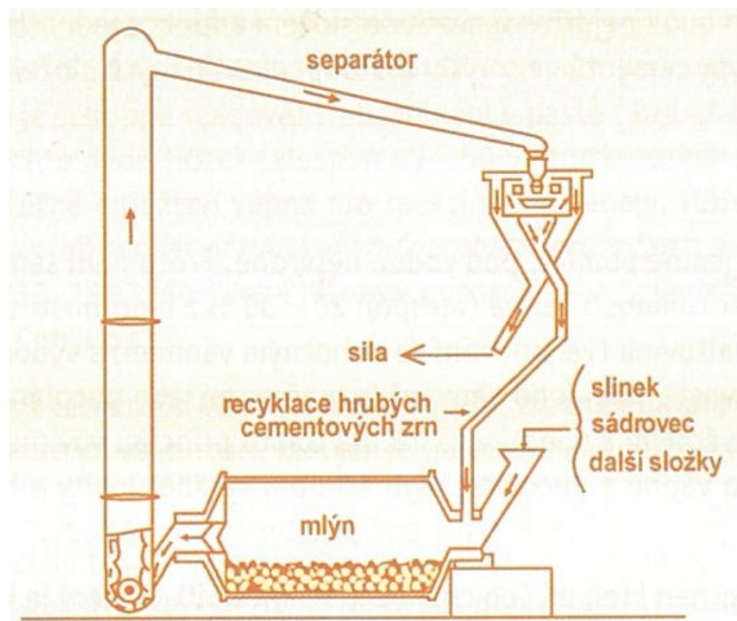
Tabulka 3: Klasifikace cementu dle ČSN EN 197-1

Portlandský cement, zásadní pro moderní hydraulická pojiva, se vyrábí vypalováním směsi vápence a jílu (viz obr. 9), čímž vzniká slínek. Tento slínek se následně mele v kulovém mlýně (viz obr. 10). Samotný mletý slínek však kvůli rychlé reakci s vodou nelze prakticky

použit, proto se přidává síran vápenatý, který správně reguluje tuhnutí cementu. Sádrovec či anhydrit slouží jako tzv. regulátory tuhnutí. [13]



Obrázek 9: Schéma pece na výpal slínku [13]



Obrázek 10: Schéma cementářské mlýnice pro mletí slínku a sádrovce [13]

Různé typy cementů vždy obsahují určité množství portlandského cementu, který se pak obohacuje o různé minerální příměsi. Mezi tyto příměsi patří přírodní a umělé pucolány, granulovaná vysokopeční struska, popílký, křemičité úlety, vápenec a kalcinovaná břidlice. V tabulce 1 ČSN EN 197-1 jsou uvedeny hlavní druhy a specifikace cementu. [13]

2.3 Voda

V oblasti betonářské technologie hraje voda klíčovou roli ve dvou směrech:

- **Hydratace:** Voda je zásadní pro proces hydratace cementu, který vede k vytvoření pevného cementového kamene. Pro tento proces je potřeba minimálně 23–25 % hmotnosti vody vůči cementu. [9]
- **Reologie:** Voda zajišťuje, že čerstvý beton je tvárný. Koheze mezi složkami je dosažena kapilárními silami, zatímco viskozita zaručuje jeho plasticitu. [9]

Ve stavební technologii rozlišujeme dva druhy vody: záměsovou, která se přidává během míchání čerstvého betonu, a ošetřovací, kterou se beton po ztvrdnutí několik dní vlhčí. Oba typy vody musí splňovat kvalitativní požadavky stanovené normou ČSN EN 1008 pro záměsovou vodu do betonu. [9]

Vody, které přijdou do kontaktu s výrobou nebo kanalizačním zařízením, jsou podezřelé a často škodlivé, zejména odpadní, kotelní a průmyslové vody (znečištěné sodou, oleji, uhlím, mlékem, cukrem), protože mohou obsahovat škodlivé látky rozptýlené nebo rozpuštěné, jejichž množství je nepatrné, ale škodlivost je značná. Tyto látky mohou narušit proces tuhnutí, tvrdnutí a vaznosti betonu nebo podporovat nežádoucí vlastnosti betonu, jako je smršťování. Podezřelé vody lze poznat podle barvy, zakalení, chuti a zápachu. [3] [14]

Kvalita vody pro výrobu betonu je ovlivněna jejím zdrojem. Různé zdroje zahrnují:

Pitná voda: Použitelná bez potřeby zkoušení dle příslušné normy [37]. [9]

Recyklovaná voda: V uzavřených technologických cyklech při výrobě transportbetonu běžně vyhovuje. Každodenní měření objemové hmotnosti, která by měla být do 1010 kg/m³, je nezbytné. Zvýšená objemová hmotnost naznačuje vyšší obsah cementového kalu, který je třeba déle sedimentovat. Chemické složení se kontroluje každý týden v prvním měsíci a poté jednou měsíčně v souladu s normou [37]. [9]

Přírodní povrchová a podzemní voda: Musí být testována před prvním použitím podle normy [37]. [9]

Průmyslová odpadní voda: Je použitelná, pokud splňuje předepsaná kritéria. Analýzy se provádějí před prvním použitím a pak pravidelně podle potřeby. [9]

Mořská voda: Může být využita u prostých betonů, ale není vhodná pro železobeton a předpjatý beton kvůli korozi výztuže [37]. [9]

Splašková voda: Není použitelná dle normy [37]. [9]

2.4 Přísady a příměsi

Vzhledem k potřebě měnit vlastnosti a zvyšovat kvalitu betonu a šetřit materiály a energii, se při jeho výrobě začaly používat různé příměsi a přísady. Jejich účelem je zlepšit stabilitu a soudržnost čerstvého betonu, zvýšit jeho pevnost, zpomalit proces tuhnutí, zvýšit vodotěsnost a odstranit póry vytvořené vodou pod zrny kameniva nebo výztuže. Dále snižují propustnost betonu pro plyny a kapaliny, zvyšují jeho plasticitu a celkovou trvanlivost. [14] [15]

Příměsi do betonu: struska, vápenec mletý, popílek, sopečné sklo, pigmenty do betonu, rozptýlená výztuž do betonu. [15]

Přísady do betonu: plastizující, stabilizační, provzdušňující, urychlovače a zpomalovače, těsnící, ostatní (injektáže, inhibitory koroze, biocidní, plynotvorné, protizmrazovací, expanzní, barvicí, hydrofobizační). [15]

2.4.1 Vlastnosti příměsí do betonu

Mikroplnění betonu získává na popularitě díky využití průmyslových odpadů a vedlejších produktů. Nejčastěji se používají: [15]

- **Struska** – hrubozrnný materiál s lesklým povrchem a ostrými hranami; vedlejší produkt průmyslových procesů. Při použití může ovlivnit rychlost reakcí, například tuhnutí betonu, což může vést k nerovnoměrnému tuhnutí a vzniku trhlin. [15]
- **Mletý vápenec** – přispívá k odstranění odlučivosti vody a udržení stabilní barevnosti betonu. [15]
- **Popílek** – vzniká při spalování uhlí a lze ho využít v cementu. Musí se ale dbát, aby jeho podíl nepřesáhl 33 % hmotnosti cementu, protože vysoký obsah zpomaluje tuhnutí a může způsobit objemové změny. [15]
- **Sopečné sklo** – zlepšuje zpracovatelnost čerstvého betonu a zvyšuje hutnost ztvrdlého betonu. [15]

2.4.2 Vlastnosti přísad do betonu

Přísady do betonu se přimíchávají během míchání, obvykle v malých množstvích ve srovnání s cementem, aby upravily vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. [15]

- **Plastifikační přísady** zlepšují manipulaci s čerstvým betonem a umožňují snížit množství záměsové vody až o 20 %, čímž zvyšují pevnost betonu. [15]
- **Stabilizační přísady** zajišťují stabilitu čerstvého betonu během přepravy a ukládání, čímž zamezují odlučování vody. [15]

- **Provzdušňující přísady** vytvářejí malé vzduchové bublinky v betonu, čímž zvyšují jeho vodotěsnost, trvanlivost a mrazuvzdornost. Ideální provzdušnění je 4–6 %; každé 1 % provzdušnění snižuje pevnost betonu o 5 %. [15]
- **Urychlovače tuhnutí** zrychlují nárůst počáteční pevnosti betonu, což je užitečné při výrobě prefabrikátů, ale mohou snížit tlakovou pevnost až o 20 %. [15]
- **Zpomalovače tuhnutí** prodlužují dobu tuhnutí betonu, což je výhodné při delších dobách zpracování, transportu a čerpání betonu. [15]
- **Těsnicí přísady** zlepšují hutnost cementového kamene a snižují nasákavost betonu. [15]
- **Biocidní přísady** snižují riziko biodegradace a napadení betonu plísněmi. [15]
- **Inhibitory koroze** fungují jako antikoroční nátěry na beton. [15]

Tyto přísady zlepšují kvalitu a vlastnosti betonu, což přispívá k efektivnější a odolnější výstavbě. Kvalita betonu závisí na několika faktorech, včetně doby a způsobu míchání, čistoty a složení vody, množství a kvality cementu, a velikosti, čistoty a kvality kameniva. Důležité je také zpracovat čerstvý beton do 90 minut po namíchání, protože vlastnosti betonu se mohou časem měnit. [15]

3 Vlastnosti betonu a zkušebnictví

Poměry míšení jednotlivých složek čerstvého betonu, jakož i způsob dopravy a zpracování čerstvého betonu a ošetření betonu mají vliv na pevnost betonu i na nosnou funkci a trvanlivost betonových konstrukcí. [2]

3.1 Čerstvý beton

Pro dosažení kvalitního betonu je důležité, aby cementová malta vyplňovala mezery mezi zrny hrubého kameniva. Poměr mezi drobným a hrubým kamenivem je určen mezerovitostí hrubého kameniva. Hrubá zrna kameniva tvoří kostru betonu. Mezery vyplňujeme zrny drobnějšího kameniva. Správná granulometrická struktura kameniva je zásadní pro výrobu kvalitního betonu. Většina běžných betonů je vytvářena kombinací dvou frakcí kameniva, hrubého a drobného. Pro betony s vyšší pevností jsou používány tři nebo více frakcí kameniva. [2] [5]

Sypná hmotnost volně sypaného kameniva se vypočte pro každou dílčí navážku podle následujícího vztahu: [39]

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

kde ρ_b je sypná hmotnost volně sypaného kameniva, v megagramech na metr krychlový;
 m_2 hmotnost nádoby se zkušební navážkou, v kilogramech;
 m_1 hmotnost prázdné nádoby, v kilogramech;
 V objem nádoby, v litrech.

Obrázek 11: Výpočet sypné hmotnosti dle ČSN EN 1097-3

Zaznamená se objemová hmotnost volně sypaného kameniva jako průměr ze tří hodnot zaokrouhlená na dvě desetinná místa u hutného kameniva a na tři desetinná místa u pórovitého kameniva. Mezerovitost v procentech podílu objemu mezer mezi zrny kameniva v nádobě se vypočte podle následujícího vztahu: [39]

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

kde v je mezerovitost v %;
 ρ_b sypná hmotnost volně sypaného kameniva, v megagramech na metr krychlový;
 ρ_p objemová hmotnost zrn kameniva vysušených v sušárně nebo předsušených, v megagramech na metr krychlový stanovená podle prEN 1097-6 použitím zkušební navážky ze stejného laboratorního vzorku

Obrázek 12: Výpočet mezerovitosti dle ČSN EN 1097-3

Dávkování kameniva se provádí váhově, což zaručuje homogenitu čerstvého betonu. Velikost hrubé frakce se volí podle typu konstrukce. Do základů a masivních konstrukcí

z prostého betonu se používá hrubé kamenivo o velikosti až 63 mm. Pro železobetonové konstrukce se používají frakce do 32 mm. Kamenivo s většími zrny má menší povrchovou plochu než kamenivo s menšími zrny při stejném objemu. To znamená, že čerstvý beton s většími zrny je účinnější, protože vyžaduje menší množství cementu. [2]

Cement představuje nejdražší nákladovou položku čerstvého betonu. Proto se snažíme vytvořit beton požadované pevnosti s co nejmenším množstvím cementu. Cement je zodpovědný za požadovanou pevnost a odolnost betonu, přilnavost k výztuži a ochranu výztuže před korozi. Pro získání vyšších pevností používáme cement s vyšší pevnostní třídou. (viz tab. 3 kapitola cement.) [2] Dávkování cementu provádíme hmotnostně. Na velkých stavbách jsou pod síly váhová zařízení. Na menších stavbách používáme pytlový cement, který umožňuje hrubší hmotnostní dávkování. [5]

Vodu dávkujeme objemově. Množství vody je určeno podle potřeby hydratace cementu, snížení tření čerstvého betonu a usnadnění jeho zpracovatelnosti. Jestliže je kamenivo nasákavé, množství vody se zvyšuje. Poměr hmotnosti vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu vyjadřuje vodní součinitel. Vodní součinitel běžně osciluje mezi hodnotami od 0,3 do 0,6. Beton s nižším vodním součinitelem vykazuje lepší mechanické charakteristiky, jako jsou pevnost, modul pružnosti a odolnost vůči tlakové vodě, a též delší trvanlivost než beton s vyšším vodním součinitelem. Vodní součinitel se vypočte pomocí hmotnosti účinné vody dělené hmotností cementu. Maximální hodnoty vodního součinitele vzhledem k trvanlivosti betonu jsou doporučeny v tabulkách **F1.1, F1.2 a F.2 normy ČSN P 73 2404**. [17] [2]

3.2 Ztvrdlý beton

V zatvrdlém betonu jsou přítomny látky v různých skupenstvích: tuhé (kamenivo a cementový kámen), kapalné (voda nespotebovaná při hydrataci, voda fyzikálně vázaná na povrchu krystalů a volná voda zadržaná v kapilárách mezi tuhými částicemi) a plynné (vodní pára, vzduch, plynové částice). Kamenivo v betonu je dispergováno a jeho frakce jsou promíseny, čímž vzniká nehomogenní hmota tzv. beton. [5]

Beton se během tuhnutí a tvrdnutí smršťuje na suchu, avšak pod vodou zvětšuje svůj objem. Smršťování je daleko větší než nabývání, a proto je nebezpečnější. Beton se smršťuje, když teplota klesá, a rozpíná se, když stoupá. Vnitřní napětí vzniká v důsledku rozdílných charakteristik materiálů uvnitř struktury. Vlivem vnějších zatížení vznikají napětové stavy. Síly se soustřeďují v oblastech dutin a pórů. Překročení únosnosti může vést k poškození betonu. [5]

Základní charakteristikou betonu je jeho pevnost, která se měří různými způsoby namáhání, jako je tlaková pevnost, tahová pevnost a smyková pevnost. Tlaková pevnost je důležitá pro všechny typy betonových konstrukcí, zatímco tahová pevnost se uplatňuje zejména u silničních betonů a konstrukcí, které musí být odolné vůči vodě. [5]

3.2.1 Pevnost betonu

Hutné kamenivo, které používáme do nosných hutných betonů, má pevnost mnohem větší, než je požadovaná pevnost betonu běžných konstrukcí. Při hodnocení nosnosti je rozhodující síla cementové malty. Pevnost betonu je ovlivněna různými faktory, včetně druhu cementu, povrchu, tvaru a složení kameniva, poměr míšení složek, postupu zpracování, dopravy a ošetřování čerstvého betonu a také okolního prostředí. [5]

Nestejnorodost v pevnosti betonu vzniká v důsledku fluktuace množství vody v čerstvém betonu, což ovlivňují faktory jako je nasákavost a vlhkost kameniva, stejně jako použití různých druhů kameniva. Klíčové je správné dávkování frakcí kameniva, které kontrolujeme pomocí křivky zrnitosti. Jestliže se prověřené poměry frakcí nedodrží a zvětší se množství drobného kameniva v čerstvém betonu, zvětší se plocha povrchu kameniva. Bez zvýšení dávky cementu se zrna nedostatečně obalí cementovou maltou, což vede ke snížení pevnosti betonu. [5]

Přítomnost vody ovlivňuje pevnost betonu prostřednictvím množství vody použitého při výrobě čerstvého betonu. Pokud je použito nedostatečné množství vody, což není dostatečné pro hydrataci cementu a zpracování čerstvého betonu, může to výrazně snížit pevnost betonu. Naopak, pokud obsahuje čerstvý beton nadměrné množství vody, mohou po odpaření vody v betonu zůstat póry. Čím více vody bylo použito, tím více pórů v betonu vznikne. Betony s vysokým obsahem pórů mají tendenci k většímu smrštění a trhlinám, což může snížit jejich pevnost. [5]

Způsob, jakým je čerstvý beton zpracován, má zásadní vliv na jeho konečnou pevnost. Při pečlivém zhutňování se mezery mezi zrny zaplní, vzduch je vytlačen z betonu a vytvoří se kompaktní struktura. Betony, které jsou dokonale zhutněné, mohou mít o 50 % vyšší pevnost než ty, které nebyly dostatečně zhutněny. [5]

Nedostatečným ošetřením čerstvého betonu riskujeme vážné problémy. Hydratace cementu optimálně probíhá při teplotách mezi 15 a 25 °C. Pokles teploty na 8 °C zpomaluje tento proces a při dalším poklesu hydratace zcela zastavuje. Naopak, příliš vysoká teplota způsobuje rychlé odpařování vody, což může vést ke snížení pevnosti betonu, protože nedostatečně hydratovaný beton nemusí dosáhnout plné pevnosti. Jakékoli přerušení

hydratace, ať už kvůli snížení nebo zvýšení teploty, může ovlivnit konečnou pevnost betonu. [5]

Vliv stáří na pevnost betonu se dá změřit například uložením betonu za vhodných podmínek. U běžných cementů dosahuje beton za 28 dní až 90 % své konečné pevnosti, přičemž hydratace cementu prakticky končí do několika let. V suchém prostředí se tento proces odehraje dříve než ve vlhkém a teplém prostředí. Celková pevnost betonu se obvykle ustálí v rozmezí 3 až 5 let. [5]

Transport betonu zásadně ovlivňuje jeho pevnost, zejména když se čerstvý beton přepravuje na dlouhé vzdálenosti. Vibrace motorových vozidel při přepravě způsobují narušení struktury betonové směsi. Na nerovném povrchu a při opakovaných otřesech se těžší zrna usazují na dně, zatímco jemnější kamenivo a cementová malta jsou vytlačovány nahoru. Tento jev vede k oddělování složek směsi a následnému snížení pevnosti betonu během přepravy. [5]

3.2.2 Pružnost betonu

Když je beton krátkodobě namáhán, chová se jako pružný materiál. Velikost jeho deformace závisí na napětí, vlastnostech použitého kameniva a cementového kamene, dále pak na hustotě, vlhkosti a stáří samotného betonu. Deformace však není přímo úměrná napětí. Při návrhu konstrukcí jsou klíčové hodnoty jako modul pružnosti a modul přetvárnosti, které nám pomáhají stanovit přetvárnosti konstrukcí. Statické zatížení se projevuje po krátkém období nebo při opakovaném krátkodobém zatížení, zatímco dynamické zatížení vzniká při opakovaných zatíženích. Dlouhodobé zatížení má trvalý efekt a může způsobit trvalé deformace. [5]

Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku se stanovuje nedestruktivní metodou pomocí ultrazvukové impulsové zkoušky, při níž se měří rychlost šíření ultrazvukových vln v materiálu, a to v souladu s normou [52]. Tato metoda je primárně určena pro zkoušení betonu, ale princip lze aplikovat i na jiné materiály. Norma [52] poskytuje detailní postupy pro provedení zkoušky a vyhodnocení výsledků.

3.2.3 Trvanlivost betonu

Dlouhodobá trvanlivost cementového betonu dosud není zcela známá. Zatím se zdá, že kvalita betonu s časem a vlivem provozu zůstává poměrně stabilní. Staré konstrukce, postavené před 100 nebo 150 lety, které byly nahrazeny novými stavbami, ukázaly vynikající kvalitu betonu. V porovnání s jinými materiály jsou betonové konstrukce mnohem trvanlivější. U betonových konstrukcí je hospodárnost vyšší, neboť nepotřebují nákladnou

provozní údržbu jako konstrukce ze dřeva nebo oceli. Trvanlivost betonu na vzduchu i ve vodě závisí na složení čerstvého betonu a na jeho hutnosti. Při destrukci se betonové konstrukce rozpadají na velké, pevné, těžko rozpojitelé části. Trvanlivost závisí na odolnosti betonu proti různým vlivům prostředí. [5]

3.2.4 Odolnost betonu

Kvalita betonu a použitých složek určuje jeho odolnost. Povrch konstrukce je ohrožen větrem, prachem a ostrými částicemi písku, které mohou poškodit jeho povrchovou strukturu. Při deštích se beton následně nasákne vodou, která v zimě může zmrznout, což rozšiřuje póry v betonu rozšíří. Při cyklech opakovaného rozmrzání a mrznutí dochází k rozrušení malty. Čím je beton masnější a pevnější, tím lépe odolává povětrnostním vlivům. Pro zvýšení odolnosti betonu proti mrazu používáme provzdušňovací přísady. [5]

3.3 Zkoušky betonu

Hlavním cílem stavebního technika, stavbyvedoucího a mistra při výrobě betonových konstrukcí je zaručit dosažení požadovaných vlastností betonu. Přestože vlastnosti, jako je pevnost, jsou ovlivněny mnoha faktory, je nezbytné prověřit vlastnosti složek betonu před zahájením prací a během procesu výroby udržovat kontrolu. [2]

Zkoušky průkazní prokazují vlastnosti čerstvého betonu. Výsledky těchto testů se používají k určení technologického postupu, míry míšení komponentů, úrovně zpracovatelnosti, způsobu přepravy a způsobu zpracování betonu. K potvrzení krychelné pevnosti betonu nebo dalších vlastností slouží kontrolní zkoušky. [2]

Testování čerstvého betonu zahrnuje: Zkoušky: Sednutí kužele podle Abramse, zkouška rozlité, zkouška VeBe, stupeň zhutnění, zkouška stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu, stanovení objemové hmotnosti. [17]

Testování ztvrdlého betonu zahrnuje: [17]

- *zkoušky mechanicko fyzikálních vlastností betonu:*
 - zkouška pevnosti v tlaku:
 - podle tvaru zkušební tělesa (destruktivní zkoušky):
 - na krychli (krychelná pevnost v tlaku),
 - na válci (válcová pevnost v tlaku),
 - zkouška na vývrtech,
 - tvrdoměrné zkoušky (nedestruktivní):
 - schmidtovo kladívko,

- zkouška pevnosti v tahu:
 - v prostém tahu,
 - v příčném tahu,
 - v tahu za ohybu,
- zkouška modulu pružnosti:
 - statického,
 - dynamického (ultrazvuková impulsová zkouška),
- **zkoušky odolností betonu:**
 - chemických,
 - zkouška odolnosti vůči CHRL,
 - zkouška mrazuvzdornosti,
 - zkouška odolnosti proti chloridům,
 - mechanických,
 - zkouška odolnosti proti obrusu.

Zkoušky se dělí na destruktivní a nedestruktivní. Destruktivní zkoušky ověřují pevnost tím, že rozdrťí nebo zlomí testovací těleso, což je možné pouze v laboratoři a nelze tyto zkoušky opakovat se stejným vzorkem. Naopak nedestruktivní zkoušky nepoškozují beton nebo konstrukci, ale pevnost v tlaku určují nepřímou, vycházejí z jiných vlastností betonu. Výsledky těchto testů je třeba ověřovat různými metodami. [2]

3.4 Klasifikace betonu do tříd

Parametr, který vyjadřuje pevnost materiálu v tlaku, je udáván v megapascalích (MPa). Zkoušky pevnosti se provádějí na betonových tělesech ve formě válců nebo krychlí. První číslice (například C20) určuje měrnou pevnost betonu v tlaku, stanovenou na válcových vzorcích po 28 dnech tvrdnutí. Hodnota za znaménkem / reprezentuje specifickou pevnost při stlačení krychlového vzorku nejčastěji o rozměrech 15 cm × 15 cm × 15 cm, rovněž stanovenou po 28 dnech. Čím vyšší je třída betonu, tím vyšší je jeho pevnost v tlaku. [18]

Beton můžeme rozdělit na dvě základní třídy:

- Třídy C: normální a těžké betony (C8/10 až C100/115),
- Třídy LC: lehké betony (LC8/9 až LC80/88).

Beton se označuje písmenem C. Nové třídy betonu, označované jako C a LC, vznikly v důsledku přijetí evropských norem. (Původní označení, jako je B, bylo nahrazeno C a LC; například beton B25 je nyní beton C20/25, beton B60 je nyní beton C50/60.) Třídy betonu jsou popsány v tabulkách 12 a 13 normy ČSN EN 206+A2. [18]

4 Recyklované stavební a demoliční odpady jako jeden z pilířů cirkulární ekonomiky ve stavebnictví

V současné době je cirkulární ekonomika stále více diskutovaným tématem napříč všemi odvětvími výroby. Stavebnictví, jako jedna z klíčových částí ekonomiky, hraje v této oblasti důležitou roli. Cirkulární ekonomika ve stavebnictví má v současnosti zcela nezastupitelný význam pro další rozvoj tohoto odvětví. V posledních letech jsme zaznamenali výrazný pokles dostupnosti tradičních surovin, nezbytných pro stavební činnost, jako jsou stavební kámen a šterkopísky (viz kapitola 2.1 Kamenivo). [20]

Stavebnictví představuje významného spotřebitele zdrojů, přičemž se odhaduje, že tento sektor využívá až polovinu všech nerostných surovin v dané oblasti. Z pohledu cirkulární ekonomiky je takový stav dlouhodobě neudržitelný, což vede k naléhavé potřebě zintenzivnit opětovné využívání materiálů v rámci stavebních činností. To zahrnuje navrhování budov tak, aby bylo možné téměř stoprocentně recyklovat jejich materiály na konci jejich životnosti. [20]

Použití recyklovaných stavebních materiálů je zásadním aspektem cirkulární ekonomiky ve stavebnictví, což významně přispívá k redukci využívání primárních nerostných surovin. Ačkoli je v některých případech nemožné nahradit primární suroviny kvůli jejich specifickým vlastnostem, například v mostních konstrukcích z vysokopevnostního betonu nebo v pojezdových vrstvách dálnic a silnic vyšší třídy, lze v mnoha jiných stavebních aplikacích úspěšně použít recyklované materiály. Zejména při využívání interních minerálních materiálů, jako jsou stavební kámen a šterkopísky, mohou recyklované suroviny efektivně nahradit přírodní zdroje. [20]

Přestože rozšíření používání recyklovaných materiálů ve stavebnictví, zejména při výrobě betonu, je limitováno zastaralými a nepružnými technickými normami, které byly vytvořeny v době, kdy využívání recyklovaného kameniva ze stavebního a demoličního odpadu (SDO) nebylo běžné ani nutné. Navzdory četným úpravám těchto norem, které mají za cíl podporovat použití recyklovaných materiálů, stále přetrvává nedůvěra ohledně jejich použití v čerstvém betonu, a to jak v České republice, tak v celé Evropě. [20]

Výsledky výzkumu a dlouhodobých testů jednoznačně dokazují, že beton obsahující minimálně 60 % recyklovaných stavebních materiálů jako plnivo vykazuje stabilní a velmi dobrou kvalitu. Při dodržení správných technologických postupů tento beton často dosahuje pevností vyšších než 45 MPa. [20]

Pro další rozvoj cirkulární ekonomiky ve stavebnictví a širší využívání recyklovaného kameniva je nutné postupně revidovat a aktualizovat předpisy vztahující se k výrobě stavebních materiálů. Tento krok je nezbytný zejména vzhledem k prokazatelně pozitivním výsledkům vědeckých a výzkumných studií. [20]

4.1 Produkce stavebních a demoličních odpadů

Během druhé dekády 21. století v České republice docházelo k postupnému nárůstu stavební produkce, což vedlo i k vyšší produkci stavebních a demoličních odpadů. Tento trend je zřetelně ilustrován v tabulce 4. I když nárůst nebyl v každém roce konzistentní, v roce 2015 byl zaznamenán výraznější skok. Stavební a demoliční odpady jsou z velké části tvořeny výkopovou zeminou, jejíž podíl na celkovém objemu těchto odpadů zůstává relativně konstantní, pohybující se mezi 65 a 71 %. [20]

skupina	odpad	2013	2014	2015	2016	2017	2018
		[kt]	[kt]	[kt]	[kt]	[kt]	[kt]
17 01	Beton, cihly, tašky a keramika	3 249	3 688	4 419	4 375	4 416	5 144
17 01 01	Beton	1 292	1 422	1 985	1 755	1 845	2 121
17 01 02	Cihly	757	745	840	889	905	774
17 01 03	Tašky a keramické výrobky	12	16	14	15	15	17
17 01 07	Směsi neuvedené pod č. 17 01 06	1 172	1 473	1 580	1 716	1 651	2 232
17 03	Asfaltové směsi, dehet a výr. z dehtu	510	573	896	778	757	907
17 03 02	Asfalt. směsi neuvedené pod č. 17 03 01	508	568	891	752	752	907
17 05	Zemina (včetně vytěžené zeminy z kont. míst), kamení a vytěžená hlšina	9 966	11 128	15 650	12 320	11 774	13 495
17 05 04	Zem. a kam. neuvedené pod č. 17 05 03	9 442	10 619	13 916	11 006	10 802	13 147
17 05 06	Vyt. hlšina neuvedená pod č. 17 05 05	130	102	850	527	667	40
17 05 08	Štěrk ze železničního svršku neuvedený pod číslem 17 05 07	80	112	578	399	305	309
17 06	Izol. a staveb. materiály s azbestem	61	66	62	54	40	43
17 06 04	Izol. mat. nev. pod č. 170601 a 03	35	40	42	36	40	43
17 08	Stavební materiál na bázi sádry	9	11	14	17	13	14
17 08 02	Materiály neuvedené pod č. 17 08 01	9	11	14	17	13	14
17 09	Jiné stavební a demoliční odpady	609	451	722	547	605	713
17 09 04	Sm. SDO nev. pod č. 170901, 02, 03	590	441	709	535	605	713
C E L K E M		14 404	15 916	21 891	18 004	17 954	20 844
z toho 1701 + 170302 + 170904		4 330	4 665	6 019	5 662	5 773	6 764
což z celkového SDO činí v %		30%	29%	27%	31%	32%	32%
podíl skupiny 1705 na celkové produkci SDO		69%	70%	71%	68%	66%	65%

Tabulka 4: Materiálové složení SDO [20]

4.2 Recyklace stavebních a demoličních odpadů

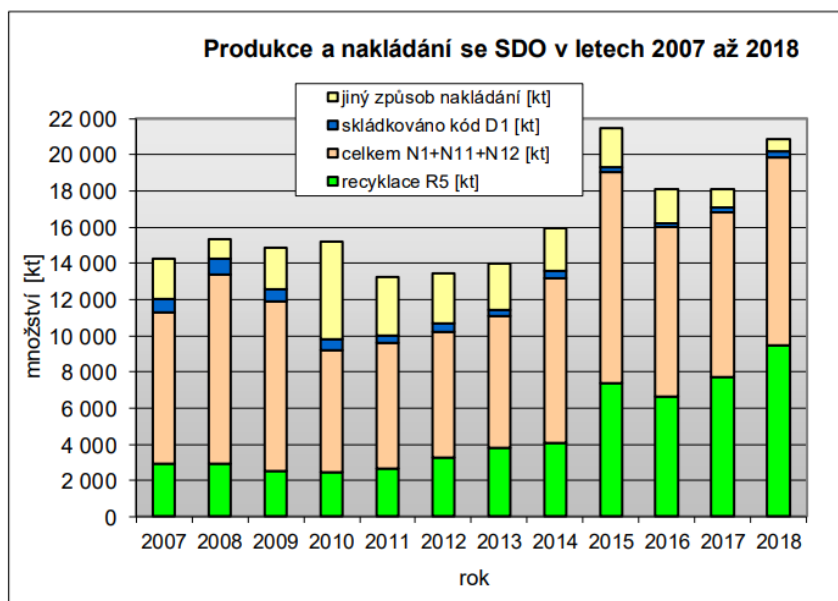
V posledních letech došlo k nárůstu množství recyklovaných stavebních a demoličních odpadů, což je pozitivní vývoj. Nicméně, stále čelíme výzvám při jejich prodeji a využití

ve stavebnictví, přičemž zvláště problematické jsou recyklované materiály z cihelného zdiva. [20] [21]

Grafické znázornění informací o produkci a nakládání s vnitropodnikovými minerálními stavebními a demoličními odpady v letech 2007 až 2018 je uvedeno na sloupcovém grafu 7. V průběhu těchto 12 let se postupně zvyšovala podpora pro využívání druhotných surovin ve všech odvětvích, včetně stavebnictví. Během let 2007 až 2013 se celková produkce stavebních a demoličních odpadů pohybovala kolem 13,5 až 15 milionů tun ročně, zatímco v letech 2015 až 2018 vzrostla přibližně o 30 % na 18 až 21 milionů tun ročně. Při srovnání s produkcí recyklovaných stavebních odpadů je patrné, že množství recyklátů se mezi těmito obdobími téměř zdvojnásobilo. [20]

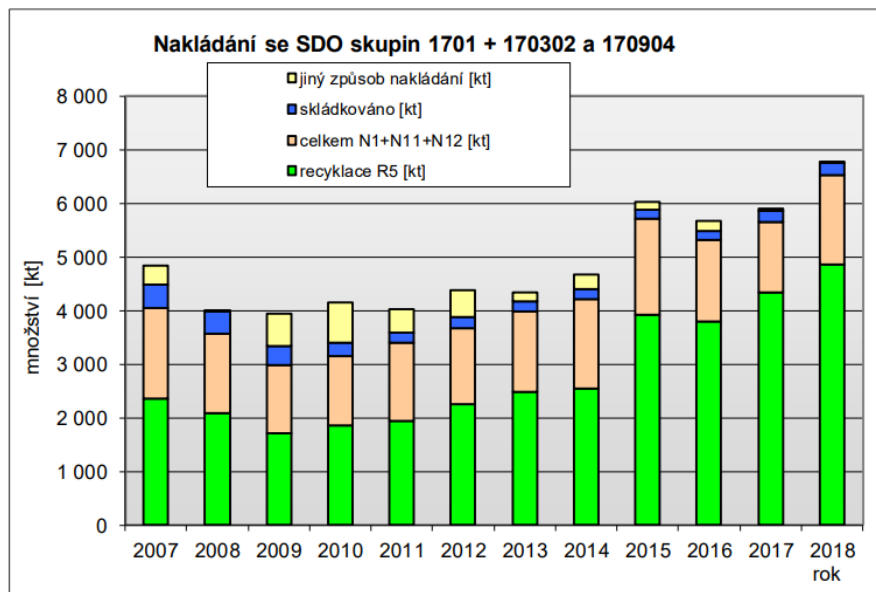
Pro podrobnější analýzu jsou zásadní interní minerální odpady, které pocházejí z materiálů již jednou použitých a znovu využitých, jako je beton, cihelné zdivo a keramika, jež vznikají při demolicích budov. Do této kategorie také spadají odpady z rekonstrukcí komunikací, konkrétně asfaltové směsi bez nebezpečných vlastností (kategorie 170302). Započítávají se i odpady spadající do kategorie 170904, které typicky zahrnují směsi uvedených složek, kameniva a zeminy. [20]

Podíl těchto odpadů na celkové produkci SDO v jednotlivých letech činí cca 27 až 32 % (viz. Tab. 4, předposlední řádek) Produkce a způsoby nakládání s touto částí SDO je zřejmá z grafu 8. [20]



Obr. 1 Celková produkce a nakládání se SDO v letech 2007 až 2018

Graf 7: Produkce a nakládání se SDO [20]



Obr. 2 Produkce a nakládání se SDO vhodnými k recyklaci v letech 2007 až 2018

Graf 8: Nakládání se SDO vybraných skupin [20]

4.3 Cesty ke zvyšování podílu recyklovaných SDO na trhu minerálních materiálů ve stavebnictví

Existuje řada strategií, které mohou zvýšit podíl recyklovaných stavebních a demoličních odpadů na trhu s minerálními materiály ve stavebnictví. Tyto strategie vychází z potřeby splnit několik klíčových požadavků, které jsou nezbytné pro podporu trhu s recyklovanými stavebními materiály. Například Zajištění produkce recyklátů s garantovanou kvalitou, cenová konkurenceschopnost ve srovnání s přírodními nerostnými surovinami, dostupnost dostatečného množství recyklátu i pro velké stavební projekty, podpora využívání recyklovaného kameniva v normativních předpisech pro stavební materiály a směsi. [20]

Aby bylo možné vyrábět vysoce kvalitní recyklované kamenivo, je nezbytné splnit alespoň tři základní podmínky. První dvě se týkají vstupních surovin, které vstupují do procesu recyklace. [20]

- a) Vstupní suroviny by měly být tvořeny jednoduchým inertním minerálním odpadem s co nejmenším množstvím znečištění cizími materiály.
- b) Selektivní demolice by měla být povinná a zakotvena v legislativě, podobně jako je tomu například v Rakousku.
- c) K dosažení vysoké kvality recyklovaného materiálu je nutná recyklační linka, která zajistí třídění, drcení a separaci cizorodých materiálů i prachových částic.

Produkce recyklovaného kameniva zahrnuje různé náklady, které nejsou běžné při těžbě přírodního stavebního kamene a šterkopísku. Mezi hlavní náklady patří zejména povinnost

pravidelného doložení obsahu škodlivých látek podle vyhlášky 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu, ve znění pozdějších předpisů. [20]

Podporu využívání recyklovaného kameniva lze posílit i prostřednictvím zavedení pravidel, která by stanovila jeho povinné použití ve veřejně financovaných projektech. Ve Švýcarsku například platí, že alespoň 40 % betonu, který se používá ve veřejných stavbách, musí obsahovat příměs recyklovaného kameniva, jak uvádí švýcarská Asociace recyklace stavebních materiálů (ARV Baustoffrecycling Schweiz). [20]

Pro běžné využití recyklovaného kameniva v rozsáhlých stavebních projektech je nezbytné zprostředkovat dostatečné množství stavebního a demoličního odpadu (SDO) vhodného k recyklaci. V roce 2018 zařadila Česká agentura pro standardizaci (ČAS) ve spolupráci s Ministerstvem průmyslu a obchodu a Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) do Katalogu výrobků a materiálů produkty obsahující recyklované kamenivo. V období 2019 až 2020 se však objevil významný problém, protože se očekával výrazný nedostatek přírodního kameniva v dostupných těžebních oblastech. Z hlediska cirkulární ekonomiky je tato kritická situace řešitelná pouze masivním využíváním recyklovaného kameniva, stejně jako výstavbou budov, které na konci své životnosti umožní plné opětovné použití materiálu v nových stavbách. [20]

4.4 Techniky pro úpravu a recyklaci stavebního a demoličního odpadu

Od roku 2004, kdy se Česká republika stala členem Evropské unie, přijala závazek dodržovat evropské environmentální zákony na národní úrovni. To zahrnuje integrovanou prevenci a omezování znečištění, přijatou z EU. Transpozice směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU o průmyslových emisích (IED) do českého právního rámce vedla k vytvoření zákona č. 76/2002 Sb., který se týká integrované prevence a omezování znečištění, integrovaného registru znečišťování a změn souvisejících zákonů. [20]

Integrovaná prevence a omezování znečištění (IPPC) je metodika zaměřená na snižování emisí a znečištění do všech složek životního prostředí a minimalizaci vzniku odpadu s možností jeho dalšího využití. Tento přístup, který spojuje ochranu životního prostředí s plánováním a prováděním opatření, klade důraz na prevenci prostřednictvím výběru vhodných postupů a technologií než na použití finálních technologií. Technologie, které jsou považovány za nejlepší dostupné techniky (BAT), představují špičku v oboru a jsou klíčovými prvky v tomto integrovaném přístupu. Tyto techniky jsou popsány v dokumentech známých jako Reference Document on Best Available Techniques (BREF). BREF obsahují

přehled nejlepších dostupných technik v rámci celé Evropy a jsou závazné pro všechny členské státy Evropské unie. [20]

Úprava stavebního a demoličního odpadu (SDO) může výrazně posílit cirkulární ekonomiku, především prostřednictvím následné recyklace materiálů. Tato úprava zahrnuje změnu zrnitosti a třídění, což umožňuje opětovné použití odpadového materiálu jako složky recyklovaných stavebních produktů. Pro komplexní hodnocení environmentálního přínosu recyklačních technologií lze využít kritéria Nejlepších dostupných technik (BAT). [20]

4.5 Vlastnosti recyklovaného kameniva

Nejdůležitějšími vlastnostmi recyklovaného kameniva jsou: objemová hmotnost, nasákavost, přítomnost znečišťujících látek. [13] [21]

4.5.1 Objemová hmotnost recyklovaného kameniva

Hustota recyklovaného kameniva je obvykle nižší než hustota kameniva přírodního (viz tabulka 5). Zatímco objemová hmotnost hrubého recyklovaného kameniva bývá 2300–2500 kg/m³., pro přírodní kamenivo je to 2600–2700 kg/m³. Objemová hmotnost drobného recyklovaného kameniva je ještě nižší, 2150–2350 kg/m³, což je způsobeno vyšším obsahem ztvrdlé cementové pasty. Tato pasta má totiž nižší objemovou hmotnost než přírodní kamenivo a více se váže na povrch drobného recyklovaného kameniva než na povrch hrubého kameniva. [13] [21]



Obrázek 13: Srovnání původního a recyklovaného kameniva

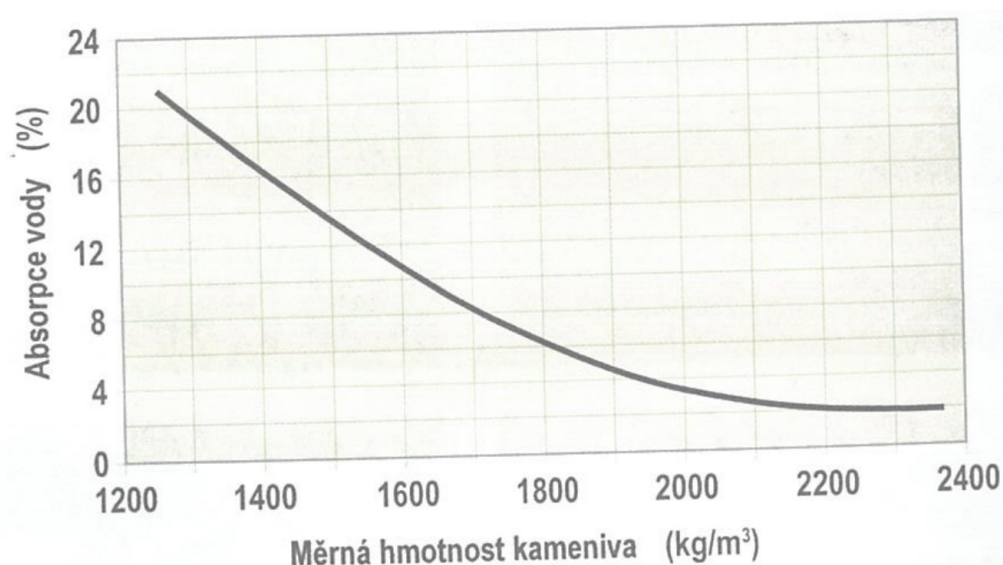
Kamenivo	Objemová hmotnost (kg/m^3)
recyklované hrubé	2300–2500
recyklované jemné	2150–2350
přírodní	2600–2700

Tabulka 5: Objemové hmotnosti recyklovaného a přírodního kameniva [13]

4.5.2 Nasákavost recyklovaného kameniva

Podobně jako u objemové hmotnosti, také nasákavost byla stanovena pyknometrickou metodou. Kamenivo, ať už recyklované nebo přírodní, bylo nejprve ponořeno na 24 hodin do vody v pyknometru, aby bylo úplně nasycené. Po vyjmutí bylo povrchově osušeno, zváženo a následně sušeno v sušárně při teplotě 100 ± 5 °C po dobu 24 hodin. Nasákavost byla následně vypočítána jako poměr mezi hmotností plně nasáklého kameniva a hmotností kameniva sušeného. [19]

Mezi objemovou hmotností recyklovaného kameniva a jeho nasákavostí je zjevná souvislost, jak je znázorněno na obrázku 14. S klesající objemovou hmotností roste nasákavost. Tento jev je způsoben přítomností pórů v cementové pastě. Kvůli vysoké nasákavosti recyklovaného kameniva trvá delší dobu než se tento materiál nasycuje ve srovnání s přírodním kamenivem. To může vést k problémům při míchání betonu, pokud recyklované kamenivo není kompletně nasycené, což následně ztěžuje dodržení požadovaného vodního součinitele. [13] [21]



Obrázek 14: Vliv měrné hmotnosti recyklovaného kameniva [13]

Nejprve je nutné recyklované kamenivo důkladně nasytit vodou a následně nechat 2-3 hodiny proschnout, dokud nedosáhne stavu povrchové suchosti při zachování vnitřní nasákavosti. Takto připravené kamenivo může být použito jako plnivo do betonu. Mnohé normy proto snížily požadavky na nasákavost recyklovaného kameniva, čímž ovšem také omezily možnosti jeho využití. [13] [19]

4.5.3 Látky kontaminující recyklované kamenivo

Jedním z klíčových problémů, které je nutné vyřešit, je odstranění kontaminantů. Recyklované kamenivo může obsahovat různé látky, které je potřeba eliminovat. Během demolice starých staveb se často setkáváme se sádrovcem (síran vápenatý) v omítkových maltách. Pro přírodní kamenivo je stanoven maximální povolený obsah síranů, vyjádřený jako SO_3 , ve výši 0,2 %. Tento limit je stanoven kvůli riziku reakce síranů s C-A-H nebo C-S-H ve ztvrdlé cementové pastě, což může vést k tvorbě ettringitu nebo thaumasitu. Tyto reakce mohou způsobit porušení betonu z důvodu zvětšování objemu. [13] [21]

Pokud se demolovaná konstrukce dostala do kontaktu s rozmrazovacími solemi nebo mořskou vodou, je možné, že recyklované kamenivo obsahuje chloridy. Chloridy lze však účinně eliminovat praním recyklovaného kameniva v horké vodě, díky jejich dobré rozpustnosti. Kromě toho mohou recyklované kamenivo kontaminovat papír, dřevo, bitumeny, sklo a hliník. Nicméně, když je nový beton v takových případech poškozen, je to omezeno především na snížení pevnosti. Kvůli tomuto druhu znečištění není recyklovaný materiál vhodný pro výrobu vysoce kvalitního betonu. Může být použit pouze pro betony s nižší pevností nebo jako podklad. [13] [21]

Když se při demolici jedná o konstrukce s žáruvzdornými cihlami, které obsahují oxid hořečnatý (MgO), může recyklované kamenivo představovat komplikaci. *Při smíchání tohoto kameniva s vodou může totiž docházet k expanzi, při níž vzniká $Mg(OH)_2$, který svými rozpínávacími účinky porušuje beton.* $MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$. [13]

Tabulka 6 obsahuje doporučení RILEM pro využití recyklovaného kameniva, a to na základě jeho vlastností jako jsou hustota, nasákavost a možné kontaminace. Tato doporučení určují, jak je recyklované kamenivo vhodné pro různé kvalitativní úrovně stavebních konstrukcí: Typ I, Typ II a Typ III. Typ III představuje nejvyšší kvalitu, následovanou Typem II a Typem I. [13]

Požadovaná vlastnost	Hrubé kamenivo		
	TYP I	TYP II	TYP III
objemová hmotnost vysušeného materiálu (kg/m ³)	> 1500	> 2000	> 2400
nasákavost (%)	< 20	< 10	< 3
materiál s objemovou hmotností ve stavu NPSK < 2200 kg/m ³ (%)	—	< 10	< 10
materiál s objemovou hmotností ve stavu NPSK < 1800 kg/m ³ (%)	< 10	< 1	< 1
materiál s objemovou hmotností ve stavu NPSK < 1000 kg/m ³ (%)	< 1	< 0.5	< 0.5
obsah skla, bitumenu atd. (%)	< 5	< 1	< 1
obsah kovových částic (%)	< 1	< 1	< 1
obsah organických látek (%)	< 1	< 1.5	< 0.5
jemné podíly < 0,063 mm (%)	< 3	< 2	< 2
písek < 4 mm (%)	< 5	< 5	< 5
obsah síranů vyjádřený jako SO ₃ (%)	< 1	< 1	< 1

Tabulka 6: Požadavky na recyklované kamenivo v závislosti na typu betonu. [13].

4.6 Druhy recyklovaného kameniva

Rychlá expanze světové populace a její koncentrace v městských oblastech zásadně ovlivňují stavebnictví a produkci stavebních materiálů. Recyklování stavebních materiálů je účinným způsobem, jak uspokojit vzrůstající poptávku po nových budovách a zároveň podpořit udržitelný rozvoj na naší planetě. Během výstavby, rekonstrukcí a demolic vzniká stavební a demoliční odpad (SDO), který se dále zpracovává na recyklované kamenivo. Toto kamenivo prochází certifikací v akreditovaných laboratořích, kde jsou určeny jeho specifické vlastnosti. Díky této certifikaci je možné začlenit recyklované kamenivo již do fáze plánování staveb, což přispívá k preferenci recyklace před skládkováním těchto odpadů. [19] [22]

Moderní metody recyklace umožňují používat vysoce kvalitní recyklované kamenivo jako plnivo pro betonové směsi a výrobky. Toto kamenivo se získává ze stavební suti, kterou tvoří směs stavebních odpadů, převážně vznikajících při demolicích pozemních staveb. Složení stavební suti je ovlivněno faktory jako typ budovy, její konstrukční uspořádání, stáří i způsob provedení demolice. V této směsi lze nalézt různé materiály, jako jsou beton, železobeton, cihly, zemina, keramika, kamenná dlažba, vápenec, maltoviny, sádra, dřevo, kovy, plasty, papír, asfalt, dehet, tmely, barvy a lepidla. [19] [22]

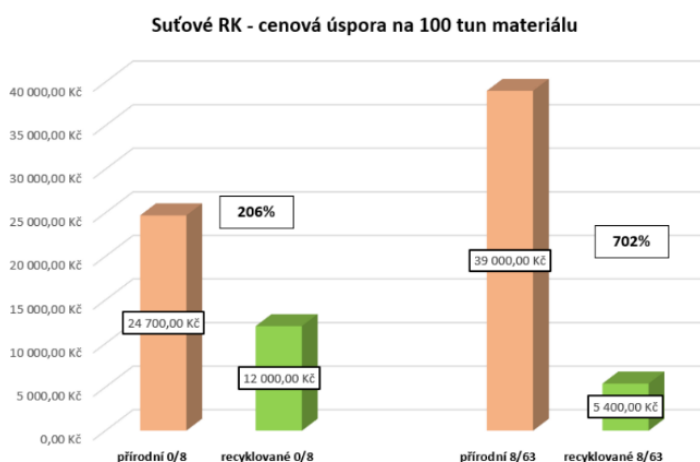
Z recyklačního procesu získáváme několik druhů recyklovaného kameniva:

- asfaltový recyklát = asfaltové recyklované kamenivo
- betonový recyklát = betonové recyklované kamenivo
- suťový recyklát = cihelné recyklované kamenivo

4.6.1 Cihelný recyklát

Recyklované cihelné materiály slouží jako sekundární surovina v stavebním odvětví, přičemž jejich původ je dvojitý: jedná se o výrobní odpad, kde se zpracovávají vadné cihly, a o materiály získané demolicí stávajících cihlových budov a konstrukcí. Recyklované cihelné materiály vznikají drcením, přičemž se využívají drtiče, a následným tříděním na speciálních linkách. Cihelný recyklát se třídí do tří hlavních velikostních kategorií: zrna o velikosti 0–16 mm, 16–32 mm a větší frakce 32–80 mm. [23]

Recyklovaný cihelný materiál nachází uplatnění jako výplň ve zdivu při stavbě monolitických konstrukcí, ale také při výrobě prefabrikovaných dílců, z nichž se vyrábějí vibrolisované tvárnice nebo stěnové prvky. [24] Jemná frakce o velikosti 0/8 mm je nejvhodnější pro zásypy a obsypy kolem kabelů, potrubí a kanalizačních systémů. Na druhou stranu, frakce 8/63 mm se používá k vyrovnávání a úpravám lesních cest a komunikací na stavbách. Rovněž je ideální pro dočasná parkoviště, manipulační plochy, násypy a protihlukové valy. [22] Nejjemnější frakce, jako je cihelný obrus, se v cihelnách přímo přimíchává k cihlářským hlinám při výrobě nových cihel. Díky své ekologické nezávadnosti může být cihelný recyklát využit v různých aplikacích bez nutnosti složitější úpravy. Jednou z nejoblíbenějších aplikací je výroba antuky, která je známá jako povrch pro tenisové kurty. [23]



Graf 9: Suťové recyklované kamenivo – cenová úspora [22]



Obrázek 15: Cihelný recyklát [20]

4.6.2 Betonový recyklát

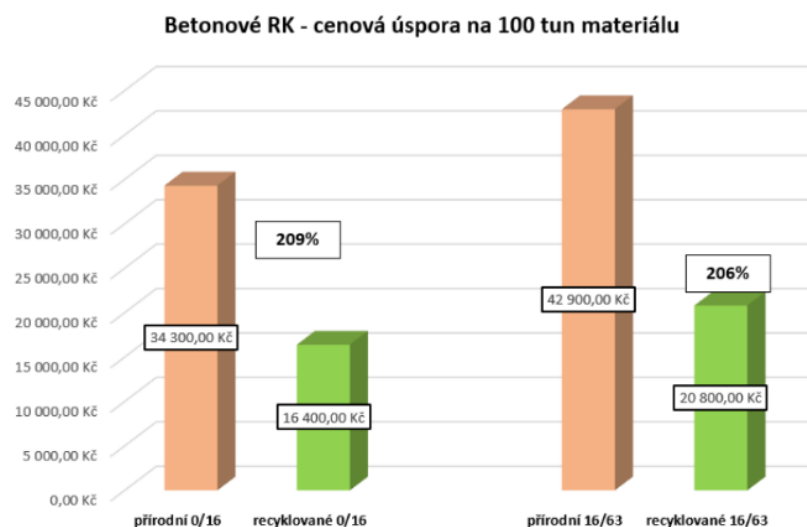
Betonový recyklát vzniká drcením betonu, který je buď z demolic, nebo zbytkovým odpadem z výroby betonových a železobetonových výrobků. Tento materiál se používá jako podklad nebo zpevňující vrstva pro komunikace. Navíc může nahradit přírodní kamenivo v konstrukčních betonech nižších tříd, pokud splňuje specifická kritéria. [24] [25]

Betonový recyklát má dva hlavní zdroje: jedním je odpadní materiál pocházející z průmyslové výroby betonových prvků, druhým je materiál získaný z demolic staveb. U tohoto druhého zdroje může dojít k příměsi jiných materiálů, jako je železo, cihly nebo dřevo, což může být problém při recyklaci. [25]

Betonový recyklát má různé aplikace v závislosti na velikosti jednotlivých frakcí: [22]

- Frakce 0/16 mm: Tato nejmenší frakce se ideálně hodí pro zásypy, obsypy a vyrovnávací vrstvy pod betonovými plochami.
- Frakce 16/63 mm: Tato střední frakce je vynikajícím materiálem pro základové konstrukce a nosné vrstvy komunikací a ploch.
- Frakce 63/125 mm: Největší frakce je určena především pro sanace neúnosných podloží a drenáže.

Každá z těchto frakcí nalezne své nejlepší uplatnění v konkrétních stavebních aplikacích díky svým specifickým vlastnostem.



Graf 10: Betonové recyklované kamenivo – cenová úspora [22]



Obrázek 16: Betonový recyklát [32]

4.6.3 Směsný recyklát

Recyklovaný směsný materiál vzniká drcením a tříděním stavebního a demoličního odpadu, avšak neodpovídá klasifikaci podle norem ČSN EN 12620 + A1, ČSN EN 13043 nebo ČSN EN13242 + A1. Hlavní složky tohoto materiálu nejsou přesně určeny, přičemž celkový podíl nečistot a plovoucích částic (X+Y+FL) je nižší než 10 %. Při výrobě směsného recyklátu se stavební materiál nejprve drtí a třídí, přičemž může obsahovat jak drcené cihly, tak i zbytky zdiva, zatvrdlé maltové pojivo a betonové fragmenty. [26] [27]

Směsné recyklované materiály lze využít na základě jejich vlastností a velikosti frakcí: [28]

- 1) Jemná frakce 0-8 mm je ideální pro nasypání pod komunikace, zásypy inženýrských sítí nebo jako podklad pod kabely, vodovody a kanalizace.
- 2) Střední frakce 8-32 mm je výborným materiálem pro podkladní vrstvy, násypy a aktivní zóny méně zatížených silnic.
- 3) Hrubá frakce 32-63 mm se výborně hodí na stavbu obslužných polních, lesních a dalších méně zatížených vozovek, a také pro tvorbu drenážních vrstev.

Každá frakce má své specifické využití, což zaručuje efektivní aplikaci v různých stavebních projektech.



Obrázek 17: Směsný recyklát [32]

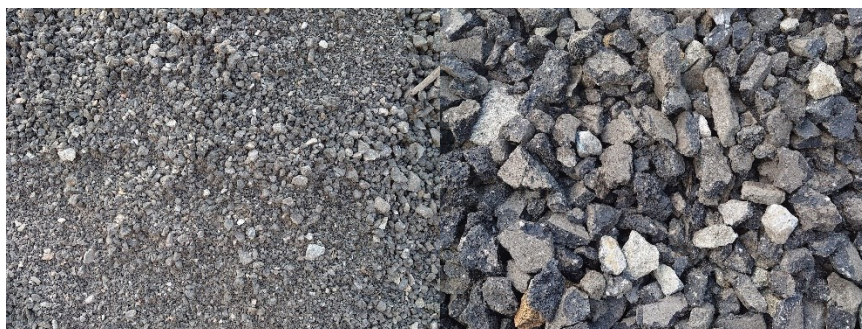
4.6.4 Asfaltový recyklát

Asfaltové recyklované kamenivo, vyráběné drcením a tříděním odstraněných asfaltových povrchů, nachází své využití zejména v technologiích, které pracují za studena a používají emulze nebo cement. Výzkumy ukazují, že tato forma recyklace usnadňuje obalení problematických částic, což vede ke snížení rizika znečištění odpadních vod a okolního prostředí. Nejlepší způsob použití asfaltového recyklátu za studena je následující: Recyklát lze použít bez přidání nového pojiva, zejména pro málo zatížené vozovky, spodní podkladní vrstvy a pro zpevnění šterkopískových podsypaných vrstev. [24]

Frakce asfaltového recyklátu mají různé využití podle jejich velikosti. [22]

- 1) Jemná frakce 0-16 mm je vynikající pro dočasné opravy silnic, slouží jako vyrovnávací vrstva pod asfaltové povrchy a je vhodná pro parkoviště, cesty a zpevnění komunikací.
- 2) Střední frakce 16-63 mm je ideální jako nosná vrstva pod asfaltovými povrchy, plní svou funkci především v těchto aplikacích.

Tyto různé frakce se stávají klíčovými komponentami ve stavebních a rekonstrukčních projektech díky svým specifickým vlastnostem.



Obrázek 18: Asfaltový recyklát [32]

4.7 Národní technické požadavky na recyklované kamenivo

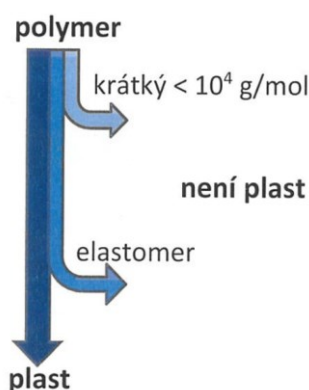
Recyklované kamenivo je zařazeno pod stejné harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na evropský trh jako přírodní kamenivo, což vychází z Nařízení (EU) č. 305/2011. Technické požadavky jsou definovány evropskými normami, které jsou harmonizovány s tímto nařízením. Výrobce musí podle předepsaného systému posuzování shody provést testování k určení specifického typu výrobku. Tento systém musí zajistit, že při uvádění výrobku na trh zůstanou stabilní jak deklarované vlastnosti výrobku od výrobce, tak i vlastnosti stanovené příslušnou harmonizovanou evropskou normou. [19]

Technické vlastnosti přírodního recyklovaného kameniva jsou definovány harmonizovanou evropskou normou EN 12620:2002+A1:2008, známou také jako ČSN EN 12620+A1. Toto kamenivo je klasifikováno jako stavební výrobek, což znamená, že výrobce je povinen deklarovat jeho vlastnosti a připojit označení CE. Takto označený výrobek lze použít k výrobě libovolného betonu, pokud není výslovně vyloučen z působnosti této harmonizované normy. Třídy a úrovně vlastností udávají rozsahy, ve kterých se mohou hodnoty výrobku pohybovat, čímž představují interval možných vlastností. [19]

V informativní příloze E normy ČSN EN 206+A2 jsou uvedeny maximální povolené obsahy recyklovaného kameniva pro beton při různých stupních vlivu prostředí, závislé na zdroji tohoto kameniva. [19]

5 Definice plastu

Mezinárodní norma ČSN EN ISO 472 nám definuje plast jako „materiál obsahující významný podíl vysokomolekulárního polymeru, který lze v určitém stádiu zpracování na konečný výrobek v tekutém stavu tvarovat“. [40]



Obrázek 19: Ilustrace definice plastů [29]

Pojmem "plast" označujeme polymerní materiály s rozdílnou průměrnou molární hmotností a odlišným chováním při deformaci. Přestože definice plastu může být poněkud variabilní, existují určité společné charakteristiky, které lze přisoudit plastům a elastomerům. Obě tyto skupiny materiálů spadají do kategorie polymerů. Zatímco plasty vykazují převážně nevratné (trvalé) deformace při působení vnějších sil, elastomery mají tendenci se po odlehčení této síly vracet do svého původního tvaru. Plasty bývají za normálních podmínek tuhé a mnohdy i křehké, na rozdíl od elastomerů, které se vyznačují větší pružností a ohebností. [29]

Plasty představují materiály složené z makromolekulárních látek, které lze tvarovat působením tepla či tlaku. Tyto vysokomolekulární sloučeniny se obvykle získávají z fosilních paliv, jako je ropa, zemní plyn nebo uhlí. Za běžných podmínek se plasty vyskytují v pevném skupenství, avšak při zvýšení teploty přecházejí do tekutého stavu, což umožňuje jejich tvarování do požadovaných forem. Plastický materiál se skládá z primárních polymerních složek a různých přídavných látek. Mezi ně patří stabilizátory chránící před světlem a teplem, antioxidanty, plniva, barviva, změkčovadla, technologická aditiva pro zlepšení zpracovatelnosti a další příměsi. Tyto komponenty jsou klíčové pro dosažení specifických technických vlastností plastů dle jejich zamýšleného využití. [29]

V případě elastomerů je jejich hlavní vlastností vysoká elasticita a nízká tuhost. To jim umožňuje značně se deformovat za běžných podmínek, aniž by došlo k trvalému poškození. Tato deformace je vratná, což znamená, že jakmile přestane působit vnější síla, materiál

se navrátí do původního tvaru. Klasickým představitelem elastomerů jsou kaučuky, ze kterých se vyrábí pryžové výrobky. Další ukázkový elastomer je například silikon. [29]

5.1 Historie plastů a česká stopa v jejich vývoji

Přestože využití přírodních plastů sahá až do dávné minulosti, skutečný průlom v oblasti moderních plastových materiálů nastal až na sklonku 19. století, kdy byl na světové výstavě v Londýně představen zcela nový typ materiálu. Anglický vynálezce Alexander Parkes tehdy vyvinul směs chloroformu a ricinového oleje, kterou označil jako parkesin. Tato směs položila základy pro budoucí vývoj moderních plastů. Parkes také získal patent na termoplastický materiál zvaný celuloid. [29]

Počátky vývoje polyamidů v tehdejší Československu jsou spojeny s výzkumnými pracemi Baťova ústavu ve Zlíně. Zde v roce 1940 Otto Wichterle, přední český vědec, vypracoval postup pro výrobu kaprolaktamu, který je klíčovou výchozí látkou pro syntézu polyamidů. Tento jeho objev umožnil vznik nového materiálu s názvem "silon", jehož průmyslová produkce byla zahájena o deset let později, v roce 1950. [29]

Otto Wichterle je všeobecně uznávanou osobností v oblasti makromolekulární chemie, kde se zapsal jako skutečný průkopník. Ačkoliv je nejznámější pro svůj revoluční vynález měkkých kontaktních čoček na bázi hydrogelu, jeho přínos pro vědu je mnohem širší. Mezi další jeho významné počiny patří i vývoj polyamidového vlákna silonu. [29]

5.2 Plasty z hlediska životního prostředí

V polovině minulého století byla celosvětová produkce plastů nepatrná, avšak s postupem času došlo k výraznému nárůstu jejich výroby i spotřeby. Zatímco v roce 1950 činila pouhých 1,5 milionu tun, v roce 2010 se vyšplhala na rekordních 265 milionů tun, přičemž v některých obdobích rostla až o 9 % ročně. Tato tendence dále pokračovala a v roce 2012 dosáhla 288 milionů tun a v roce 2020 dokonce 400 milionů tun. Podle prognóz by pak v roce 2050 mohla světová produkce plastů přesáhnout 700 milionů tun. Evropský kontinent není v tomto ohledu výjimkou. V roce 2010 zde bylo spotřebováno 47 milionů tun plastů, což představovalo nárůst o 5 % oproti předchozímu roku. Tato spotřeba vyústila ve vznik 25 milionů tun plastového odpadu, z něhož přibližně 15 milionů tun bylo recyklováno nebo energeticky využito. Zbývajících 10 milionů tun plastového odpadu však skončilo na skládkách, což z finančního hlediska znamená, že Evropa takto ročně "pohřbí" v zemi zhruba 8 miliard eur. [30]

Přístupy různých evropských zemí k nakládání s plastovým odpadem se značně liší. Země jako Německo, Švýcarsko, Lucembursko, Belgie, Dánsko, Nizozemsko a Rakousko zcela

zakázaly skládkování plastů. Na opačném konci spektra se Česká republika umístila přibližně ve střední příčce, kdy zhruba 55 % plastových odpadů stále končí na skládkách. Pozitivní zprávou však je, že Česko patří v Evropě na vynikající 4. místo v recyklaci plastů s 31% podílem. Oblastí, kde má Česko ještě rezervy, je energetické využití plastových odpadů. Alarmující jsou však globální údaje o znečištění světových moří plasty. Odhaduje se, že v mořích "plave" až 100 milionů tun plastového odpadu a podle údajů OSN se v každém čtverečním kilometru moře nachází průměrně 18 tisíc plastových částic. Tato čísla poukazují na naléhavou potřebu komplexního přístupu k nakládání s plastovými odpady na celosvětové úrovni. [30]

Jedním z klíčových opatření pro zlepšení životního prostředí je omezení ukládání komunálního a průmyslového odpadu na skládky. V blízké budoucnosti by měly být na skládkách umístěny pouze inertní odpady, z nichž se do vody uvolňuje minimální množství těžkých kovů a jiných škodlivin. Německo v tomto směru učinilo významné kroky, když v roce 2001 zakázalo skládkování průmyslového odpadu a od roku 2005 toto omezení rozšířilo i na komunální odpad. Již v roce 1991 vstoupil v Německu v platnost zákon, který nařizuje vytrídřit 64 % plastových obalů z komunálního odpadu a zakazuje jejich spalování v energetických zařízeních. Naproti tomu v ostatních zemích Evropské unie se upřednostňuje spalování odpadních plastů společně s komunálním odpadem za účelem výroby elektrické energie a tepla. Vzhledem k naléhavé potřebě snižovat produkci plastových odpadů na celosvětové úrovni, vědci a technici neustále hledají nové způsoby jejich recyklace. [30]

5.3 Struktura a vlastnosti plastů

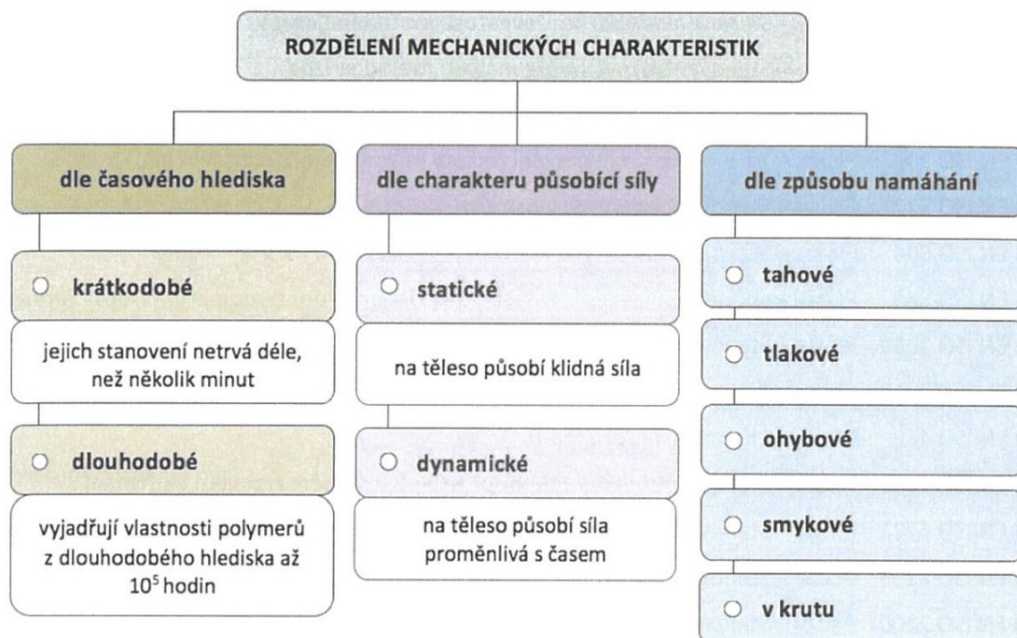
Četné materiálové charakteristiky poskytují cenné informace nezbytné pro vhodné využití plastových hmot. Ačkoli v zásadě lze hovořit o čtyřech základních mechanických vlastnostech: (pevnosti, pružnosti, plasticitě a houževnatosti), spektrum relevantních parametrů popisujících mechanické chování plastů je mnohem širší. Tyto doplňující mechanické charakteristiky tak umožňují detailnější popis specifických projevů těchto materiálů a usnadňují tak jejich cílené nasazení v různých aplikačních oblastech. [29]

5.3.1 Základní vlastnosti plastů

Mechanické vlastnosti plastových materiálů nejsou neměnné veličiny, ale proměnné hodnoty, které se mohou lišit v závislosti na řadě faktorů. Mezi ně patří způsob přípravy a tvar zkušebních vzorků, ale také podmínky, za kterých jsou zkoušky prováděny. Za účelem experimentálního stanovení těchto vlastností jsou připravována speciální zkušební tělesa, na nichž se sleduje jejich odezva při působení vnějších sil. Jinými slovy, mechanické

charakteristiky plastů nelze vyjádřit absolutními konstantami, neboť jsou ovlivněny celou řadou proměnných parametrů spojených s výrobou zkušebních těles a průběhem samotných zkoušek. [29]

Materiálové listy poskytují údaje o mechanických vlastnostech získané experimentálním měřením na normalizovaných zkušebních vzorcích. Tyto vzorky jsou vyrobeny předepsaným způsobem z práškového či granulovaného polymerního materiálu, a to vstřikováním, lisováním nebo odléváním. Mechanické charakteristiky však lze zjišťovat i na tělesech obrobených z finálních výrobků či polotovarů. Samotný proces výroby zkušebních těles podléhá normě ČSN EN ISO 294 Plasty – Vstřikování zkušebních těles z termoplastu, která tuto oblast přesně specifikuje. [29]



Obrázek 20: Schéma rozdělení mechanických charakteristik plastů [29]

5.3.2 Základní fyzikální vlastnosti

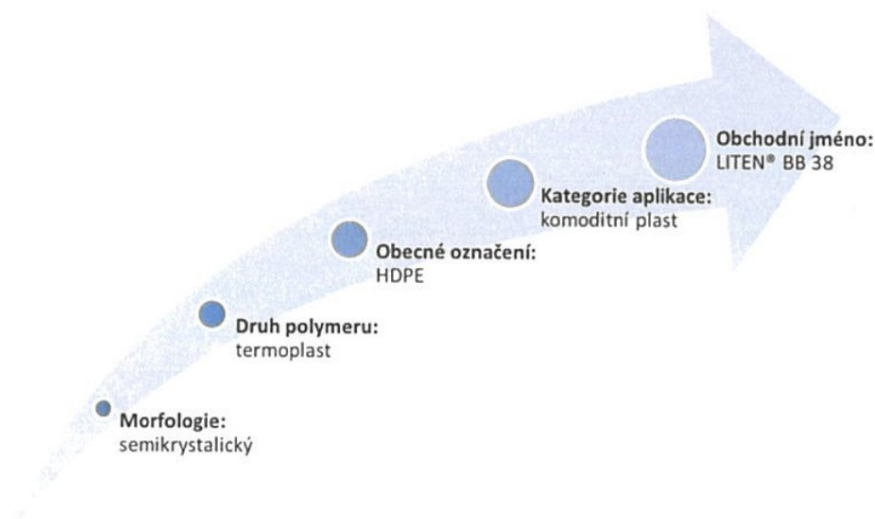
Fyzikální vlastnosti plastových výrobků: [29]

- hustota: nízká,
- tvrdost: nízká,
- tuhost: nízká,
- opotřebení: vysoké,
- tepelná roztažnost: vysoká,
- tepelná vodivost: nízká,
- měrná tepelná kapacita: nízká.

Vedle základních fyzikálních charakteristik vykazují plastové materiály řadu dalších důležitých vlastností, jež jsou specifické pro konkrétní druhy polymerů. Jedná se o charakteristiky jako elektrické a optické vlastnosti, akustické parametry, odolnost vůči působení okolního prostředí, chování při hoření či interakce s biologickými systémy. Tato komplexní paleta vlastností odlišuje jednotlivé plasty a umožňuje jejich cílené využití v řadě různorodých aplikací s ohledem na specifické požadavky dané oblasti použití. [29]

5.3.3 Klasifikace, značení a přizpůsobení plastů

Plastové materiály představují nesmírně rozmanité spektrum, které v současnosti zahrnuje více než stovku různých polymerních druhů, jako například vysokohustotní polyethylen (HDPE), polypropylen (PP), polystyren (PS) nebo polyamid (PA). Tato rozsáhlá skupina látek se však dále štěpí na obrovské množství specifických typů a receptur, jejichž počet dnes přesahuje 119 tisíc. Právě mimořádná diverzita plastů činí nezbytným zavedení systematické klasifikace a specifikace, které umožňují jejich přesnou identifikaci a rozlišení. Tento přístup je klíčový zejména z toho důvodu, že každý plastový materiál vyžaduje specifické podmínky pro zpracování, odpovídající jeho unikátním vlastnostem a charakteristikám. [29]



Obrázek 21: Klasifikace a bližší specifikace plastů [29]

Šipka na obrázku ukazuje, jak lze specifikovat určitý typ plastu – příklad: semikrystalický polymer, termoplast, obecné označení je “high-density polyethylen“ (HDPE) a jedná se o komoditní plast typu Liten BB 38. [29]

Označení různých polymerů je určené v následujících normách viz. Tab. 7

Hmota	Druh	ISO Norma
Polymer	Plast	ISO 1043-1
	Elastomer	ISO 1629
	Termoplastický elastomer	ISO 18064
Plniva a výztužné materiály		ISO 1043-2
Změkčovadla		ISO 1043-3
Zpomalovače hoření		ISO 1043-4

Tabulka 7: Odkazy na systémy pro značení plastů, elastomerů a aditiv [29]

Světový trh polymerních materiálů lze strukturovat do tří hlavních segmentů na základě jejich postavení a role. První a objemově nejvýznamnější kategorií jsou takzvané komoditní plasty určené pro masové a rozšířené aplikace napříč obory. Tyto základní polymerní látky, mezi něž patří polyethyleny (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyethyltereftalát (PET) včetně jeho kopolymerů a polyvinylchlorid (PVC), se vyznačují vysokým objemem produkce i spotřeby, avšak zároveň představují cenově nejdostupnější řešení v oblasti plastových materiálů. Jejich dostupnost, nízká cena a široké využití činí z komoditních plastů klíčovou a nejvýznamnější třídu pro řadu průmyslových odvětví. Vedle komoditních plastů pro široké využití představují samostatnou třídu takzvané inženýrské plasty. Tyto materiály nacházejí uplatnění především v konstrukčních aplikacích, neboť se vyznačují výrazně lepšími užitnými vlastnostmi a často disponují i vyšší teplotní odolností. Do této kategorie lze vzhledem ke své modifikovatelnosti a výbornému souboru vlastností zařadit i polypropylen. Poslední skupinu tvoří high-tech polymery neboli speciální plasty, které nabízejí zcela unikátní užitné charakteristiky určené pro špičková a vysoce specializovaná použití s náročnými požadavky na výkon materiálu. [29]

Plasty se používají v různých odvětvích. Komoditní plasty jsou používány v odvětvích s velkým využitím, jako je obalová technika, stavebnictví a zemědělství. [29]

Materiál	Písmenný kód	Číselný kód
Polyethyltereftalát	PET	1
Vysokohustotní polyetylén	HDPE	2
Polyvinylchlorid	PVC	3
Nízkohustotní polyetylén	LDPE	4
Polypropylén	PP	5
Polystyren	PS	6
Ostatní		7

Tabulka 8: Komoditní plasty [29]

Naopak technické plasty se používají například v dopravní technice a elektrotechnickém průmyslu. [29]

Materiál	Zkratka
Polyamid	PA (Nylon)
Polykarbonát	PC
Polypropylen	PP
Polyuretan	PUR
Polymerní kapalné krystaly	LCP
Polyuretanové termosetové elastomery	TSU
Termoplastické elastomery	TPE

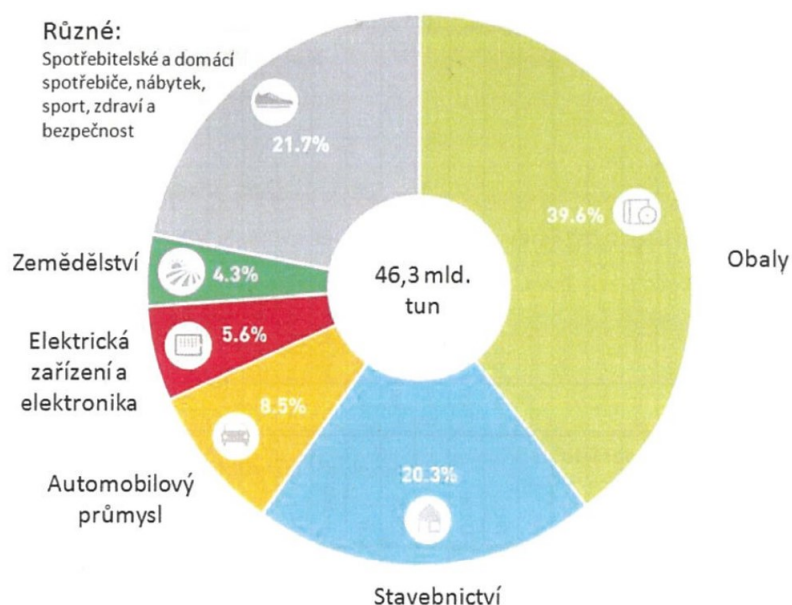
Tabulka 9: Technické plasty [29]

5.3.4 Diverzifikace plastů pro různé aplikace

Odvětví plastů zaznamenalo za posledních několik desetiletí obrovský nárůst. Vývoj v tomto dynamickém sektoru však nezůstal bez dopadů na geopolitickou rovnováhu. Zatímco v minulosti byla Evropa lídrem v oblasti plastového průmyslu, hospodářské výkyvy a krize způsobily, že tuto vedoucí roli postupně převzala Čína. V současnosti se Čína podílí na celosvětové výrobě plastů 25 %, což ji řadí na první místo, zatímco Evropa se 20% podílem

klesla na druhou příčku. Plastikářský průmysl tvoří komplexní řetězec zahrnující výrobu primárních plastových materiálů, jejich zpracování a recyklaci odpadů. Toto odvětví zaměstnává v rámci EU-27 přibližně 1,4 milionu pracovníků v 58 190 firmách a podílí se 2,6 % na hrubém domácím produktu Evropské unie. [29]

Je neoddiskutovatelným faktorem, že moderní život je bez plastů těžko představitelný. Hlavní aplikační segmenty plastů v Evropě jsou: obalový, stavební, dopravní průmysl, zemědělství a lékařství. [29]

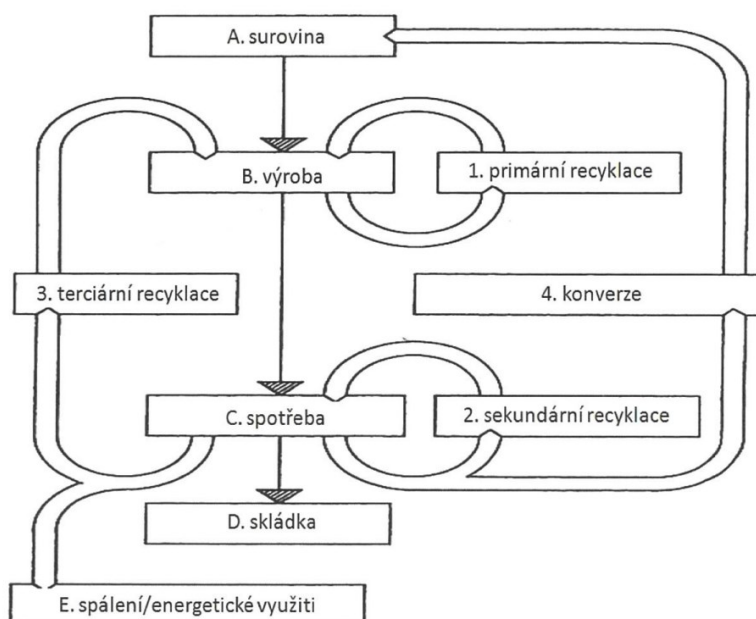


Graf 11: Použití plastů podle odvětví v Evropě [29]

5.4 Recyklace plastů

Plasty představují rozmanitou skupinu materiálů s odlišnými vlastnostmi, které jsou vyráběny pomocí různých technologických postupů. Z tohoto důvodu se i proces jejich recyklace liší a vyžaduje specifické uspořádání recyklačních linek. Cílem recyklace plastů je znovuzpracování zbytkových nebo odpadních polymerních materiálů do formy, která umožňuje jejich opětovné využití. [29]

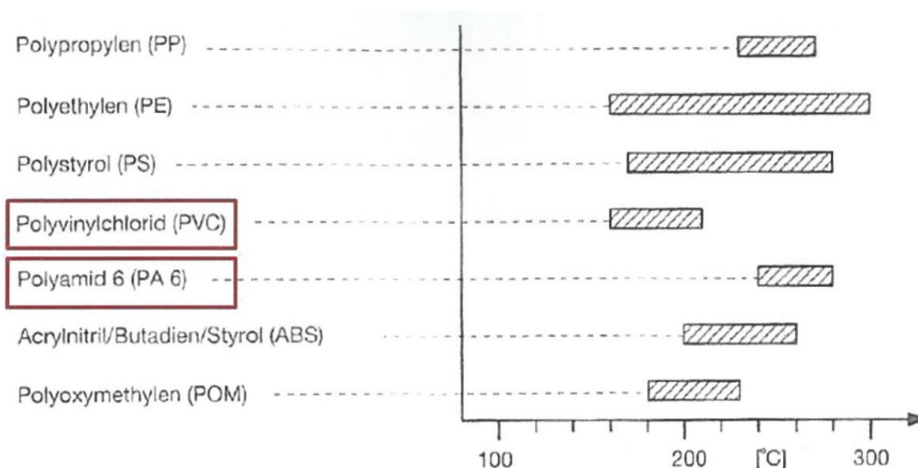
Základní definice „recyklace“ lze uvést následujícím způsobem: „proces nakládání s odpadem, které vede k jeho dalšímu využití“. Následující schéma ukazuje jednotlivé způsoby recyklace: [29]



Obrázek 22: Způsoby recyklace [29]

5.4.1 Problémy recyklace plastů

Jedním z klíčových problémů při recyklaci termoplastů je jejich odlišná teplota zpracování. Termoplasty nelze zpracovávat pod jejich specifickou teplotou tání, a pokud se tato teplota překročí, začnou degradovat. Tento problém je zřetelný například u materiálů jako PVC a PA6 (viz obr. 23). [29]



Obrázek 23: Rozsah teploty tavení vybraných plastů [29]

PA6 je široce používán pro ozubená kola, armatury a ložiska, v automobilovém průmyslu pro základní díly a jako materiál pro elektrické skříně. PVC se používá při výrobě odpadového potrubí, okenních a dveřních rámu či podlahových, střešních krytin, izolačních folií a lékařských pomůcek. [29]

Jedním z dalších zásadních problémů při recyklaci plastů je jejich kontaminace. Například umělá jahodová příchut' může zůstat trvale uvězněna v materiálu jogurtového kelímku, což znemožňuje jeho ekonomicky výhodné čištění. Kontaminace se často drží na plastu kvůli elektrostatickým silám, což může vést k poškození strojů nebo nástrojů, jako je písek ve vytlačovacím stroji nebo ve vstřikovacím nástroji. Tento problém snižuje kvalitu výsledných produktů a ekologické přínosy, protože materiál nemusí dosahovat požadované pevnosti a tuhosti. Možným řešením je přidání většího množství nového materiálu. V kontextu recyklace plastů, kterou zkoumáme v této bakalářské práci, by tyto základní problémy mohly být do určité míry eliminovány. [29]

5.4.2 Druhy recyklace plastů

Způsoby recyklace se přizpůsobují charakteristikám konkrétního plastu, aby byla zachována jeho funkčnost a využitelnost. Zatímco některé plasty lze recyklovat relativně snadno, u jiných se tento proces může ukázat jako značně komplikovaný v důsledku jejich unikátních vlastností nebo složení. Efektivní recyklace tedy vyžaduje pečlivé roztrídění a přizpůsobení technologie zpracování specifickým požadavkům daného polymerního materiálu. [29]

Primární recyklace se zaměřuje na zpracování průmyslových odpadů. Ekonomické tlaky vedou firmy k neustálému snižování svých výrobních odpadů. V kontextu termoplastů to zahrnuje shromažďování, mletí a třídění odpadů podle jejich typu, což umožňuje vytvářet recyklované směsi, které mohou nahradit nový materiál při výrobě, například nafukovacích fólií nebo tepelně tvarovaných plastových výrobků. [29]

Sekundární recyklace vlastně neznamená recyklaci v pravém slova smyslu, ale spíše opakované využití již existujících výrobků. Cílem je, aby firmy a spotřebitelé shromažďovali plastové výrobky po jejich prvním použití. I když tato metoda nešetří suroviny použité k výrobě původního výrobku, umožňuje zachovat celý výrobek pro další využití, jako jsou například igelitové tašky vyrobené z PP nebo PE. [29]

Terciární recyklace zahrnuje zpracování odpadů po jejich použití. Firmy a spotřebitelé jsou motivováni ke sběru specifických plastů, které jsou čisté a tříděné podle typu. Příkladem může být sběr a recyklace víček z plastových lahví vyrobených z HDPE. Tato víčka, protože jsou z jednoho typu plastu a obvykle málo znečištěná, představují výhodný výchozí bod pro kvalitní recyklaci. Na druhou stranu, výsledný materiál může mít nedefinovanou barvu, což omezuje jeho použití. Navíc tento materiál nesmí přijít do přímého styku s potravinami kvůli

možnému nebezpečnému znečištění, což dále omezuje jeho aplikace. Přesto tento příklad demonstruje úspěšnou recyklaci, jelikož výrazně šetří suroviny. [29]

Konverze představuje chemickou recyklaci, kde polymery jsou rozloženy za účelem získání chemických látek potřebných pro syntézu nových plastů. Tento proces je vzácnější kvůli obtížné kontrolovatelnosti rozkladu polymerů. Výsledná kvalita chemikálií obvykle není optimální ani přesně definovaná. Další komplikací je, že proces zanechává zbytky obsahující stabilizátory a jiná aditiva, což vede ke vzniku směsi škodlivin v chemicky aktivní formě. Příkladem je recyklace PET lahví, kde je cílem přeměnit je na polyesterová vlákna, která se následně využijí k výrobě oděvů. [29]

Spalování a využití energie z plastů nepatří mezi tradiční recyklační metody, protože neprodukuje novou surovinu nebo materiál, ale zaměřuje se na využití energetického obsahu plastů. Přibližně 60 % energie spotřebované při výrobě plastu lze získat zpět spalováním (viz. Obr [29]). Tento proces však zanechává anorganické škodliviny, které se při spalování neodstraní. Tyto látky zůstávají v popelu a popílku, což zvyšuje jejich toxicitu. I přes to, popel a popílek mohou být často využity ve stavebním průmyslu. [29]

Odpady vznikající v energetickém sektoru hrají klíčovou roli v hospodářství každé země. Tato oblast zahrnuje elektroenergetiku, plynárenství, těžbu a zpracování uhlí, ropy, uranových rud a teplárenství. Energetický průmysl je významným producentem odpadů, zejména v podobě metalurgických a energetických produktů, jako jsou struska, popílek a škvára.

Většina těchto zbytků je materiálově využitelná jako vedlejší energetické produkty. Popel, který je tuhým zbytkem po spalování hnědého uhlí, se často používá ve stavebnictví jako stavební podloží. Popílek jsou jemné částice, které jsou unášeny proudem spalin ze spalovací komory a zachyceny v zadních tazích kotle nebo v odlučovačích. Je důležité rozlišovat mezi čerstvými popílky, které jsou obvykle toxické vůči životnímu prostředí, a plavenými popílky, které jsou hydraulicky přepravovány na úložiště a obsahují minimum těžkých kovů, což je činí méně toxickými. Plavené popílků se využívají v podzemním stavitelství, při výrobě stavebních materiálů a v silničním stavebnictví pro násypy provozních ploch, zásypy opěr mostů, náhradu podložní zeminy a jako přísada do přírodního kameniva. Struska, která je výsledkem spalování uhlí, je porézní tuhý materiál s obsahem vody kolem 15 až 45 %. Struska se používá při výrobě cementu a cihlářských výrobků, jako přísada do maltovin a škvárobetonu, a také při zimní údržbě komunikací.

5.5 Zpracování odpadních plastů

Před samotným technologickým zpracováním plastů a kompozitů se využívají různé postupy a procesy, které připravují nebo upravují plastové materiály tak, aby dosáhly požadovaných konečných vlastností. Tyto technologie zahrnují například dopravu plastů, přidávání různých přísad, recyklaci, sušení a hnětení plastů. Technologie používané před samotným zpracováním plastů a kompozitů slouží nejen k optimalizaci jejich konečných vlastností, jako jsou fyzikální, mechanické, chemické, elektrické a tepelné charakteristiky, ale také k přípravě materiálů pro dávkování a dopravu, vzhledem k jejich sypné hmotnosti. Mezi technologie zahrnující zpracování odpadních plastů patří například míchání a hnětení, granulace, tabletování, recyklace, pyrolýza, visbreaking, termické štěpení, koksování, zplynění, sušení a doprava materiálu. [33]

Plastová drť – Pro další zpracování technologického či užitného odpadu lze využít buď recyklát (plastovou drť), nebo regranulát. Recyklát představuje plastové díly a odpad, který je zpracován pouze mletím či drcením do podoby plastové drtě (viz obr.7). Regranulát naopak vzniká z rozemletého nebo nadrceného odpadu, který je před dalším použitím granulován a často obohacen o různé přísady, plniva nebo aditiva. [33]

Plastové drtě jsou základním a cenově nejdostupnějším produktem z recyklace plastových odpadů. Slouží jako vstupní materiál pro výrobu různých plastových výrobků napříč mnoha průmyslovými odvětvími. Použitím drtí se nejen šetří finanční prostředky potřebné pro novou výrobu, ale také se pozitivně ovlivňuje životní prostředí. Plastové drtě se vyrábějí z široké škály běžných plastů, jako jsou PE, PP, PS, ABS, PA, PVC a PC. [31]

Granulace – V technologických procesech se plasty používají v různých formách, které jsou nutné pro konkrétní zpracovatelský proces. Vstupními tvary mohou být granule, kaše, pasty, premixy, kapaliny, rozemleté plasty (recykláty) nebo polotovary jednoduchých geometrických tvarů. Granule patří mezi nejčastěji používané tvary a mohou mít podobu krychlí, čoček či válečků (viz obr.1). Díky dobré sypné hmotnosti se granule snadno míchají s jinými materiály a jejich dávkování je efektivní. [33]

Technologie určená pro výrobu granulí se nazývá granulace. Existují dvě hlavní metody granulace plastů: granulace z pásu a granulace ze strun, které se mohou provádět za studena nebo za tepla. Volba konkrétní granulovací technologie je ovlivněna vlastnostmi zpracovávané taveniny, jako jsou tekutost a tvrdost, dostupným prostorem, požadovaným výkonem a ekonomickými aspekty celého procesu. [33]

Pyrolýza – odpadních plastů probíhá bez přítomnosti kyslíku při teplotách mezi 400 až 900 °C. Tento proces vede k produkci různých reakčních produktů s odlišným obsahem vodíku, mezi které patří pyrolýzní plyn, pyrolýzní olej a pyrolýzní koks. O výstavbu zařízení pro pyrolýzu projevily zájem například společnosti British Petroleum, BASF, Shell a ABB. [30]

Visbreaking – je proces, při kterém se do vakuového zbytku přidává 5 až 10 % odpadních plastů, je považován za účinnou metodu využití těchto materiálů. Výsledný produkt se primárně používá při výrobě diesellových paliv a různých olejů, ale také nachází uplatnění v produkci tašek. [30]

Termické štěpení – V podniku Leunawerke Leuna se osvědčilo termické štěpení odpadních plastů, zejména polyolefinů. Při teplotě 400 °C v extruderu vzniká minimum plynných produktů a dosahuje se vysoké míry odštěpení organicky vázaného chloru jako chlorovodíku. Výsledný kapalný produkt se následně přidává do nástřiku pyrolýzní jednotky buď jako tavenina, nebo po zředění. [30]

Koksování – odpadních plastů je považováno za slibnou metodu jejich zhodnocení. Při tomto procesu není nutné plasty předem prát a přítomnost papíru nevádí. Výťažnost kapalných podílů z plastů dosahuje až 80 %. Odpadní plasty lze účinně zpracovávat ve všech typech koksování, včetně: (Výroba hutnického koksu z černého uhlí, pozdržené koksování ropných zbytků, fluidní koksování ropných zbytků). [30]

Zplynění – Odpadní plasty lze zplyňovat samostatně nebo ve směsi s ropnými zbytky či uhlím. Tento postup byl testován firmou Texaco na experimentálním zařízení s kapacitou 25 tun denně při teplotě 1370 °C. Firma Shell také pracuje na zplyňování odpadních plastů bez nutnosti náročného předčištění. Problémem při tomto procesu je přítomnost PVC v odpadech, protože jeho spalováním vzniká chlor, který způsobuje podráždění očí a plic s bolestivými následky. Koncentrace chloru dosahující 1000 ppm ve vzduchu je pro člověka smrtelná. [30]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1 Přehled zkoušených receptur

Předmětem bakalářské práce bylo zhodnocení aplikovatelnosti odpadních materiálů do prefabrikovaných betonových konstrukcí. V rámci experimentální části práce bylo potřebné navrhnout recepturu směsného recyklátu, která by měla srovnatelné vlastnosti se standardní recepturou PREFA PRODUKT používanou pro výrobu prefabrikátů. Dále byla standardní receptura PREFA PRODUKT obohacena o plastový recyklát a byly analyzovány výsledné vlastnosti této modifikované receptury.

Celý proces byl zahájen rešerší problematiky využití odpadních materiálů ve stavebnictví, kde byly shrnuty současné poznatky v dané oblasti, včetně přínosů a možných úskalí aplikace recyklovaných složek do čerstvého betonu. Následně byly popsány základní principy cirkulární ekonomiky ve stavebnictví, techniky pro úpravu a recyklaci stavebních a demoličních odpadů, vlastnosti a druhy recyklátů a byli přiblíženy základní vlastnosti plastového recyklátu a jeho výroby.

V experimentální fázi byla navržena receptura směsného recyklátu, která kombinovala různé druhy odpadních materiálů pro nahrazení části tradičních složek betonu při zachování požadovaných vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu. Poté byla připravena modifikovaná varianta standardní „prefabrikační“ receptury obohacená o plastový recyklát. U obou typů receptur byly realizovány zkoušky na čerstvém betonu zaměřené na konzistenci, objemovou hmotnost, obsah vzduchu a další parametry ovlivňující zpracovatelnost a kvalitu betonu.

Následně byla zhotovena zkušební tělesa, na kterých byly po předepsané době zrání provedeny zkoušky ztvrdlého betonu se zaměřením na pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem, objemovou hmotnost, CHRL, hloubka průsaku tlakovou vodou a další charakteristiky popisující finální vlastnosti betonu. Získaná data byla vyhodnocena pro posouzení aplikovatelnosti navržených směsí s odpadními materiály do prefabrikovaných betonových konstrukcí.

S ohledem na spolupráci s komerční sférou nebude uvedeno přesné dávkování jednotlivých vstupních surovin ani množství vyprodukovaného odpadu.

1.1 Receptura PREFA PRODUKT

Standardní receptura PREFA PRODUKT – beton pevnostní třídy 30/37 XF4, se používá především pro výrobu rámových propustků a základových konstrukcí. Vstupními složkami této receptury byl cement třídy 42,5 R, drobné kamenivo frakce 0-4 mm, hrubé kamenivo frakce 4-8 mm, hrubé kamenivo frakce 8-16 mm a superplastifikátor Premia 546.

Superplastifikátor byl přidáván za účelem zlepšení vlastností čerstvého betonu, konkrétně snížení potřeby záměsové vody o 5-30 %, zvýšení soudržnosti a hutnosti betonu, prodloužení doby zpracovatelnosti čerstvého betonu, zabránění vzniku trhlin při smršťování a zachování obsahu vzduchu v čerstvém betonu bez ovlivnění provzdušnění. Dále byla použita přísada Air A 50 %, která slouží jako provzdušňovací přísada, která v betonu vytváří stabilní síť mikroskopických bublinek. Na čerstvý beton má plastifikační účinek, který umožňuje snížit množství záměsové vody a omezit segregaci a pocení betonu.

Přísada je určena ke kombinaci s klasickými superplastifikátory na naftalénové nebo melaminové bázi i ke kombinaci se superplastifikátory nové generace. Další přísadou je Fibrin 23 D, který je v podobě polypropylenových vlasových vláken. Vlákná Fibrin 23 D se velmi rychle rozptylují a rozloží se rovnoměrně v objemu betonu. Díky své pevnosti v tahu zabraňují vlákná Fibrin 23 D vzniku smršťovacích trhlin, zpomalují pocení betonu, snižují propustnost a zabraňují vytrhávání betonu při odbednění. Ztvrdlý beton s vlákny Fibrin 23 D je odolnější vůči abrazi, nárazům, rozmrazovacím cyklům a agresivním prostředím. Všechny přísady a příměsi byly navrženy firmou Chryso Chemie.

1.2 Receptura plastového recyklátu.

Současná hrozba environmentálního znečištění způsobeného plasty je alarmující. Tato kritická situace vedla k myšlence přidávat plastový recyklát do betonu ve formě plastové drtě a sledovat, jaký vliv bude mít na výsledné vlastnosti betonu v porovnání se standardní recepturou PREFA PRODUKT a recepturou se směsným recyklátem.

Tato koncepce využití plastového recyklátu v betonu bude dále rozvíjena v navazující diplomové práci. Plastová drť bude nahrazena speciálně upraveným plastovým recyklátem, jehož vlastnosti budou obdobné jako u přírodního kameniva. Cílem je nalézt alternativní způsob využití plastového odpadu, který přispěje k řešení problému nadměrného znečištění životního prostředí plasty. Základní receptura PREFA PRODUKT bude modifikována nahrazením části přírodního kameniva určitým množstvím speciálního plastového recyklátu.

V rámci prezentace výsledků bude pro každou recepturu přistoupeno k samostatnému uvedení výsledků, po čemž bude následovat jejich vzájemné porovnání napříč všemi testovanými recepturami. Prezentace a analýza dat ze zkoušek provedených na čerstvém betonu jednotlivých navržených receptur bude obsažena v následujících kapitolách. Složení plastové drtě nemůže být zveřejněno, jelikož se jedná o soukromé vlastnictví firmy PESL, která si nepřála uvádět podrobnosti o složení a výrobě plastového recyklátu. Receptura plastového recyklátu vycházela z receptury PREFA PRODUKT, blíže specifikované v kapitole 1.1, která byla obohacena o zmíněnou plastovou drť.



Obrázek 24: Plastový recyklát

1.3 Receptura směsného recyklátu

V rámci bakalářské práce byla navržena receptura směsného recyklátu, která měla splňovat požadavky pro prostředí XC2 a XC3 dle mezních hodnot pro složení a vlastnosti betonu platných v České republice s předpokládanou životností 50 let podle tabulky F.1.1 normy ČSN P 73 2404. Na základě daného prostředí byly stanoveny zkoušky akreditovanou zkušební laboratoří.

Jednalo se o recepturu pro beton pevnostní třídy C20/25 (s provzdušňovací přísadou), který je určen pro výrobu silničních panelů, betonových bloků využívaných k realizaci opěrných a dělících stěn, případně pro výrobu sloupů. Receptura směsného recyklátu byla navržena a odzkoušena za přísného a odborného dohledu vedoucího Ústavu stavebního zkušebnictví Jiřího Kudrny, aby nedošlo k jakýmkoliv pochybnostem ohledně vlastností této receptury. Zkoušky, které byly prováděny na všech recepturách, jsou podrobněji popsány v kapitole 3.

Vstupními složkami této receptury byl cement třídy 42,5 N, přírodní kamenivo frakce 0-4 mm, směsný recyklát frakce 4-8 mm, směsný recyklát frakce 8-16 mm, provzdušňovací přísada a speciální superplastifikační přísada pro beton s recyklovaným kamenivem – Quad 920, která byla speciálně vytvořena pro tuto danou směs. Tato přísada slouží k zajištění požadovaných vlastností betonů, ve kterých je přírodní kamenivo nahrazeno jak betonovým, tak především keramickým recyklátem, případně jejich kombinací. Quad 920 zajistí dostatečné ztekucení pojiva v betonu s recyklovaným kamenivem, kde hraje výraznou roli nasákavost a velká variabilita složení plniva. Přísada Quad 920 na základě jedinečného složení výrazně prodlužuje zpracovatelnost betonů s recyklovaným kamenivem, snižuje lepivost a zajišťuje tak dobrou čerpatelnost. Quad 920 přispívá k dobré manipulativnosti betonové směsi i při vyšším dávkování. Daná přísada byla navržena společností Chryso Chemie.



Obrázek 25: Směsný recyklát

Recepturu směsného recyklátu nelze porovnávat s předchozími dvěma recepturami z důvodu jiné pevnostní třídy betonu.

2 Výroba zkušebních těles

Výroba zkušebních těles proběhla v souladu s normou [41] Nejprve byla dne 19.03.2024 vyrobena zkušební tělesa standardní receptury PREFA PRODUKT dle specifikace v kapitole 1.1, která byla následující den odformována. Dne 21.03.2024 byla vyrobena další sada zkušebních těles standardní receptury PREFA PRODUKT, avšak se směsí obohacenou o plastový recyklát podle kapitoly 1.2. Tato tělesa byla rovněž odformována následující den. Dne 22.04.2024 byla v Ústavu stavebního zkušebnictví v Pardubicích vyrobena zkušební tělesa směsného recyklátu viz kapitola 1.3.



Obrázek 26: Odlévání těles do forem

Ke každé receptuře bylo vyrobeno dohromady:

- devět válců o rozměrech 150 mm x 300 mm,
- devět trámců 100 mm x 100 mm x 400 mm,
- osmnáct krychlí 150 mm x 150 mm x 150 mm.

Formy na válce 150 mm x 300 mm byly použity plastové pevné. Formy na trámce byly použity montované ocelové. Formy na zkušební krychle byly použity plastové pevné. Zkušební tělesa byla vyrobena ve větším počtu s ohledem na možnost poškození a zabezpečení dostatečného množství náhradních vzorků. Tento přístup se ukázal jako vhodný, jelikož při destruktivním zkoušení došlo k poškození některých těles v důsledku chybného nastavení zkušebního přístroje v Ústavu stavebního zkušebnictví. Vyšší počet vyrobených těles umožnil nahradit poškozené vzorky a pokračovat v experimentu.



Obrázek 27: Výroba zkušebních těles

Každá receptura byla rozdělena do tří záměsí, které byly vyrobeny v různé dny. Z každé záměsí bylo zhotoveno:

- šest krychlí o hraně 150 mm
- tři válce o rozměrech 150 mm x 300 mm,
- tři trámce o rozměrech 100 mm x 100 mm x 400 mm.

V betonárně byla nejprve do speciální míchačky vložena a řádně promísena složka kameniva. Poté byl přidán cement a směs byla opět důkladně promíchána. Nakonec byla přilita voda a směs byla homogenizována. Tímto postupem byla vyrobena standardní receptura PREFA PRODUKT. U receptury s příměsí plastového recyklátu byla standardní receptura PREFA PRODUKT po vymíchání vysypána do stavebního kolečka. Následně byl čerstvý beton přemístěn do zednického kalfasu, kde byl promíchán s požadovaným množstvím plastového recyklátu. Hmotnost přidávaného recyklátu byla přesně odměřena na váze, aby bylo zajištěno stejné dávkování pro všechny záměsí. Tímto způsobem bylo dosaženo homogenního rozložení plastového recyklátu ve všech zkušebních tělesech.

Po tomto procesu proběhly zkoušky čerstvého betonu a výroba zkušebních těles. Formy byly před plněním ošetřeny odformovacím prostředkem. Tělesa byla zhutněna na vibračním stole, přičemž formy byly plněny ve třech vrstvách a po každé vrstvě byla prováděna vibrace. Během plnění forem bylo sledováno, zda nedochází k segregaci kameniva. Po naplnění byly formy přikryty strečovou fólií a plachtou kvůli hydrataci betonu. Po uplynutí stanovené doby byla tělesa odformována a uložena ve vlhkém prostředí v souladu s normou [41]. Nezbytná tělesa byla před termínem zkoušení ztvrdlého betonu převezena do Ústavu stavebního zkušebnictví v Pardubicích.

Směsný recyklát byl od počátku vyráběn v Ústavu stavebního zkušebnictví v Pardubicích, kde následně proběhly zkoušky čerstvého a ztvrdlého betonu a výroba zkušebních těles.



Obrázek 28: Výroba čerstvého betonu

3 Provedené zkoušky

Základem experimentální části bylo porovnat tři receptury s různým složením betonu podle destruktivních a nedestruktivních zkoušek. U receptury směsného recyklátu se navíc kromě zkoušek čerstvého a ztvrdlého betonu prováděly zkoušky na kamenivo. Kde na základě výsledků a různých otestovaných frakcí byla zvolena frakce 8-16 mm, ke které byla přidána frakce 4-8 mm viz kapitola 1.3 receptura směsného recyklátu. Zkoušky byly prováděny v odborné akreditované laboratoři v Hořicích ve zkušebně kamene a kameniva pod odborným dohledem Jaroslavy Soukupové. Výsledný protokol nemůže být zveřejněn v přílohách kvůli veřejnému zpřístupnění bakalářské práce na internetu, protože je majetkem firmy ENVISTONE, která si dané zveřejnění nepřála.

Mezi zkoušky, které byly provedeny můžeme zařadit:

- Obsah jemných částic
- Tvarový index SI
- Podíl drcených zrn
- Odolnost proti drcení – součinitel LA
- Nasákavost
- Odolnost proti rozmrazování a zmrazování
- Obsah chloridových solí
- Obsah vodou rozpustných síranů SS
- Obsah celkové síry S
- Složky recyklovaného kameniva
 - Složka FL – (objem plovoucích částic)
 - Složka X – (nečistoty a jiné částice – kovy, pryž, plasty)
 - Složka Rc – (beton, betonové výrobky, malta)
 - Složka Ru – (nestmel. a hydraul. stmel. kam., přírod. kam.)
 - Složka Rb – (pálené, pórobetonové, vápenopískové zdící prvky)
 - Složka Ra – (asfaltové materiály)
 - Složka Rg – (sklo)
- Lehké znečišťující částice
- Objemová hmotnost
- Sypná hmotnost setřeseného a volně sypaného kameniva
- Mezerovitost setřesená

Všechny zkoušky byly provedeny dle příslušných norem. Výsledná frakce byla vybrána na základě odborné diskuze s *technickým zástupcem Tomášem Klausem z Chryso Chemie, s.r.o.* Frakce byla vybrána na základě nejmenšího podílu jemných částic, který se ukázal pro připravovanou přísadu jako nejvhodnější i z hlediska složení křivky zrnitosti.

3.1 Provedené zkoušky čerstvého betonu

Na čerstvém betonu byla provedena série několika zkoušek. Je důležité podotknout, že zkoušky pro každou recepturu byly realizovány v různé dny, jak je uvedeno v kapitole 2 (výroba zkušebních těles). Tento postup byl zvolen za účelem získání co nejpřesnějších a nejobjektivnějších údajů ze zkoušek a eliminace chyb způsobených nedostatkem zkušeností se zkouškami čerstvého betonu.

Na čerstvém betonu byly provedeny následující zkoušky:

- zkouška teploty čerstvého betonu, zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu,
- stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu,
- zkouška konzistence betonu sednutím kužele (Abrams),
- zkouška konzistence betonu rozlitím.

Všechny zkoušky byly realizovány v souladu s příslušnými ČSN EN normami. Zkoušky čerstvého betonu u receptury směsného recyklátu probíhaly v odborné akreditované laboratoři. U receptur PREFA PRODUKT a plastového recyklátu byly tyto zkoušky prováděny v sídle firmy PREFA PRODUKT.

Zkouška teploty čerstvého betonu je důležitá pro stanovení správného průběhu hydratačních reakcí a vývoje pevnosti betonu. Objemová hmotnost čerstvého betonu poskytuje informace o kvalitě směsi a dostatečném zhutnění. Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu je klíčové pro posouzení odolnosti betonu vůči působení mrazu a chemických roztoků. Zkoušky konzistence sednutím kužele a rozlitím slouží k hodnocení zpracovatelnosti a tekutosti čerstvého betonu.

Pečlivým dodržováním všech zkušebních postupů a norem bylo zajištěno získání spolehlivých a reprezentativních výsledků pro další vyhodnocení vlastností navržených receptur.



Obrázek 29: Zkoušky čerstvého betonu

3.2 Provedené zkoušky na ztvrdlém betonu

Na ztvrdlém betonu byla provedena rozsáhlejší série zkoušek. Všechny zkoušky byly realizovány po 28 dnech od zhotovení zkušebních těles. Byly provedeny následující zkoušky:

- zkouška objemové hmotnosti ztvrdlého betonu,
- zkouška pevnosti v tlaku betonu na krychlích o rozměrech 150 mm x 150 mm x 150 mm,
- zkouška pevnosti v tahu ohybem na trámčích o rozměrech 100 mm x 100 mm x 400 mm,
- zkouška stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek na válcích o rozměrech 150 mm x 300 mm,
- zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou na krychlích o hraně 150 mm.

Všechny zkoušky byly realizovány v souladu s příslušnými ČSN EN a ČSN ISO normami. Všechny zkoušky na všech recepturách probíhaly v odborné akreditované laboratoři v Pardubicích.

Zkouška objemové hmotnosti ztvrdlého betonu umožňuje zjistit skutečnou hustotu betonu, která je klíčovým parametrem pro posouzení jeho kvality a trvanlivosti. Pevnost v tlaku a pevnost v tahu ohybem patří mezi nejdůležitější mechanické vlastnosti betonu, neboť na jejich základě se stanovuje pevnostní třída betonu a dimenzují se betonové konstrukce.



Obrázek 30: Pevnostní zkoušky ztvrdlého betonu

Zkouška stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek simuluje reálné podmínky, jimž je beton vystaven v exteriéru během zimního období. Tato zkouška poskytuje důležité informace o trvanlivosti a odolnosti betonu v agresivním prostředí.

Zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou hodnotí propustnost betonu pro vodu a tím i jeho trvanlivost. Nízká propustnost pro vodu je klíčovým faktorem pro zajištění dlouhodobé životnosti betonových konstrukcí.

Realizace těchto zkoušek v akreditované laboratoři zajistila dodržení všech požadovaných norem a postupů, čímž byla zaručena objektivita a spolehlivost výsledků. Výsledky těchto zkoušek poskytly komplexní informace o vlastnostech navržených receptur ztvrdlého betonu, které jsou nezbytné pro posouzení vhodnosti jejich aplikace v praxi.



Obrázek 31: Zkoušky odolnosti ztvrdlého betonu

4 Postup měření a výsledky zkoušek na čerstvém betonu

Tato část se zaměřuje na popis postupu zkoušek čerstvého betonu. Textová část detailně vysvětluje jednotlivé kroky provádění zkoušek, zatímco přiložené obrázky slouží jako vizuální podpora pro názornou demonstraci důležitých aspektů. Propojením písemného návodu a grafických příloh dochází k ucelenému zpracování dané problematiky, která byla prováděna. Dále je uvedeno vzájemné porovnání zkoušek na čerstvém betonu všech receptur. Zkoušky uvedené v kapitole 3.1 (teplota, objemová hmotnost, obsah vzduchu, konzistence sednutím kužele a rozlitím) byly provedeny na každé receptuře.

Na čerstvém betonu byla nejprve změřena teplota pomocí přesného hrotového teploměru s certifikovanou kalibrací. Teplota betonu je důležitým parametrem, neboť ovlivňuje rychlost hydratačních procesů a vývoj pevností. Následně byla stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu v souladu s normou [42]. Zkušební postup spočíval v naplnění kalibrované nádoby o známém objemu čerstvým betonem a pečlivém zhutnění pomocí propichovací tyče. Nejprve byla zvážena prázdná nádoba a následně nádoba naplněná zhutněným čerstvým betonem. Z rozdílu hmotností a známého objemu nádoby byla vypočtena **objemová hmotnost** čerstvého betonu dle vztahu uvedeného na obrázku 32. Objemová hmotnost čerstvého betonu poskytuje informace o kvalitě směsi a správném dávkování všech složek. Hodnota objemové hmotnosti rovněž indikuje případné chyby při míchání nebo přítomnost nežádoucích dutin a pórů v čerstvém betonu. Přesné určení této charakteristiky je proto klíčové pro zajištění požadovaných vlastností ztvrdlého betonu, především jeho pevnosti a trvanlivosti.

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

kde je

D objemová hmotnost čerstvého betonu, v kg/m^3 ;

m_1 hmotnost prázdné nádoby, v kg;

m_2 hmotnost naplněné nádoby se zhutněným betonem, v kg;

V objem nádoby, v m^3 .

Objemová hmotnost čerstvého betonu se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m^3 .

Obrázek 32: Výpočet objemové hmotnosti čerstvého betonu [42]

Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu bylo realizováno pomocí tlakoměrné metody dle požadavků normy [43]. Postup zkoušky započal navlhčením zkušební nádoby. Následně byl čerstvý beton plněn do nádoby ve třech vrstvách, přičemž každá vrstva byla řádně zhutněna na vibračním stolku. Po zhutnění poslední vrstvy byl povrch betonu v nádobě zarovnan ocelovým hladítkem. Poté byly pečlivě očištěny příruba i víko nádoby, které bylo na

nádoby neprodyšně upevněno pomocí svorek. Hlavní ventil pro přívod vzduchu byl uzavřen, zatímco ventily A a B byly otevřeny. Do přístroje byla vstříkována voda pomocí pryžové stříkačky, a to buď ventilem A, nebo B, dokud voda nezačala vytékat druhým ventilem. Lehkým poklepáním na přístroj byly odstraněny případné vzduchové bubliny.

Ventil na vypouštění vzduchu ze vzduchové komory byl uzavřen a do komory byl načerpán vzduch, dokud ručička tlakoměru nedosáhla počáteční hodnoty tlaku. Stlačený vzduch byl ponechán na několik sekund, aby se jeho teplota vyrovnala s okolní teplotou. Následně byla ručička tlakoměru nastavena na počáteční hodnotu tlaku vypouštěním nebo dopouštěním vzduchu za současného lehkého poklepávání na tlakoměr. Ventily A a B byly uzavřeny a hlavní ventil vzduchu otevřen. Poté byly stěny nádoby s betonem ostře poklepány gumovým kladívkem. Při lehkém poklepávání na tlakoměr byla odečtena hodnota tlaku odpovídající objemu obsaženého vzduchu A_1 v procentech zaokrouhlená na nejbližších 0,1 % (viz. Obr. 33). Před sejmutím víka nádoby byly otevřeny ventily A a B pro uvolnění tlaku.

$$A_c = A_1 - G$$

kde je

A_1 obsah vzduchu ve zkoušeném vzorku betonu;

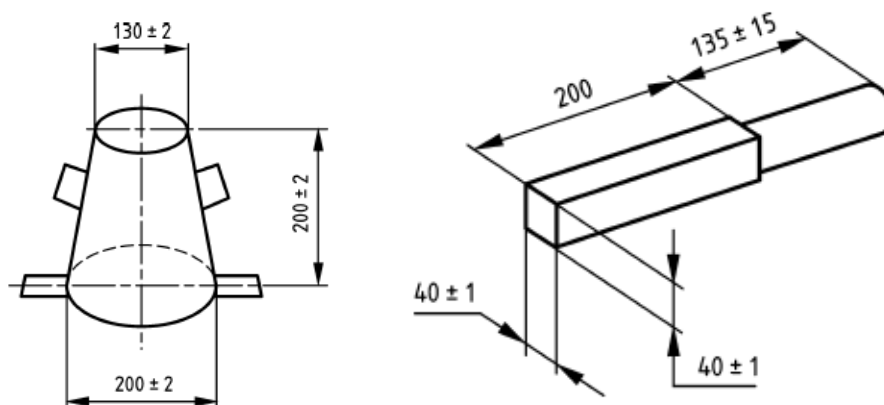
G opravný součinitel pro kamenivo. $G = 0$ pokud není změřen nebo uveden v NA.

Obsah vzduchu se vyjádří v procentech, zaokrouhlený na nejbližší 0,1 %.

Obrázek 33: Výpočet obsahu vzduchu v betonu [43]

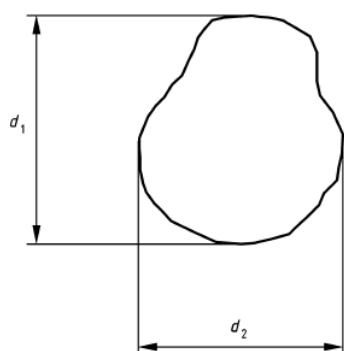
Stanovení konzistence čerstvého betonu **metodou rozliti** proběhlo v souladu s požadavky příslušné normy [44]. Nejprve byl střešací stolek umístěn na rovný a vodorovný povrch neohrožený vnějšími vibracemi či otřesy. Byla zkontrolována možnost zvednout horní závěsnou desku do správné výšky a její následný volný pád na spodní podložku. Před samotnou zkouškou byl povrch stolku řádně očištěn a zkušební kužel navlhčen vlhkým hadříkem bez přebytečné vody. Kužel byl poté ustaven ve středu horní desky a přišlápnut.

Dutý kužel (viz. Obr. 34) byl rovnoměrně zaplněn čerstvým betonem ve dvou stejných vrstvách za použití lopatky. Každá vrstva byla lehce zhutněna dusadlem (viz. Obr. 34). Povrch betonu v kuželu byl zarovnán dusadlem a okolí horní desky očištěno od nadbytečného betonu. Po uplynutí časového intervalu minimálně 10 sekund a maximálně 30 sekund od zarovnání povrchu betonu byla forma kuželu opatrně zvednuta svisle nahoru v průběhu 1 až 3 sekund.



Obrázek 34: Dutý kužel a dusadlo [44]

Do 10 sekund od odstranění kuželu byl střešací stolek stabilizován postavením na přední nohy. Během následujících 1 až 3 sekund byla horní deska pomalu zvednuta až ke koncové zarážce, přičemž bylo dbáno na to, aby nedošlo k prudkému nárazu desky. Závěsná deska byla poté okamžitě uvolněna k volnému dopadu na spodní podložku. Tento cyklus byl 15krát opakován v rozmezí 1 až 3 sekund na jeden cyklus. Nakonec byly změřeny dva na sebe kolmé rozměry rozlitého betonu d_1 a d_2 (viz. Obr. 35) rovnoběžně s hranami stolku s přesností na nejbližších 10 mm. Hodnota rozlití f je dána vzorcem (viz. Obr. 35).



$$f = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

kde je

d_1 maximální rozměr rozlitého betonu, rovnoběžně s jednou stranou stolu;

d_2 maximální rozměr rozlitého betonu, rovnoběžně s druhou stranou stolu.

Výsledek se uvádí zaokrouhlen na nejbližších 10 mm.

Obrázek 35: Zkouška rozlitím [44]

V souladu s požadavky příslušné normy [45] proběhlo **stanovení konzistence** čerstvého betonu **metodou sednutí kužele**. Podkladní deska i zkušební forma kužele byly navlhčeny, přičemž přebytečná vlhkost byla odstraněna vlhkým hadříkem. Forma kužele byla poté usazena na vodorovnou podkladní desku a zajištěna proti pohybu přišlápnutím dvou přídržných přílozek. Plnění kužele probíhalo ve třech vrstvách přibližně po jedné třetině jeho výšky. Každá vrstva byla zhutněna 25 rovnoměrně rozmístěnými vpichy propichovací tyčí. Zhutnění vrchní vrstvy bylo provedeno s mírným přebytkem betonu nad horním okrajem formy. Následně byl přebytečný beton odstraněn příčným pohybem propichovací tyče za současného otáčení.

Po očištění podkladní desky od zbytků betonu byla forma kužele rovnoměrně a plynule zvednuta svisle nahoru během 2 až 5 sekund bez jakéhokoliv otáčivého pohybu, který by mohl ovlivnit sednutí betonu. Celý postup od počátku plnění formy až po její zvednutí proběhl plynule bez přerušování a byl dokončen do 150 sekund.

Bezprostředně po zvednutí formy byla změřena a zaznamenána hodnota sednutí h jako rozdíl mezi výškou kužele a nejvyšším bodem sednutého vzorku (viz. Obr. 36). Výsledek zkoušky je platný pouze v případě symetrického sednutí betonu (viz. Obr. 36a). Při zborcení vzorku (viz. Obr. 36b) se zkouška opakuje s novou navážkou. Nedojde-li k sednutí, ale usmýknutí betonu, svědčí to o jeho nedostatečné plasticitě a soudržnosti nevhodné pro tuto zkoušku. Hodnota sednutí se zaokrouhluje na nejbližších 10 mm.



Obrázek 36: Zkouška sednutím [45]

4.1 Výsledky zkoušek na čerstvém betonu

V následujících kapitolách budou prezentována a analyzována data ze zkoušek provedených na čerstvém betonu jednotlivých navržených receptur. Tyto výsledky budou přehledně shrnuty v tabulkách a grafech pro lepší vizualizaci a porozumění naměřených dat. Výsledky pro každou recepturu budou uvedeny zvlášť, po čemž bude přistoupeno k jejich vzájemnému porovnání napříč všemi testovanými recepturami. Cílem této části je poskytnout ucelený pohled na chování čerstvých betonových receptur při prováděných zkouškách a umožnit objektivní zhodnocení jejich vlastností s ohledem na požadavky kladené na výsledný beton.

4.1.1 Receptura PREFA PRODUKT

Na základě analýzy výsledků zkoušek na čerstvém betonu receptury PREFA PRODUKT lze konstatovat, že naměřené hodnoty nevykazují významné odchylky od očekávaných hodnot a splňují požadavky příslušných norem pro daný typ betonu.

RECEPTURA	PREFA PRODUKT
teplota místnosti (°C)	19,0
teplota čerstvého betonu (°C)	18,1
obsah vzduchu (%)	4,2
objemová hmotnost (kg/m ³)	2270
sednutí (mm)	125,0
rozlití (mm)	500
klasifikace konzistence sednutí kužele	S3
klasifikace konzistence rozlitím	F4

Tabulka 10: Výsledky zkoušek čerstvého betonu receptury PREFA PRODUKT

4.1.2 Receptura plastového recyklátu

Výsledky zkoušek na čerstvém betonu receptury PREFA PRODUKT (viz tabulka 10) i plastového recyklátu (viz tabulka 11) splňují normativní požadavky. Receptura plastového recyklátu vykázala výrazně nižší sednutí kužele, tedy tuhou konzistenci, oproti předchozí receptuře.

RECEPTURA	PLASTOVÉHO RECYKLÁTU
teplota místnosti (°C)	20,8
teplota čerstvého betonu (°C)	20,3
obsah vzduchu (%)	4,6
objemová hmotnost (kg/m ³)	2230
sednutí (mm)	30,0
rozlití (mm)	400
klasifikace konzistence sednutí kužele	S1
klasifikace konzistence rozlitím	F2

Tabulka 11: Výsledky zkoušek čerstvého betonu receptury plastového recyklátu

4.1.3 Receptura směsného recyklátu

Výsledky zkoušek na čerstvém betonu receptury směsného recyklátu jsou zobrazeny v tabulce 12. Přestože směsný recyklát obsahoval velké množství recyklovaných materiálů, nevykazoval pochybnosti z hlediska norem pro čerstvý beton.

RECEPTURA	SMĚSNÉHO RECYKLÁTU
teplota místnosti (°C)	21,0
teplota čerstvého betonu (°C)	22,0
obsah vzduchu (%)	3,9
objemová hmotnost (kg/m ³)	2110
sednutí (mm)	160,0
rozlití (mm)	460
klasifikace konzistence sednutí kužele	S4
klasifikace konzistence rozlitím	F3

Tabulka 12: Výsledky zkoušek čerstvého betonu receptury směsného recyklátu

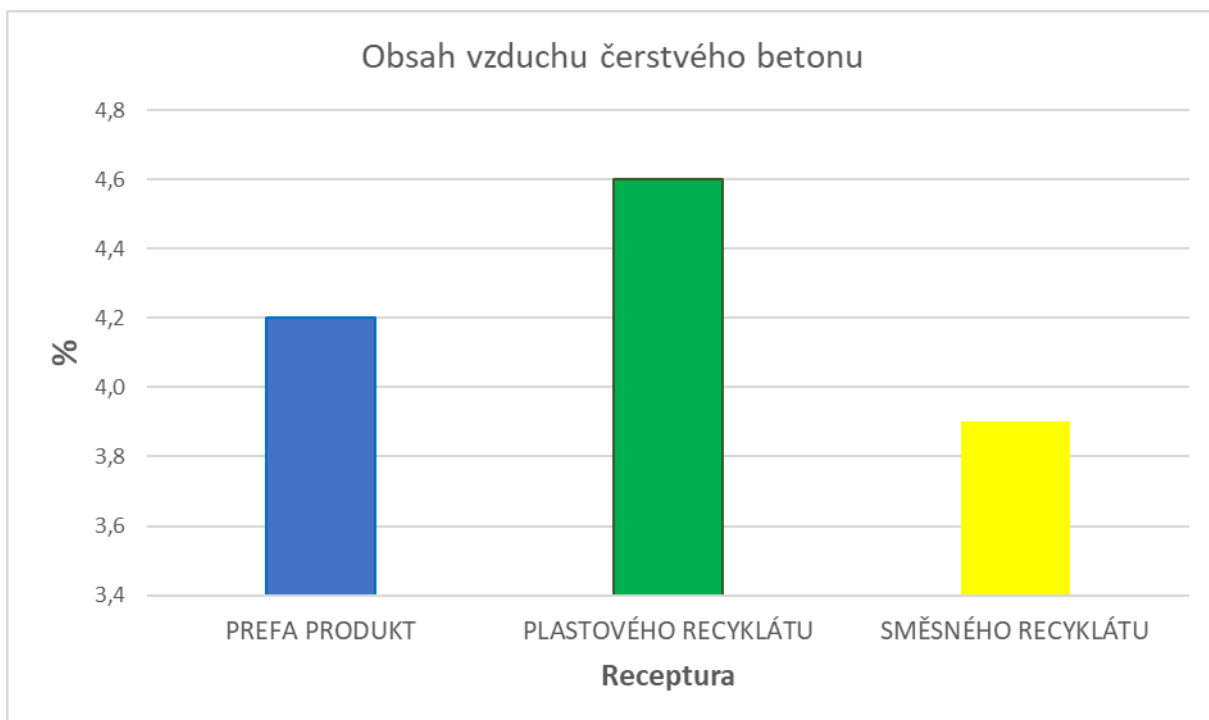
4.2 Souhrnné výsledky zkoušek na čerstvém betonu

Po analýze výsledků zkoušek na čerstvém betonu nebyly zjištěny žádné zásadní odchylky či nesrovnalosti. Průběh všech zkoušek odpovídal předpokládanému chování receptur a jejich výsledky byly v souladu s obecnými zákonitostmi a poznatky z oblasti technologie čerstvého betonu. Získané výsledky neindikují žádnou závažnou chybu při přípravě či výrobě testovaných receptur. Zaznamenané tendence a trendy ve vlastnostech čerstvého betonu jsou konzistentní s dosavadními vědeckými poznatky.

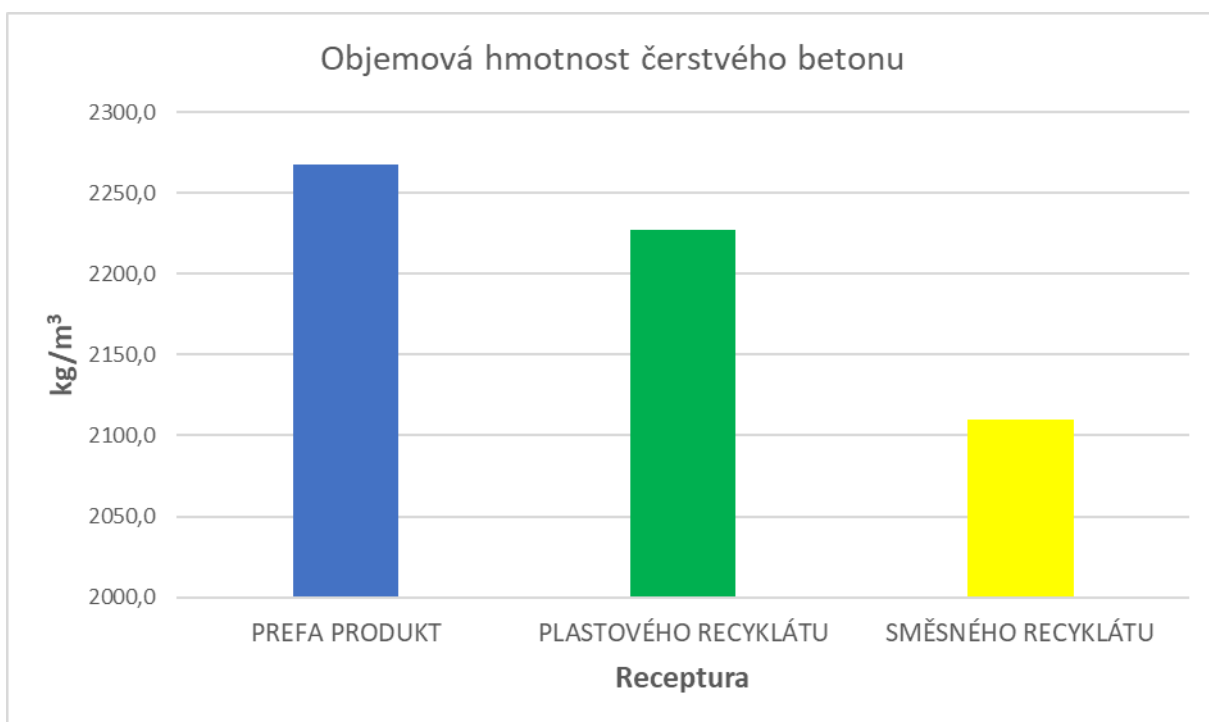
SOUHRNNÉ VÝSLEDKY ZKOUŠEK NA ČERSTVÉM BETONU			
RECEPTURA	PREFA PRODUKT	PLASTOVÉHO RECYKLÁTU	SMĚSNÉHO RECYKLÁTU
teplota místnosti (°C)	19,0	20,8	21,0
teplota čerstvého betonu (°C)	18,1	20,3	22,0
obsah vzduchu (%)	4,2	4,6	3,9
objemová hmotnost (kg/m ³)	2270	2230	2110
sednutí (mm)	125,0	30,0	160,0
rozlití (mm)	500	400	460
klasifikace konzistence sednutí kužele	S3	S1	S4
klasifikace konzistence rozlitím	F4	F2	F3

Tabulka 13: Shrnutí výsledků zkoušek na čerstvém betonu (různé složení receptur)

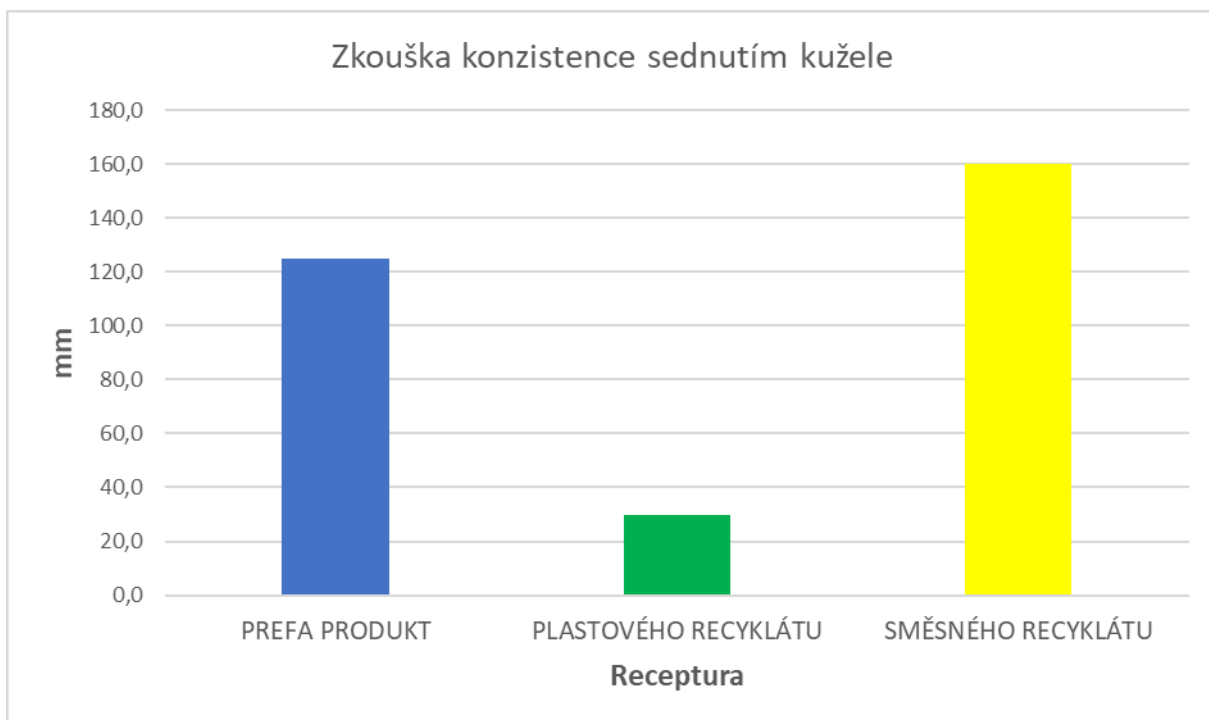
Souhrnné výsledky zkoušek na čerstvém betonu tří receptur (směsný recyklát, plastový recyklát a receptura PREFA produkt) splňují normativní požadavky. Receptura plastového recyklátu vykazovala výrazně nižší sednutí kužele, tedy tuhou konzistenci, oproti předchozím recepturám. Výsledky zkoušek jsou pro větší přehlednost znázorněny graficky na grafech 12, 13, 14 a 15.



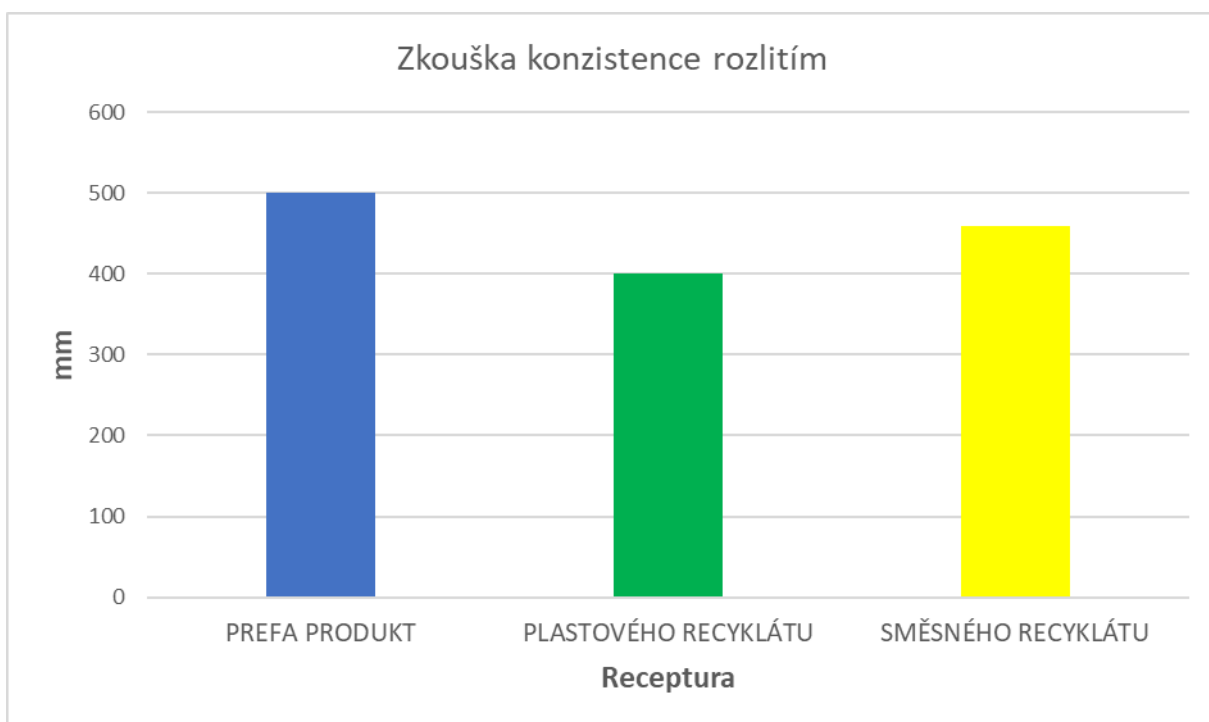
Graf 12: Obsah vzduchu čerstvého betonu



Graf 13: Objemová hmotnost čerstvého betonu



Graf 14: Zkouška konzistence sednutím kužele



Graf 15: Zkouška konzistence rozlitím

5 Postup měření a výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu

V této části je popsán postup zkoušek prováděných na ztvrdlém betonu. Textová část detailně vysvětluje jednotlivé kroky těchto zkoušek, přičemž přiložené obrázky poslouží jako vizuální podpora pro názornou demonstraci důležitých aspektů. Propojením písemného návodu a grafických příloh dojde k ucelenému zpracování dané problematiky, která byla zkoušena. Dále bude uvedeno vzájemné porovnání zkoušek na ztvrdlém betonu pro všechny receptury. Zkoušky uvedené v kapitole 3.2 (objemová hmotnost, zkouška pevnosti v tlaku, zkouška pevnosti v tahu ohybem, zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou a zkouška CHRL) byly provedeny na každé receptuře po uplynutí 28 dnů od zkoušek na čerstvém betonu. Zkušební tělesa byla do provedení zkoušek uložena ve vlhkém prostředí. Tělesa byla označena dle příslušné receptury a typu tělesa, viz tabulky v následujících kapitolách.

V souladu s příslušnými normativními požadavky dle [46] byla na vzorcích ztvrdlého betonu primárně stanovována **objemová hmotnost**. Tato charakteristika byla určována výpočetní metodou na základě reálně naměřených hodnot hmotnosti a objemu zkušebních těles. Objemová hmotnost byla vypočítávána dle následujícího vzorce, do kterého byly dosazovány zjištěné údaje o hmotnosti a objemu každého jednotlivého zkušebního tělesa:

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

kde je

- D Objemová hmotnost zkušebního tělesa pro příslušné podmínky a způsobu stanovení objemu, $V \text{ kg/m}^3$
- m hmotnost zkušebního tělesa v podmínkách v době zkoušení stanovená v kg
- V objem stanovený příslušným způsobem, v m^3 |

Výsledek objemové hmotnosti se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m^3 .

Obrázek 37: Výpočet objemové hmotnosti ztvrdlého betonu [46]

Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena v souladu s příslušnou normou [47]. Nejprve byla provedena kontrola umístění zkušebních těles do lisu, přičemž bylo dbáno na to, aby byly vkládány plochami od otisku formy. Následně byly očištěny dotykové plochy tlačných desek lisu a odstraněny veškeré zbytky uvolněného materiálu z povrchu zkušebních těles, které by přicházely do kontaktu s tlačnými deskami. Krychle byly umístěny tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu. Umístění těles bylo provedeno se stanovenou přesností 1 % jejich jmenovitého rozměru. K zatěžování byl využit ručně řízený zkušební lis, přičemž rychlost zatěžování zkušebních vzorků byla nastavena na základě zkušeností odborných pracovníků v akreditované laboratoři. V závěrečné fázi zatěžování bylo

zaznamenáno dosažené maximální zatížení v kN a pevnost v tlaku byla následně určena na základě stanoveného vzorce (viz. Obr. 38).

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

kde je

f_c pevnost v tlaku, v MPa (N/mm²);

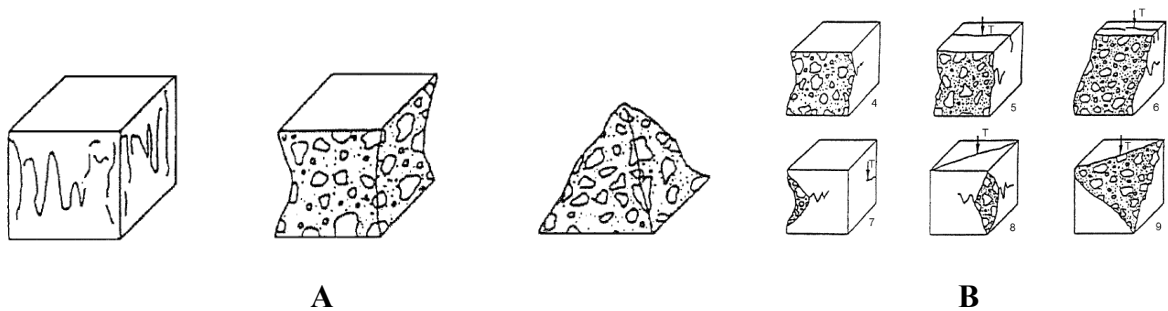
F maximální zatížení při porušení, v N;

A_c průřezová plocha zkušební tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku, vypočtená z jmenovité velikosti tělesa (viz EN 12390-1) nebo ze změřených rozměrů tělesa podle přílohy B, v mm².

Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa (N/mm²).

Obrázek 38: Výpočet pevnosti v tlaku [47]

V posledním kroku byl posuzován způsob porušení zkušebních těles, který byl vyhodnocován v souladu s normativními požadavky na základě přiloženého obr. 39. Během zkoušky nebyl u žádné z testovaných receptur zaznamenán nevyhovující způsob porušení.

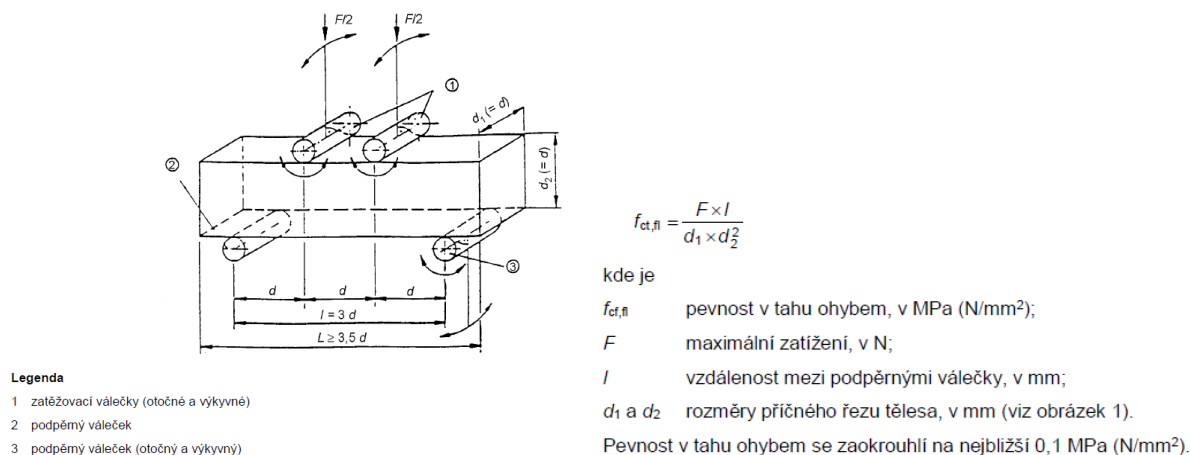


Obrázek 39: Vyhovující porušení (A), nevyhovující porušení (B) [47]

Zkouška pevnosti v tahu ohybem byla provedena v souladu s požadavky příslušné normy [48]. Podstata zkoušky spočívala v tom, že hranolová zkušební tělesa byla vystavena ohybovému momentu od zatížení přenášeného prostřednictvím horních zatěžovacích a spodních podpěrných válečků. Největší dosažené zatížení bylo zaznamenáno a na jeho základě byla vypočtena pevnost v tahu ohybem dle stanoveného vzorce (viz. Obr. 40). Zkouška probíhala ve zkušebním lisu (viz. Obr. 40), který se skládal ze dvou podpěrných válečků a dvou horních zatěžovacích válečků, které zatěžovaly zkušební těleso, jednalo se o čtyřbodový ohyb. Zatěžovací válečky byly kloubově připojeny k příčnému závěsu, který rovnoměrně rozděloval zatížení z lisu mezi oba válečky.

Stejně jako u předchozí zkoušky pevnosti v tlaku bylo nejprve zajištěno, aby referenční směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu zkušební tělesa. Zkušební těleso bylo do lisu umístěno centricky, s podélnou osou kolmou k podélným osám horních a dolních válečků. Před vložením tělesa do lisu však musely být otřeny všechny dotykové plochy lisu a odstraněn uvolněný materiál z povrchu zkušební tělesa, který by přicházel do styku

s válečky. Pro zatěžování byl opět využit ručně ovládaný zkušební lis, přičemž rychlost zatěžování byla nastavena odborným pracovníkem akreditované laboratoře na základě jeho zkušeností, aby nedošlo k pochybení.



Obrázek 40: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu [48]

V souladu s požadavky příslušné normy [49] byla provedena **zkouška stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou**. Prvním krokem bylo zbroušení plochy zkušební tělesa, která měla být vystavena působení vodního tlaku, a to za pomoci ocelového kartáče. Dále bylo upnuto zkušební těleso do zařízení, kde na něj po dobu 72 hodin působil vodní tlak (500 ± 50) kPa. Během tří denního trvání zkoušky byl pozorován stav povrchu krychle, respektive jejich hran, které nebyly vystaveny vodnímu tlaku, zda nedochází k průsaku. Během zkoušení nebyl zaznamenán žádný průsak na těchto hranách, které nebyly vystaveny vodnímu tlaku. Po uplynutí předepsané doby působení vodního tlaku byla zkušební tělesa vyjmuta ze zařízení. Následně byla tělesa rozlomena v polovině, kolmo k povrchu, na který působil vodní tlak, a to za pomoci zkušební lisu na tlak. Po rozlomení byla zaznamenána a změřena největší hloubka průsaku od zkoušené plochy na nejbližší milimetr. Měření probíhalo s využitím posuvného měřítka. Fotografická dokumentace a výsledky zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou jsou uvedeny v kapitolách (5.1.1, 5.1.2, 5.1.3).

V souladu s požadavky příslušné normy [50] byla provedena **zkouška stanovení odolnosti povrchu cementového tmele proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (metodou C)**. Jako zkušební tělesa byla použita válcová tělesa o průměru 150 mm, ze kterých byl pro účely zkoušky odebrán horní odřez o výšce 50 mm. Pro zkoušku bylo využito zařízení s automatickým programovatelným cyklováním umožňujícím provádění cyklického zmrazování a rozmrazování podle normy [50].

Zkušební těleso je opatřováno vodotěsnou objímkou. Pro tento účel je využíván vyříznutý pruh z automobilové vzdušnice pneumatiky o rozměru 6,50-20. Horní část zkušební tělesa je ošetřována minimálně dvěma nátěry kaučukového lepidla před nasazením objímky. Na vnitřní stranu gumové objímky je aplikován jeden nátěr téhož lepidla. Bezprostředně po dokončení posledního nátěru na zkušebním tělese je na něj navlékána gumová objímka s již zaschlým lepidlem. Objímka je umísťována tak, aby převyšovala povrch vzorku o přibližně 10 milimetrů. K boku zkušební tělesa je objímka přitahována montážní páskou, která je umísťována co nejbližší hornímu povrchu. Pro zajištění těsného spoje je objímka postupně zaklepávána mírnými údery gumové paličky po celém obvodu, přičemž je současně utahována montážní páska.

U vývrtu je dbáno na to, aby nedošlo k porušení hrany při jeho vyjímání z konstrukce kleštěmi. Toto místo je po opatření zkušební tělesa objímkou zaléváno epoxidovou pryskyřicí. Následně je na zkušební těleso nalévána voda, která je ponechávána nejméně dva dny před zahájením zkoušky odolnosti. Tato doba slouží k prověření vodotěsnosti objímky. Poté je voda ze zkušební tělesa slévána a její zbytky jsou odstraňovány stlačeným vzduchem. Zkušební těleso je vkládáno do klimatizační komory, kde je na něj naléván 3% roztok NaCl. Teplota cirkulujícího vzduchu je pak cyklicky měněna.

Po každých 25 cyklech došlo k automatickému přerušení a vzorky byly z cyklovače vyjmuty. Poté byly vzorky vyjmuty z misek a proudem vody ze stříčky byly splaveny uvolněné částice ze zkušební plochy do misky. Následně byla přebytečná kapalina z misky odlita, aby nedošlo k odplavení usazených odpadlých částic ze vzorku. Poté byly proudem vody ze stříčky přepraveny odpadlé částice do vysoušecí misky. Z té bylo následně slito přebytečné množství kapaliny a odpadlé částice byly vysušeny do konstantní hmotnosti při teplotě 105 °C. Nakonec byla hmotnost odpadu zvážena s přesností na 0,1 g. Odpady z jednotlivých cyklů byly uschovány, neboť odolnost povrchu cementového betonu proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám je dána hmotností odpadu na jednotku plochy ρ v $g \cdot m^{-2}$, která se určí ze vzorce:

$$\rho_a = \frac{\sum m}{A}$$

kde $\sum m$ je součet všech hmotností odpadů od prvního do n-tého cyklu v g,

A velikost zkušební plochy v m^2 , rozměry se stanoví s přesností měření 1 %.

Obrázek 41: Zkouška odolnosti CHRL [50]

Zkouška byla ukončena po stanovených 75 cyklech. Výsledky zkoušek byli zapsány pomocí čísla, které je rozděleno pomlčkou. První číslo představuje hodnotu odpadu a druhé číslo za pomlčkou udává počet cyklů. Fotografická dokumentace a výsledky zkoušek jsou uvedeny v kapitolách (5.1.1, 5.1.2, 5.1.3).

5.1 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu

V následujících kapitolách jsou prezentovány výsledky provedených zkoušek na zkušebních tělesech, jejichž cílem bylo stanovení pevnosti betonu v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu, průsaku tlakovou vodou a odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL). Jednotlivé receptury a realizované zkoušky jsou porovnány v kapitole 5.2. Pro zajištění přehlednosti jsou výsledné hodnoty uváděny v tabulkách a grafech.

5.1.1 Receptura PREFA PRODUKT

Mechanické a trvanlivostní vlastnosti betonů hodnocených receptur byly ověřeny sadou normalizovaných zkoušek. Jednalo se o zkoušku pevnosti v tlaku, zkoušku pevnosti v tahu za ohybu, zkoušku hloubky průsaku tlakovou vodou a zkoušku CHRL. Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v příslušných tabulkách.

Tělesa receptury	PREFAPRODUKT							
číslo vzorku	hmotnost [kg]	výška [mm]	šířka [mm]	délka [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	maximální zatížení [kN]	pevnost v tlaku jednotlivě [MPa]	pevnost v tlaku průměrná [MPa]
S/1	7,702	149,30	149,32	150,20	2300	1225	54,4	59,3
S/2	7,597	149,45	149,60	148,55	2290	1425	63,3	
S/3	7,652	150,18	150,23	150,95	2250	1350	60,0	

Tabulka 14: Zkouška pevnosti v tlaku receptury PREFA PRODUKT

Tělesa receptury	PREFAPRODUKT							
číslo vzorku	hmotnost [kg]	výška [mm]	šířka [mm]	délka [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	maximální zatížení [N]	pevnost v tahu ohybem [MPa]	pevnost v tahu za ohybu průměrná [MPa]
S/4	8,801	97,52	99,92	400,37	2260	15210	4,8	4,4
S/5	9,183	102,56	101,88	400,50	2190	15250	4,3	
S/6	9,243	102,29	102,26	400,10	2210	14830	4,2	

Tabulka 15: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu receptury PREFA PRODUKT

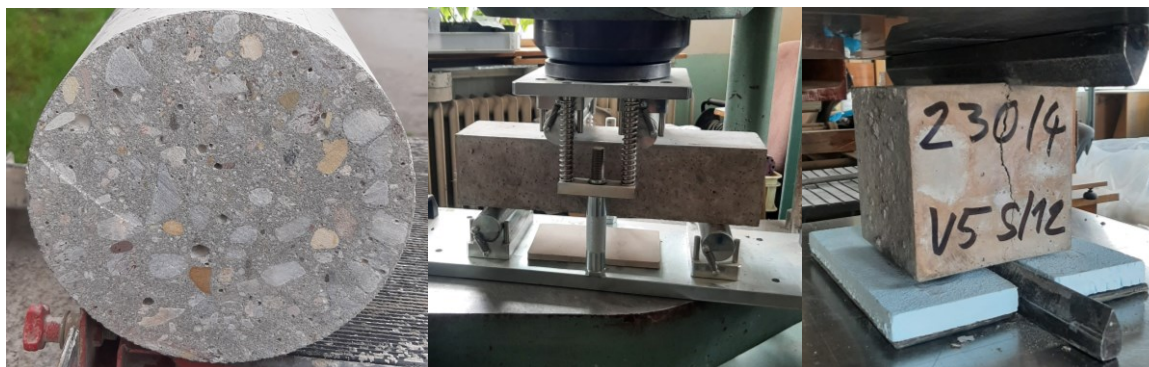
Tělesa receptury	PREFAPRODUKT							
číslo vzorku	hmotnost [kg]	výška [mm]	šířka [mm]	délka [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	prosakování do boku tělesa	hloubka průsaku [mm]	hloubka průsaku průměrná [mm]
S/10	7,677	150,41	150,26	151,88	2240	NE	21	18
S/11	7,550	149,59	149,54	147,60	2290	NE	18	
S/12	7,699	150,18	150,25	151,42	2250	NE	15	

Tabulka 16: Zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou receptury PREFA PRODUKT

Tělesa receptury	PREFAPRODUKT						
číslo vzorku	hmotnost [kg]	průměr	výška	objemová hmotnost [kg/m ³]	počet cyklů	odpad [g/m ²]	odpad v [g/m ²] po cyklech průměrný
S/7	1,9191	149,32	50,32	2180	75	940	2077
S/8	2,0217	149,48	52,05	2210	75	2760	
S/9	1,9499	149,57	50,60	2190	75	2530	

Tabulka 17: Zkouška CHRL receptury PREFA PRODUKT

Na obrázku 42 můžeme vidět řez tělesem, který byl pořízen při odebrání vzorku na zkoušku CHRL. Dále zde můžeme vidět zkoušku pevnosti v tahu za ohybu a rozlomení tělesa na změření hloubky průsaku tlakovou vodou.



Obrázek 42: Receptura PREFA PRODUKT

5.1.2 Receptura plastového recyklátu

Mechanické a trvanlivostní vlastnosti betonů hodnocených receptur byly ověřeny sadou normalizovaných zkoušek. Jednalo se o zkoušku pevnosti v tlaku, zkoušku pevnosti v tahu za ohybu, zkoušku hloubky průsaku tlakovou vodou a zkoušku CHRL. Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v příslušných tabulkách. Receptura plastového recyklátu vykázala lepší hodnoty než standardní směs PREFA PRODUKT u zkoušek pevnosti v tlaku a zkoušky hloubky

průsaku tlakovou vodou. U zkoušky CHRL byla receptura plastového recyklátu shledána jako neplatná, neboť množství uvolněného odpadu přesáhlo limitní hodnotu 1000 g/m².

Tělesa receptury	PLASTOVÝ RECYKLÁT							
číslo vzorku	hmotnost [kg]	výška [mm]	šířka [mm]	délka [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	maximální zatížení [kN]	pevnost v tlaku jednotlivě [MPa]	pevnost v tlaku průměrná [MPa]
P/1	7,784	150,42	150,30	149,76	2300	1625	72,2	65,0
P/2	7,645	149,63	149,72	149,14	2290	1340	59,6	
P/3	7,535	149,43	149,51	147,71	2280	1425	63,3	

Tabulka 18: Zkouška pevnosti v tlaku receptury plastového recyklátu

Tělesa receptury	PLASTOVÝ RECYKLÁT							
číslo vzorku	hmotnost [kg]	výška [mm]	šířka [mm]	délka [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	maximální zatížení [N]	pevnost v tahu ohybem [MPa]	pevnost v tahu za ohybu průměrná [MPa]
P/4	9,110	100,13	99,51	400,83	2280	13450	4,0	4,0
P/5	8,871	98,20	99,18	400,25	2280	12740	4,0	
P/6	9,290	100,81	100,56	400,57	2290	13200	3,9	

Tabulka 19: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu receptury plastového recyklátu

Tělesa receptury	PLASTOVÝ RECYKLÁT							
číslo vzorku	hmotnost [kg]	výška [mm]	šířka [mm]	délka [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	prosakování do boku tělesa	hloubka průsaku [mm]	hloubka průsaku průměrná [mm]
P/10	7,564	150,32	150,40	146,58	2280	NE	9	10
P/11	7,690	149,63	149,55	150,31	2290	NE	14	
P/12	7,606	150,12	150,19	147,09	2290	NE	7	

Tabulka 20: Zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou receptury plastového recyklátu

Tělesa receptury	PLASTOVÝ RECYKLÁT						
číslo vzorku	hmotnost [kg]	průměr	výška	objemová hmotnost [kg/m ³]	počet cyklů	odpad [g/m ²]	odpad v [g/m ²] po cyklech průměrný
P/7	2,0205	149,34	52,61	2190	75	4870	4843
P/8	1,9672	149,45	50,35	2230	75	5650	
P/9	1,9111	149,59	50,42	2160	75	4010	

Tabulka 21: Zkouška CHRL receptury plastového recyklátu

Na obrázku 43 lze pozorovat zkušební těleso po provedení zkoušky pevnosti v tlaku, které vykazuje přijatelné míry poškození. Dále je zde zřetelný průsak vody, jenž byl způsoben realizací zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou.



Obrázek 43: Receptura plastového recyklátu

5.1.3 Receptura směsného recyklátu

Mechanické a trvanlivostní vlastnosti betonů hodnocených receptur byly ověřeny sadou normalizovaných zkoušek. Jednalo se o zkoušku pevnosti v tlaku, zkoušku pevnosti v tahu za ohybu, zkoušku hloubky průsaku tlakovou vodou a zkoušku CHRL. Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v příslušných tabulkách. Dle normy [51] a tabulky F.1.1 obsažené v této normě byla receptura směsného recyklátu navržena s cílem zjištění základních vlastností a vytvoření nové unikátní směsi. Při návrhu této směsi byly uvažovány pouze vstupní data, aby následně mohla být receptura upravována pro specifické aplikační prostředí. U zkoušky CHRL byla receptura směsného recyklátu shledána jako neplatná, neboť množství uvolněného odpadu přesáhlo limitní hodnotu 1000 g/m².

Tělesa receptury	SMĚSNÝ RECYKLÁT							
číslo vzorku	hmotnost [kg]	výška [mm]	šířka [mm]	délka [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	maximální zatížení [kN]	pevnost v tlaku jednotlivě [MPa]	pevnost v tlaku průměrná [MPa]
R/1	7,239	149,99	150,21	152,01	2110	720	32,0	30,1
R/2	7,349	150,68	150,48	153,49	2110	680	30,2	
R/3	7,354	150,55	150,45	153,88	2110	635	28,2	

Tabulka 22: Zkouška pevnosti v tlaku receptury směsného recyklátu

Tělesa receptury	SMĚSNÝ RECYKLÁT							
číslo vzorku	hmotnost [kg]	výška [mm]	šířka [mm]	délka [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	maximální zatížení [N]	pevnost v tahu ohybem [MPa]	pevnost v tahu za ohybu průměrná [MPa]
R/4	8,636	100,75	101,96	400,22	2100	12800	3,7	3,8
R/5	8,573	100,59	101,26	400,56	2100	12490	3,7	
R/6	8,634	101,02	101,84	400,56	2100	13560	3,9	

Tabulka 23: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu receptury směsného recyklátu

Tělesa receptury	SMĚSNÝ RECYKLÁT							
číslo vzorku	hmotnost [kg]	výška [mm]	šířka [mm]	délka [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	prosakování do boku tělesa	hloubka průsaku [mm]	hloubka průsaku průměrná [mm]
R/7	7,112	150,15	149,97	149,95	2110	NE	27	20
R/8	7,160	150,00	150,09	150,77	2110	NE	24	
R/9	7,293	150,52	150,33	151,98	2120	NE	10	

Tabulka 24: Zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou receptury směsného recyklátu

Tělesa receptury	SMĚSNÝ RECYKLÁT						
číslo vzorku	hmotnost [kg]	průměr	výška	objemová hmotnost [kg/m ³]	počet cyklů	odpad [g/m ²]	odpad v [g/m ²] po cyklech průměrný
R/10	1,8862	149,33	52,79	2040	75	12690	15027
R/11	1,8576	150,12	51,51	2040	75	16260	
R/12	1,8436	149,45	51,63	2040	75	16130	

Tabulka 25: Zkouška CHRL receptury směsného recyklátu

Na obrázku 44 lze pozorovat zkušební těleso po realizaci zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou, při které bylo provedeno následné měření hloubky průsaku. Rovněž je zde zdokumentován řez tělesa, který byl pořízen po provedení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu.



Obrázek 44: Receptura směsného recyklátu

5.2 Souhrnné výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu

Na základě detailní analýzy výsledků zkoušek provedených na ztvrdlém betonu lze konstatovat, že naměřená data nevykazovala žádné signifikantní odchylky či nesrovnalosti. Průběh všech zkoušek korespondoval s očekávaným chováním receptur. Získané výsledky nezaznamenaly žádnou významnou chybu při přípravě či výrobě testovaných receptur v rámci tohoto experimentu. Tendence a trendy ve vlastnostech ztvrdlého betonu byly konzistentní s dosavadními poznatky. **Receptury však budou muset být upraveny pro splnění požadavků zkoušky CHRL**, čemuž se bude věnovat navazující diplomová práce. Souhrnné výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu jsou znázorněny v tabulkách 26, 27, 28 a 29.

SOUHRNNÉ VÝSLEDKY ZKOUŠEK (PEVNOST V TLAKU)								
číslo vzorku	hmotnost [kg]	výška [mm]	šířka [mm]	délka [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	maximální zatížení [kN]	pevnost v tlaku jednotlivě [MPa]	pevnost v tlaku průměrná [MPa]
S/1	7,702	149,30	149,32	150,20	2300	1225	54,4	59,3
S/2	7,597	149,45	149,60	148,55	2290	1425	63,3	
S/3	7,652	150,18	150,23	150,95	2250	1350	60,0	
P/1	7,784	150,42	150,30	149,76	2300	1625	72,2	65,0
P/2	7,645	149,63	149,72	149,14	2290	1340	59,6	
P/3	7,535	149,43	149,51	147,71	2280	1425	63,3	
R/1	7,239	149,99	150,21	152,01	2110	720	32,0	30,1
R/2	7,349	150,68	150,48	153,49	2110	680	30,2	
R/3	7,354	150,55	150,45	153,88	2110	635	28,2	

Tabulka 26: Souhrnné výsledky zkoušky pevnosti v tlaku

SOUHRNNÉ VÝSLEDKY ZKOUŠEK (PEVNOST V TAHU ZA OHYBU)								
číslo vzorku	hmotnost [kg]	výška [mm]	šířka [mm]	délka [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	maximální zatížení [N]	pevnost v tahu ohybem [MPa]	pevnost v tahu za ohybu průměrná [MPa]
S/4	8,801	97,52	99,92	400,37	2260	15210	4,8	4,4
S/5	9,183	102,56	101,88	400,50	2190	15250	4,3	
S/6	9,243	102,29	102,26	400,10	2210	14830	4,2	
P/4	9,110	100,13	99,51	400,83	2280	13450	4,0	4,0
P/5	8,871	98,20	99,18	400,25	2280	12740	4,0	
P/6	9,290	100,81	100,56	400,57	2290	13200	3,9	
R/4	8,636	100,75	101,96	400,22	2100	12800	3,7	3,8
R/5	8,573	100,59	101,26	400,56	2100	12490	3,7	
R/6	8,634	101,02	101,84	400,56	2100	13560	3,9	

Tabulka 27: Souhrnné výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu

SOUHRNNÉ VÝSLEDKY ZKOUŠEK (HLOUBKA PRŮSAKU TLAKOVOU VODOU)								
číslo vzorku	hmotnost [kg]	výška [mm]	šířka [mm]	délka [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	prosakování do boku tělesa	hloubka průsaku [mm]	hloubka průsaku průměrná [mm]
S/10	7,677	150,41	150,26	151,88	2240	NE	21	18
S/11	7,550	149,59	149,54	147,60	2290	NE	18	
S/12	7,699	150,18	150,25	151,42	2250	NE	15	
P/10	7,564	150,32	150,40	146,58	2280	NE	9	10
P/11	7,690	149,63	149,55	150,31	2290	NE	14	
P/12	7,606	150,12	150,19	147,09	2290	NE	7	
R/7	7,112	150,15	149,97	149,95	2110	NE	27	20
R/8	7,160	150,00	150,09	150,77	2110	NE	24	
R/9	7,293	150,52	150,33	151,98	2120	NE	10	

Tabulka 28: Souhrnné výsledky zkoušky průsaku tlakovou vodou

SOUHRNNÉ VÝSLEDKY ZKOUŠEK (CHRL METODAC)							
číslo vzorku	hmotnost [kg]	průměr	výška	objemová hmotnost [kg/m ³]	počet cyklů	odpad [g/m ²]	odpad v [g/m ²] po cyklech průměrný
S/7	1,9191	149,32	50,32	2180	75	940	2077
S/8	2,0217	149,48	52,05	2210	75	2760	
S/9	1,9499	149,57	50,60	2190	75	2530	
P/7	2,0205	149,34	52,61	2190	75	4870	4843
P/8	1,9672	149,45	50,35	2230	75	5650	
P/9	1,9111	149,59	50,42	2160	75	4010	
R/10	1,8862	149,33	52,79	2040	75	12690	15027
R/11	1,8576	150,12	51,51	2040	75	16260	
R/12	1,8436	149,45	51,63	2040	75	16130	

Tabulka 29: Souhrnné výsledky zkoušky CHRL

Receptura plastového recyklátu vykazovala lepší hodnoty u zkoušek pevnosti v tlaku (65 MPa) a hloubky průsaku tlakovou vodou (max. 10 mm), zatímco standardní směs PREFA PRODUKT měla vyšší pevnost v tahu za ohybu (4,4 MPa). U zkoušky CHRL dosahovala lepších výsledků receptura PREFA PRODUKT (2077 g/m²), avšak žádná receptura nesplnila normativní limit 1000 g/m². Receptura směsného recyklátu nemohla být porovnávána s předchozími dvěma recepturami z důvodu jiné třídy betonu. Složení receptur je rozebráno v kapitolách 1.1, 1.2 a 1.3 experimentální části.

ZÁVĚR BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Bakalářská práce je zaměřena na několik klíčových aspektů stavebních a demoličních odpadů (SDO) v České republice. Hlavním cílem teoretické části bylo analyzovat problematiku SDO, prozkoumat stav zásob stavebního kamene a štěrkopísku, a diskutovat otázky ochrany životního prostředí v kontextu stavebního inženýrství. Výzkum odhalil, že SDO tvoří významnou část celkové produkce odpadů v ČR, konkrétně asi 45 %, což ročně představuje přibližně 17 milionů tun. Z tohoto množství se recykluje pouze 40 %. Ve srovnání s jinými zeměmi, jako jsou Nizozemsko, Dánsko, Německo či USA, má Česká republika v oblasti recyklace SDO značný prostor pro zlepšení.

Práce dále popisuje technologické postupy výroby recyklátů z SDO, jejich druhy a možnosti využití. Zabývá se také problematickými vlastnostmi recyklátů, které vyžadují důkladné prověření před jejich použitím. Součástí práce jsou i nekonvenční recykláty jako například plastový recyklát a jeho potenciální využití ve stavebním inženýrství.

V rámci diplomové práce, která naváže na předloženou bakalářskou práci, se v teoretické části zaměříme na problematiku nakládání s SDO, včetně jejich ukládání na skládky, deponie a recyklační linky. Budeme se zabývat kapacitou skladovacích ploch a odbytem SDO. Důležitým aspektem bude také snaha o odstranění dezinformací ohledně SDO, jako je nedůvěra v jejich kvalitu, nízká informovanost či obavy ze škodlivých látek. Práce se bude také věnovat otázce, zda by stát měl nařídít stavebním firmám používání určitého množství recyklovaného materiálu při nových stavbách či rekonstrukcích.

V rámci této bakalářské práce se autor vydal na ambiciózní cestu s cílem prozkoumat možnosti implementace nových stavebních recyklátů na český trh. Ačkoli se nepodařilo dosáhnout původně vytyčeného cíle a omezit těžbu přírodního kameniva v České republice, tento zdánlivý neúspěch otevřel dveře k hlubšímu pochopení komplexnosti dané problematiky. Zjištění v této práci poukazují na potenciální negativní dopady, které by mohly nastat v případě, že by nebyly nalezeny vhodné alternativy k současným stavebním materiálům. Zvýšené náklady na prefabrikované výrobky a narušení ekologické rovnováhy jsou jen špičkou ledovce problémů, kterým by lidstvo mohlo čelit.

Avšak, jak se říká, každá překážka je příležitostí k růstu. V navazující diplomové práci se autor zaměří na odstranění zjištěných nedostatků, zejména pak na problém s odpadem při zkoušce CHRL, kde hodnoty přesáhly 1000 g/m². Autor je přesvědčen, že řešení těchto problémů je na dosah, vzhledem k tomu, že ostatní provedené zkoušky vykazovaly pozitivní výsledky. Zároveň si autor uvědomuje, že nelze ignorovat palčivý problém dnešní doby –

všudypřítomné plastové znečištění. Statistiky jsou alarmující: každou minutu se prodá milion PET lahví, ročně se spotřebuje 500 miliard igelitových tašek a 8 milionů tun plastového odpadu končí v oceánech. Tato ekologická krize autora inspirovala k inovativnímu přístupu – experimentálnímu využití plastového recyklátu v betonových směsích.

V rámci diplomové práce je plánováno tuto myšlenku dále rozvinout. Budou zkoumány možnosti nahrazení běžné plastové drtě speciálně upraveným plastovým recyklátem, jehož vlastnosti by se blížily přírodnímu kamenivu. Cílem je najít způsob, jak efektivně využít plastový odpad ve stavebnictví a současně přispět k řešení problému znečištění životního prostředí. Konkrétně se autor chystá modifikovat základní recepturu PREFA PRODUKT částečným nahrazením přírodního kameniva tímto inovativním plastovým recyklátem. Autor věří, že tento přístup by mohl vést k revoluci ve stavebním průmyslu.

Tato práce však nekončí pouze u technických aspektů. Autor usiluje o vytvoření udržitelných řešení, která by mohla přinést jak ekologické, tak ekonomické benefity. Je třeba podnítit mezioborovou spolupráci, propojit startupy, podnikatele, akademickou sféru a další klíčová odvětví. Jen společnými silami lze čelit výzvám, které před společností stojí, a formovat budoucnost stavebního průmyslu.

Tato bakalářská práce a navazující diplomový výzkum představují více než jen akademické studie. Jsou to kroky na cestě k udržitelnější budoucnosti, kde stavebnictví nehraje roli ničitele přírody, ale stává se součástí řešení globálních environmentálních problémů. S tímto posláním se autor vydává vstříc novým výzvám, odhodlán přispět svým dílem k pozitivní změně v tomto oboru i ve společnosti jako celku.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] LAMOND, Joseph F. a PIELERT, James H. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials: (STP 169D)*. Online. ASTM International, 2006. ISBN 978-1-62198-719-2. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=isTMHD6yIy8C&printsec=frontcover&hl=cs&source=gs_b_s_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. [cit. 2024-04-26].
- [2] DVOŘÁK, Jiří; KVÍTEK, Zdeněk a KŮLA, Karel. *Beton I*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
- [3] BECHYNĚ, Stanislav. *Betonové stavitelství. I. díl, Technologie betonu. Svazek první, Složky betonu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [4] *Modern earth buildings: materials, engineering, construction and applications*. Editor Matthew R. HALL, editor Rick LINDSAY, editor Meror KRAYENHOFF. Woodhead publishing series in energy. Oxford: Woodhead Publishing Limited, 2012. ISBN 978-0-85-709616-6.
- [5] DVOŘÁK, Jiří; KVÍTEK, Zdeněk a SLABÝ, Jiří. *Betonové konstrukce I: pro 3. ročník SPŠ stavebních*. 2. vyd., upr. Praha: Sobotáles, 1996. ISBN 80-85920-20-4.
- [6] KVÍTEK, Zdeněk. *Beton I: technologie*. Praha: SPN, 1973.
- [7] NOVÁK, Jaroslav; NOVOTNÝ, Jaroslav a TOBOLKA, Zdeněk. *Stavební materiály*. Praha: České vysoké učení technické, 1991. ISBN 80-01-00573-9.
- [8] *Stavímbydlím.cz* [online]. 2021 [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://stavimbydlim.cz/>
- [9] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Učebnice (VUTIUM). Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- [10] *Aktuální trendy v rozvoji technologie betonu. Část 2*. Praha: Dům techniky ČSVTS, 1989.
- [11] LEE, Luke S. a KARBHARI, Vistasp M. *Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures*. Online. Woodhead Publishing, 2011. ISBN 978-0-85-709092-8. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9781845693985/service-life-estimation-and-extension-of-civil-engineering-structures>. [cit. 2024-04-26].
- [12] KREJSA, Martin a KONEČNÝ, Petr. *SPOLEHLIVOST A BEZPEČNOST STAVEB*. Online, Studijní materiál. Technická 8, 301 00 Plzeň 3: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Západočeská univerzita v Plzni, 2012. Dostupné z: https://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/spolehlivost_obr.pdf. [cit. 2024-04-27].

- [13] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Betonové stavitelství. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [14] POPOVICS, Sandor. *Concrete Materials - Properties, Specifications and Testing*. Online. 2nd edition. William Andrew Publishing/Noyes, 1992. ISBN 978-0-8155-1655-2. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=pfxt0zcN6MC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ViewAPI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. [cit. 2024-04-27].
- [15] *Merit-slatinany.cz*. Online. 2018. Dostupné z: <https://www.merit-slatinany.cz/>. [cit. 2024-04-28].
- [16] CHANDRA, Satish a BERNTSSON, Leif. *Lightweight Aggregate Concrete – Science, Technology, and Applications*. Online. William Andrew Publishing/Noyes, 2002. ISBN 978-0-8155-1820-4. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780815514862/lightweight-aggregate-concrete>. [cit. 2024-04-29].
- [17] *Ebeton*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/>. [cit. 2024-04-29].
- [18] *Portal Produktowy Grupy PCC*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.products.pcc.eu/cs/>. [cit. 2024-05-01].
- [19] *TZB – info*. Online. 2010. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/>. [cit. 2024-05-01].
- [20] ŠKOPÁN, Miroslav. *RECYCLING 2020 – Cirkulární ekonomika ve stavebnictví, recyklace a využívání druhotných stavebních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství, 2020. ISBN 978-80-214-5894-9.
- [21] NEWMAN, John a CHOO, Ban Seng. *Advanced Concrete Technology*. Online. 4rd edition. Elsevier, 2003. ISBN 978-0-08-052656-0. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780750656863/advanced-concrete-technology#book-info>. [cit. 2024-05-03].
- [22] *AZS 98 Recyklace stavebních odpadů*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.azs98.cz/>. [cit. 2024-05-05].
- [23] *CSČM – CIHLÁŘSKÝ SVAZ ČECH A MORAVY*. Online. 2020. Dostupné z: <https://cscm.cz/>. [cit. 2024-05-05].
- [24] *BETONserver*. Online. 2018. Dostupné z: <https://www.betonserver.cz/>. [cit. 2024-05-05].
- [25] *Radilek.cz*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.radilek.cz/>. [cit. 2024-05-05].
- [26] *Recyklujme stavby*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.recyklujmestavby.cz/>. [cit. 2024-05-05].

- [27] LUMOS. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.lumos.cz/>. [cit. 2024-05-05].
- [28] Brno recyklace. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.brnorecyklace.cz/>. [cit. 2024-05-05].
- [29] KREBS, Stefan; KOLAŘÍK, Ladislav a BRYKSÍ STUNOVÁ, Barbora. *Teorie zpracování plastů a kompozitů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [30] KIZLINK, Juraj. *Odpady: sběr, zpracování, využití, zneškodnění, legislativa*. 3., upr. a rozš. vyd., V Akademickém nakl. CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-7204-884-7.
- [31] Puruplast. Online. 2015. Dostupné z: <https://www.puruplast.cz/>. [cit. 2024-05-09].
- [32] ENVISAN–GEM. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.envisan.cz/>. [cit. 2024-05-14].
- [33] Publi.cz. Online. 2023. Dostupné z: <https://publi.cz/>. [cit. 2024-05-15].
- [34] Ministerstvo životního prostředí. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.mzp.cz/>. [cit. 2024-05-18].
- [35] DRAJER, Martin. *Aplikovatelnost zahraničních portlandských cementů v České republice*. Online, bakalářská práce, vedoucí Vladimír Suchánek. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2019. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/10195/73674>. [cit. 2024-05-31].
- [36] ČSN EN 206+A2 (732403), *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 2021.
- [37] ČSN EN 1008 (732028), *Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. 2003.
- [38] ČSN EN 197-1 ED.2, *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2012.
- [39] ČSN EN 1097-3, *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva*. 1999.
- [40] ČSN EN ISO 472, *Plasty – Slovník*. 2015.
- [41] ČSN EN 12390-2, *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. 2020.
- [42] ČSN EN 12350-6, *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. 2020.
- [43] ČSN EN 12350-7, *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*. 2020.
- [44] ČSN EN 12350-5, *Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím*. 2020.
- [45] ČSN EN 12350-2, *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. 2020.

- [46] ČSN EN 12390-7, *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. 2020.
- [47] ČSN EN 12390-3, *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2020.
- [48] ČSN EN 12390-5, *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. 2020.
- [49] ČSN EN 12390-8, *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. 2020.
- [50] ČSN 73 1326, *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*.
- [51] ČSN P 732404, *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplňující informace*. 2024.
- [52] ČSN 73 1371, *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. 2011.