

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STAVEBNÍ



**BETON S RECYKLOVANÝM KAMENIVEM A
JEHO MECHANICKÉ A DEFORMAČNÍ
VLASTNOSTI**

Bakalářská práce

2017

Denisa Kavanová



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kavanová Jméno: Denisa Osobní číslo: 421391

Zadávací katedra: K133 Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Beton s recyklovaným kamenivem a jeho mechanické a deformační vlastnosti

Název bakalářské práce anglicky: Concrete with recycled aggregate and its mechanical and deformation properties

Pokyny pro vypracování:

Odborná studie k recyklaci betonu a využití recyklovaného betonu jako kameniva. Výroba zkušebních vzorků, jejich zkoušky a vyhodnocení experimentální části bakalářské práce.

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Iva Broukalová, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 7.2.2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

7.2.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám žádný závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 1. 5. 2017

Denisa Kavanová

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych velice ráda poděkovala všem, kteří mne během mého snažení podporovali a umožnili mi vypracování této bakalářské práce. Obzvláště bych chtěla poděkovat vedoucí práce Ing. Ivě Broukalové, Ph.D., za odborné konzultace, vedení a nasměrování správným směrem. Za pomoc s experimentální částí práce bych ráda poděkovala doc. Ing. Petru Štemberkovi, Ph.D., Ing. Jakubovi Žákovi a Ing. Vojtěchu Zachardovi. Také děkuji své rodině a svému příteli, kteří mne po celou dobu studia podporovali.

| | |
|----------------|--|
| Autor: | Denisa Kavanová |
| Název: | Beton s recyklovaným kamenivem a jeho mechanické a deformační vlastnosti |
| Vedoucí práce: | Ing. Iva Broukalová, Ph.D. |
| Škola: | České vysoké učení technické v Praze |
| Fakulta: | Fakulta stavební |
| Obor: | Konstrukce pozemních staveb |
| Rok vydání: | 2017 |
| Počet stran: | 66 |

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá recyklací betonu a možnostmi použití betonového recyklátu jako kameniva do nového betonu. Kromě analýzy současné podoby recyklace betonových odpadů v ČR i ve světě, zkoumá klady a zápory implementování recyklovaného kameniva a snaží se najít způsoby, jak zvýšit efektivitu a množství recyklace kameniva. Dále práce mapuje různé přístupy k recyklaci betonových staveb. V experimentální části práce jsou porovnány mechanické a deformační vlastnosti betonu s přírodním kamenivem a betonu s recyklovaným kamenivem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stavební a demoliční odpad, Recyklované kamenivo, Beton s recyklovaným kamenivem, Přírodní kamenivo, Recyklační linka, Udržitelný rozvoj, Hodnocení životního cyklu

| | |
|----------------------|--|
| Author: | Denisa Kavanová |
| Title: | Concrete with recycled aggregate and its mechanical and deformation properties |
| Supervisor: | Ing. Iva Broukalová, Ph.D. |
| University: | Czech Technical University in Prague |
| Faculty: | Faculty of Civil Engineering |
| Branch: | Building Structures |
| Year of publication: | 2017 |
| Number of pages: | 66 |

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the recycling of concrete and the possibilities of using recycled concrete aggregate as an aggregate for new concrete. Apart from the analysis of the current state of recycling of concrete structures in the Czech Republic and in the world it examines the pros and cons of implementing recycled aggregate and aims to find ways to increase the efficiency and the quantity of recycling of aggregate. Furthermore the thesis researches different approaches to the recycling of concrete buildings. The experimental part of the thesis compares the mechanical and deformation properties of natural aggregate concrete and recycled aggregate concrete.

KEY WORDS

Construction and Demolition Waste, Recycled Aggregate, Recycled Aggregate Concrete, Natural Aggregate, Recycling Plant, Sustainable Development, Life Cycle Assessment

OBSAH

| | |
|--|----|
| Prohlášení..... | 3 |
| Poděkování..... | 4 |
| Abstrakt..... | 5 |
| Klíčová slova..... | 5 |
| Abstract | 6 |
| Key words | 6 |
| Obsah | 7 |
| Seznam použitých zkratk | 9 |
| Úvod..... | 10 |
| Motivace..... | 11 |
| 1 Teoretická část..... | 13 |
| 1.1 Recyklace obecně..... | 13 |
| 1.2 Udržitelný rozvoj | 14 |
| 1.3 Odpady využívané ve stavebním průmyslu | 16 |
| 1.4 Současná podoba recyklace betonových odpadů | 19 |
| 1.5 Výroba betonových recyklátů | 22 |
| 1.6 Recyklační linky..... | 24 |
| 1.6.1 Stacionární recyklační linky..... | 24 |
| 1.6.2 Mobilní recyklační linky | 24 |
| 1.6.3 Zařízení recyklačních linek | 25 |
| 1.7 Beton z recyklovaného kameniva | 30 |
| 1.7.1 Požadavky a vlastnosti recyklovaného kameniva do nového betonu | |
| 30 | |
| 1.7.2 Vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem..... | 33 |

| | | |
|-----|--|----|
| 2 | Experimentální část | 34 |
| 2.1 | Princip experimentu | 34 |
| 2.2 | Prosévací zkouška recyklovaného kameniva | 37 |
| 2.3 | Návrh a příprava betonových směsí | 39 |
| 2.4 | Rozdíly v hmotnosti a struktuře betonu | 41 |
| 2.5 | Zkouška válcové pevnosti v tlaku | 43 |
| 2.6 | Zkouška dotvarování | 47 |
| | Závěr | 59 |
| | Použité zdroje..... | 60 |
| | Seznam obrázků | 63 |
| | Seznam tabulek | 65 |
| | Seznam příloh | 66 |

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| | |
|-------------|--|
| S & D odpad | Stavební a demoliční odpad |
| MA21 | Místní Agenda 21 |
| KO | Komunální odpad |
| HŽC | Hodnocení životního cyklu |
| ARSM | Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice |
| ČIŽP | Česká inspekce životního prostředí |
| NPSK | Nasáklé povrchově suché kamenivo |
| PK | Přírodní kamenivo |
| RK | Recyklované kamenivo |
| BPK | Beton s přírodním kamenivem |
| BRK | Beton s recyklovaným kamenivem |

ÚVOD

Stavebnictví je oblastí, která produkuje nejvíce odpadů na světě, více než všechen ostatní průmysl dohromady [1]. Zároveň v současnosti není stavebního materiálu, který by byl používanější než beton. Beton se za poslední desetiletí dostal na špičku díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem, relativně nenáročné výrobě a možnosti dát mu jakýkoliv tvar. Každý rok vznikne na každého člověka v průměru jedna tuna betonu [2] a průměrně 200 kilogramů, tedy jedna pětina, míří do demolic. Právě proto je nutné začít se zabývat úsporou přírodního kameniva, které se používá při jeho výrobě a tvoří přibližně 75 objemových procent betonové směsi. Zároveň je však stejně důležité řešit otázku, co dělat se starým betonem. Naštěstí jdou tyto dva problémy ruku v ruce a mají společná řešení.

Kamenem úrazu použití recyklovaného kameniva a největším rozdílem oproti standardnímu kamenivu je jeho vysoká nasákavost, způsobená cementovým prachem na povrchu. Ta následně způsobuje horší zpracovatelnost, mechanické vlastnosti betonu (pevnost, modul pružnosti), vyšší vodní součinitel a vyšší hodnoty dotvarování. Z těchto důvodů nalézá recyklované kamenivo uplatnění především v konstrukcích, které nemají vysoké mechanické požadavky a nejsou vystavovány povětrnostním vlivům.

MOTIVACE

Toto téma jsem si vybrala z důvodu osobního vztahu k recyklaci. Koncept recyklace je mi velice blízký, souhlasím s jeho filozofií a je nám všem důvěrně známý v každodenním životě. Přesto se jedná o do značné míry neprozkoumané téma, jehož vývoj je stále ve svých počátcích a já věřím, že bude nadále pokračovat.

Ukládání stavebních odpadů na skládku znamená obrovskou zátěž pro životní prostředí. Stejně tak představuje obrovskou zátěž těžba přírodního kameniva. Všichni víme, že ani skládky ani doly lomového kameniva nejsou a ani nemohou být bezedné. Recyklace je úžasný způsob jak ušetřit tuto dvojnásobnou zátěž životního prostředí a výzkum v této oblasti je podle mého názoru velmi záslužná činnost. Tato práce má za úkol svými poznatky a výsledky zmírnit neochotu producentů betonu více používat betonový recyklát a tím alespoň mírně zlepšit situaci životního prostředí v České republice, potažmo i ve světě.

Na tématu práce mě také zaujalo, do jak velké míry je neprobádáno, a to i přesto, že se jím odborná veřejnost již několik desítek let zabývá. Stavební odpad je zdroj suroviny, která je materiálem s velkou mírou nejistoty a z podstaty věci musí mít pokaždé jiné vlastnosti. Nejdůležitějšími faktory jsou druh konstrukce, ze které recyklát pochází a průběh samotné recyklace. Parametry vzorku také nemusí odpovídat parametrům celého objemu použitého materiálu. Vlastnosti materiálu se tedy nedají kvantitativně ani kvalitativně předem určit, recyklát se vždy musí patřičně otestovat. Pokud nevyhoví více druhů materiálu, testování se začne prodražovat a přírodní kamenivo se stane finančně konkurenceschopnou alternativou recyklovaného kameniva. Příkladem nedostatečného výzkumu může být aplikace betonového recyklátu do betonové směsi. Existují různé názory na to, jak vyřešit problém vysoké nasákavosti recyklátu, zda-li kamenivo předem saturovat, nebo přidat o to více vody do směsi, a případně o kolik.

To, že se betonový recyklát v České republice příliš nepoužívá, je vidět na faktu, že na trhu je problém najít výrobce betonového recyklátu, běžně se nedodává a sehnat jej je obtížné. Ve velké míře se nepoužívá, není příliš implementován v současných stavebních návrzích a chybí zkušenosti v laboratorní praxi. Mým cílem je najít důvody, proč není betonový recyklát více používán a proč je situace v takovémto stavu.

Všechny tyto důvody - osobní vztah k recyklaci a životnímu prostředí, neprobádanost problematiky a neochota používání betonového recyklátu - mě inspirovaly k hlubšímu prozkoumání tohoto tématu a byly mou motivací k práci.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Recyklace obecně

Recyklace (z anglického slova recycling = recirkulace) znamená znovuvyužití nebo vrácení zpět do procesu, kde odpad vzniká – tedy za původním účelem a do stejného systému. Tato strategie šetří přírodní zdroje surovin a zároveň minimalizuje zatěžování prostředí škodlivinami. V případě nejvyšší nouze zajišťuje recyklace nezbytné minimum zásob strategických surovin a je jediným udržitelným způsobem snížení nákladů při stoupající ceně surovin.

Druhotná surovina je produkt lidské činnosti, který lze opětovně použít do výroby, přičemž dojde k náhradě primárních – přírodních, neobnovitelných – surovin. Na podzim roku 2014 byla vládou ČR přijata tzv. Politika druhotných surovin, která má jako hlavní motto přeměnu odpadů a KO na zdroje. Věnuje se deseti základním komoditám, jejichž výběr byl ovlivněn významností druhotné suroviny, hmotnostní produkcí, potřebou a potenciálem využití komodity v ČR. Mezi takové patří kovy, papír, plasty, sklo, stavební a demoliční hmoty, vedlejší energetické produkty, vozidla s ukončenou životností, odpadní a elektrická zařízení, použité pneumatiky a odpadní pryž, odpadní baterie a akumulátory. Dokument mluví o předběžných kvótách o využívání těchto surovin pro stavební projekty, ale pouze ty, které jsou financovány ze státních prostředků.

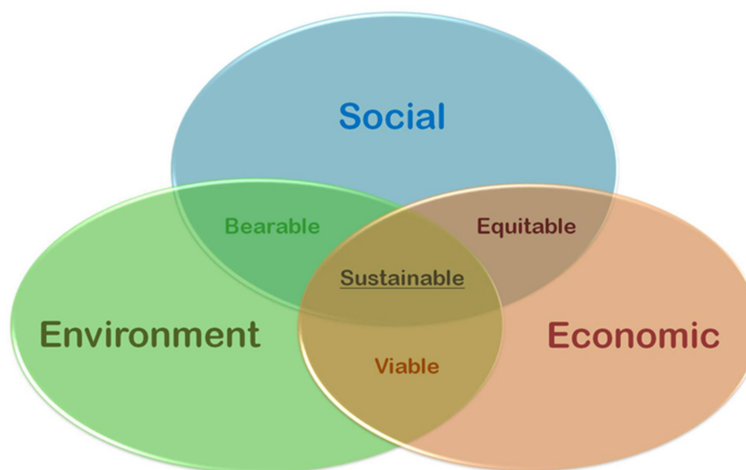
1.2 Udržitelný rozvoj

Nynější situace skládek v České republice je jiná než v celosvětovém kontextu. Na území našeho státu se místa vyhrazená pro skládky zmenšují, ubývá jich a jsou zaplněná. Vyrůstá tím cena za skládkování odpadů a cena za dopravu na skládku. Proto se dnes v cenících recyklačních center nachází položky, které jsou zdarma, např. zahliněné kamenivo [3].

Základním textem udržitelného rozvoje je dokument Agenda 21, který byl v roce 1992 přijat na summitu OSN v Riu de Janeiru. Na regionální úrovni se stejné principy snaží prosadit Místní Agenda 21 (MA21). K prosazování myšlenek MA21 je potřeba spolupráce a především aktivní snaha veřejné správy – politiků a úředníků. Základní definice udržitelného rozvoje dle OSN zní takto:

„Udržitelný rozvoj je takový rozvoj, který zabezpečuje potřeby současné společnosti, aniž by omezoval možnost budoucích generací naplňovat jejich vlastní potřeby [4].“

Jinými slovy lze říci, že ekonomický rozvoj by měl respektovat vyčerpatelnost a neobnovitelnost zdrojů. V ideálním případě by měly být všechny tři pilíře života (ekonomický, sociální, environmentální) v rovnováze [5], viz obrázek č. 1.



Obrázek č. 1 Rovnováha sociální (1), environmentální (2) a ekonomické (3) sféry (průnik 1 a 2 – snesitelný, 1 a 3 –spravedlivý, 2 a 3 - životaschopný)

Využití recyklovaného kameniva, ať už v betonových konstrukcích nebo jakýmkoli jiným způsobem, vede ke snížení množství S & D odpadu, úspoře přírodního materiálu, ke snížení svázaných emisí CO₂ a ke snížení spotřebované energie, potažmo úspoře neobnovitelných zdrojů. Do jaké míry je recyklační proces výhodný z energetického hlediska závisí na náročnosti konkrétního procesu.

V současné době nelze z publikovaných studií jednoznačně určit, zda je z hlediska svázaných CO₂ emisí šetrnější recyklované nebo přírodní kamenivo. Použití lomového kameniva má podle studií mírně vyšší dopad na životní prostředí než použití recyklátu, říční kamenivo má překvapivě v porovnání s recyklátem dopad mírně nižší [2].

Životní cyklus materiálů zkoumá metoda zvaná hodnocení životního cyklu (Life cycle assessment). Tato analýza sestává dle normy ČSN EN ISO 14040 ze čtyř kroků: určení cíle, inventarizace, zhodnocení dopadu na životní prostředí a diskuze výsledků [6]. Koncepty analýzy HŽC lze rozdělit podle rozsahu zkoumané části životního cyklu materiálu do tří typů – cradle to gate (od kolébky k bráně), cradle to grave (od kolébky k hrobu) a cradle to cradle (od kolébky ke kolébce). Poslední ze jmenovaných odpovídá uzavřenému cyklu (Closed-loop cycling), plnohodnotné recyklaci materiálu, v případě betonu však nejsme v dnešní době schopni úplné recyklace dosáhnout. V České republice i na světě je tedy stále používán otevřený cyklus (Open-loop cycling), při kterém se přidává nová složka.

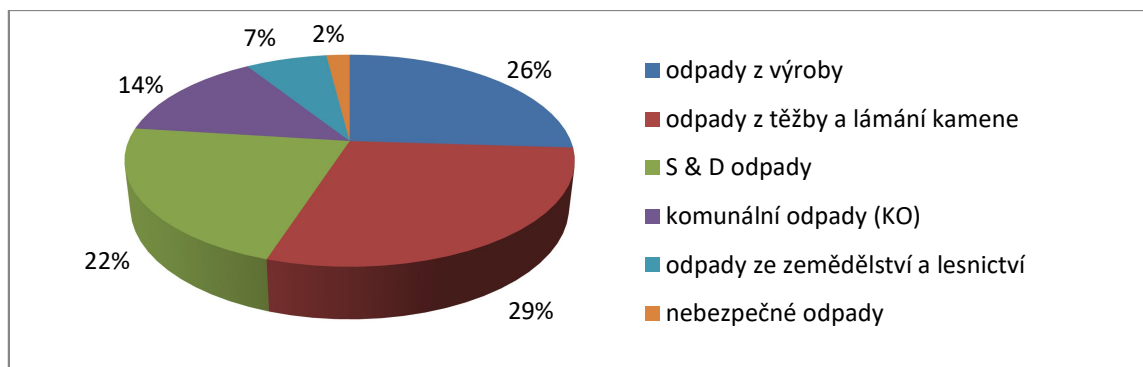
1.3 Odpady využívané ve stavebním průmyslu

Stavební a demoliční odpad (S & D odpad) není definován přímo v zákoně č. 185/2001 Sb. (Zákon o odpadech), odpovídá však skupině č. 17 v Katalogu odpadů ve vyhlášce č. 93/2016 Sb., která je definována jako „Stavební a demoliční odpady (včetně vytěžené zeminy z kontaminovaných míst)“ [7]. Nakládání se S & D odpadem je také zakotveno v Surovinové politice ČR. Podle ní je v ČR z celkového odhadovaného ročního množství stavebního odpadu (cca 14 mil. tun) recyklováno jen přibližně 10%, což je méně než polovina objemů běžných v zemích EU [8]. Rozdíl je způsoben nízkou cenou za uložení odpadů ve srovnání s náklady na recyklaci. Legislativní opatření pro nápravu tohoto stavu však dosud nebyla provedena. Od vydání dokumentu Surovinová politika (2014) se však míra recyklace již výrazně zvýšila. Objemově má největší význam v oboru recyklace stavebních materiálů recyklace kameniva železničních svršků. Dále mezi stavební odpady znovuvyužívané ve stavebnictví patří betonový recyklát, cihelná suť, recyklát z hornin a asphalt. Velký význam mají odpady energetického průmyslu, škvára jako přísada do betonových směsí a energosádrovec jako regulátor tuhnutí do cementu.

Pro zefektivnění systému recyklace je přístup k S & D odpadu implementován v Plánu odpadového hospodářství v ČR, kterému jsou následně podřízeny i Plány odpadového hospodářství jednotlivých krajů. Např. závazná část Plánu odpadového hospodářství České republiky 2016-2025 se, v souladu s evropskými směnicemi, zavazuje do roku 2020 zvýšit míru S & D odpadů připravených k opětovnému využití na 70 % hmotnosti [9]. Tento cíl je podle ARSM nedostatečný, jelikož těchto hodnot je podle nich dosahováno v ČR již dnes, což je ve značném rozporu se Surovinovou politikou. Zemím EU, které nedosáhnou do roku 2020 požadovaných 70 % připraveného S & D odpadu, by se měly následně zvýšit poplatky za skládkování tohoto odpadu nebo zavést povinnost třídění u demoličních míst velkého rozsahu.

Celková produkce odpadů v Evropské unii se skládá z šesti skupin, viz obrázek č. 2 a její objem je přibližně 1,4 miliardy tun ročně [10]. V rámci ČR je situace obdobná, S & D odpad zde také tvoří cca 25 % objemu všech odpadů.

Recyklace betonu: Teoretická část



Obrázek č. 2 Graf skladby odpadů v EU dle druhu materiálu

V České republice zaujímají drtivou většinu S & D odpadu inertní minerální odpady – beton, tašky, cihly, keramika, zemina, kamení a problematické materiály jako asfalt, dehet a materiály obsahující azbest. Z celého toku se za nejlépe využitelné považují materiály skupiny č. 1701 – beton, tašky, cihly a keramika, č. 17 03 02 – asfaltové směsi a č. 17 09 04 – směsné S & D odpady. Tyto dohromady tvoří zhruba 30 % celkového objemu S & D odpadu [11]. V letech 2008 – 2013 se produkce S & D odpadu propadla z důvodu utlumení stavební výroby v době hospodářské krize, viz tabulka č. 1. Ne vždy však množství S & D odpadu odpovídá objemu stavební výroby v ČR. V letech 2005 – 2008 se objem stavebního odpadu zvýšil i přes pokles stavební výroby, pravděpodobně díky lepší evidenci odpadů. Dalším vysvětlením mohou být dle doc. Ing. Miroslava Škopána, CSc., prezidenta ARSM, poznatky od stavebních firem, které mají oprávnění nakládat se stavebními odpady, o snaze některých stavebních firem získat fingovaná potvrzení o předání stavebních odpadů oprávněnému subjektu.

Tabulka č. 1 Produkce S & D odpadu dle druhu materiálu v ČR

| Druh odpadu | Rok 2009 (tis. tun) | Rok 2013 (tis. tun) |
|---------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Beton, cihly, tašky a keramika | 2998 | 3249 |
| Asfaltové směsi, dehet a vyr. z dehtu | 516 | 510 |
| Zemina, kamení a vytěžená hlušina | 10 708 | 9956 |
| Izolace a stav. materiál s azbestem | 74 | 61 |
| Stavební materiál na bázi sádry | 7 | 9 |
| Jiné stavební a demoliční odpady | 580 | 609 |
| Celkem | 14 883 | 14 394 |

Mezi hlavní způsoby nakládání se S & D odpadem patří od nejvýznamnějšího využití na terénu, recyklace, využití rekultivace a skládkování, které v roce 2013 představovalo zcela marginálních 5 – 6 % odpadu. Recyklace oproti tomu má výrazně

Recyklace betonu: Teoretická část

stoupající tendenci. Mezi roky 2010 a 2013 stoupla z 2,475 mil. tun na 3,797 mil. tun, tedy o více než 50 % [11].

Odpad betonového charakteru zaujímá v České republice ze všeho S & D odpadu poměrně malou část, přibližně deset procent. V následujících letech se však tento poměr ku tradičním materiálům bude zvětšovat. V době demolice dnešní betonové výstavby, která počítá s životností 50 let, by mohl beton tvořit většinu S & D odpadu. Např. v Japonsku již dnes tato hodnota dosahuje 40 %. Při dělení odpadů dle původu můžeme beton najít ve všech položkách kromě výkopové zeminy, viz tabulka č. 2 [1].

Tabulka č. 2 Čtyři základní skupiny S & D odpadu dle původu odpadu v ČR

| Druh odpadu | Podíl |
|----------------------------------|-------------|
| Výkopová zemina | 65 % - 75 % |
| Odpady z demolice objektů | 5 % - 15 % |
| Materiál z demolice vozovek | 10 % - 15 % |
| Demoliční stavební minerální suť | 5 % - 20 % |

Porovnání hodnot v České republice s ostatními státy EU nabízí tabulka č. 3 [12]. Státy s největším objemem recyklovaných materiálů jsou vyspělé státy, tzv. „tradičně betonové“ – Holandsko, Belgie, Dánsko. V dalších ekonomicky vyspělých státech jako např. Německo nebo Irsko je však překvapivě míra recyklace nízká.

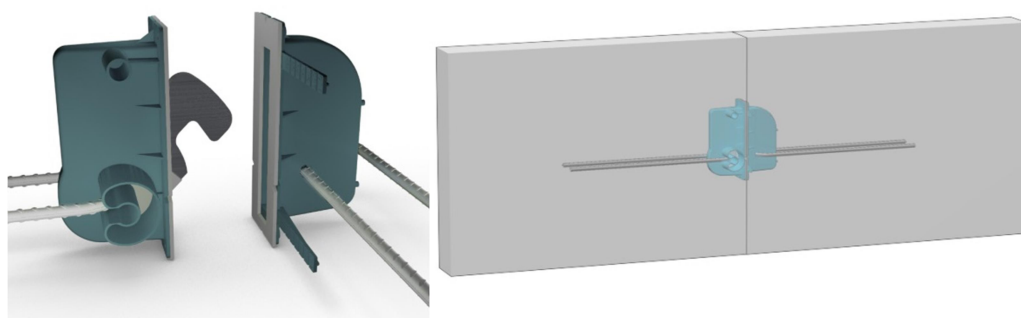
Tabulka č. 3 Recyklace S & D odpadu v EU

| Země | Recyklace S & D odpadu [10^6 tun] | Recyklovaný materiál [%] | Skládkovaný materiál [%] |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Německo | 59 | 17 | 83 |
| Velká Británie | 30 | 45 | 55 |
| Francie | 24 | 15 | 85 |
| Itálie | 20 | 9 | 91 |
| Španělsko | 13 | < 5 | > 95 |
| Holandsko | 11 | 90 | 10 |
| Belgie | 7 | 87 | 13 |
| Rakousko | 5 | 41 | 59 |
| Dánsko | 3 | 81 | 19 |
| Řecko | 2 | < 5 | > 95 |
| Švédsko | 2 | 21 | 79 |
| Finsko | 1 | 45 | 55 |
| Irsko | 1 | < 5 | > 95 |

1.4 Současná podoba recyklace betonových odpadů

Poprvé nastal problém s velkým množstvím betonového odpadu při demolici rozsáhlých sídlišť v Německu v devadesátých letech minulého století. Německé obyvatelstvo začalo panelové domy hromadně opouštět, výsledkem byla demolice asi 350 tisíc bytů. V tehdejší době stavební firmy poprvé řešily otázku, co dělat s tak velkým množstvím betonového odpadu. Částečně byly prefabrikáty použity na výstavbu rodinných domů v okolí Berlína či Chotěbuzi, o které byl vysoký zájem, toto řešení se však vyplatilo pouze do 300 kilometrů od místa demolice.

Betonový odpad lze recyklovat dvěma způsoby – jako rozdrčené kamenivo nebo jako celé stavební prvky. Znovuvyužití celých dílců po skončení životnosti konstrukce předpokládá vysokou kvalitu prefabrikované výroby, ochranu dílců před vnějšími vlivy po celou dobu životnosti konstrukce a pečlivý návrh spojovacích prvků. Například u stěnových prefabrikovaných panelů spočívá recyklace v odstranění povrchových úprav, rozrušení záливkového betonu nižší pevnosti a uvolnění spojů, případně odstranění záливkové výztuže. Spojovací prvky jsou předem zabetonované ocelové smyčky nebo novější systém zaklapávacích zámků. Tento sestává z části se zámkem a z kotevního protikusů, spojených pomocí imbusového klíče. Betonovou záливkou je vyplněna přes připravený prostor pouze zámková část spoje, z důvodu menšího množství stykového betonu je tedy rozpojení tohoto systému snazší než u tradičních ocelových smyček vyžadujících průběžné zabetonování po celé délce stěnových panelů. Příklad zámkového systému je na obrázku č. 3 [13].



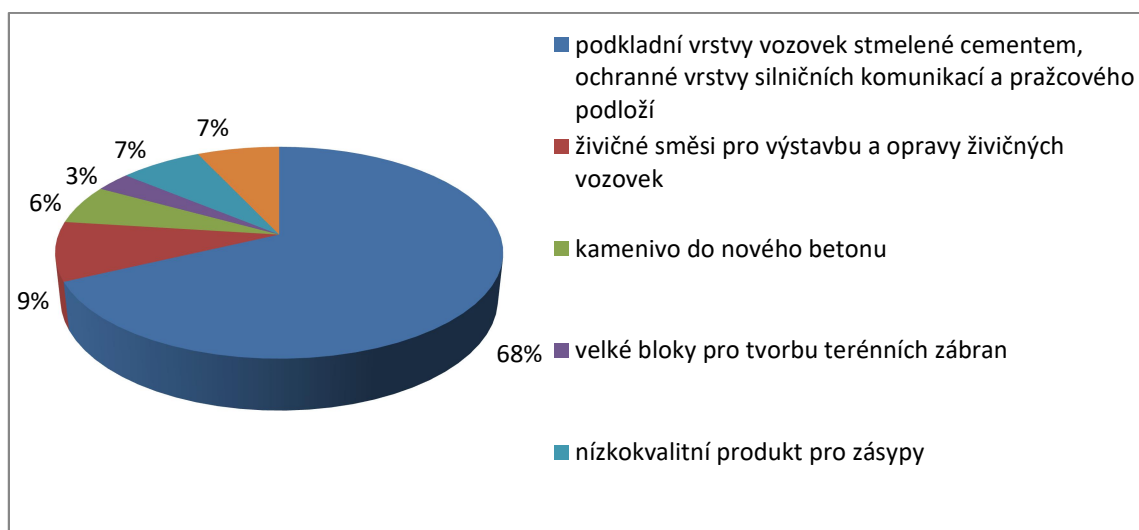
Obrázek č. 3 Spojka panelů TENLOC

Znovuvyužití prefabrikovaných stropních dílců spočívá v odstranění souvrství podlah, povrchových úprav a rozrušení záливkového betonu a záливkových výztuží. U skeletového systému je recyklace nejvhodnější díky možnosti použití suchých styků

Recyklace betonu: Teoretická část

průvlaků a sloupů. Suché styky s případným pryžovým ložiskem (šroubované, svařované) bez mokrého procesu betonování zálivky se mnohem jednodušeji rozpojí a demontáž nepoškodí prefabrikovaný dílec.

Recyklovaný beton v podobě drceného kameniva má v současnosti mnoho využití, kamenivo do nového betonu v České republice tvoří šest procent celkového objemu [1], viz obrázek č. 4. Menší frakce jsou vhodné do betonových směsí pro podkladní betony, komunikace a chodníky, větší frakce najdou využití v základových konstrukcích.



Obrázek č. 4 Graf využití recyklovaného betonu

U recyklace čerstvého nepoužitého betonu se uplatňuje tzv. bezodpadová technologie betonu. Při výplachu automíchačů a mytí míchaček vznikají 2 – 4% zbytků betonu, které lze recyklovat zpět do výroby. Kamenivo a cementový kal se záměsovou vodou jsou rozplavením separovány a obě složky jsou znovu použity, jedná se tedy o stoprocentní recyklaci. I přesto, že cementový kal může negativně ovlivnit vlastnosti betonu (pevnost, smrštění, tvorba výkvětů) je z hlediska životního prostředí lepší volbou kal v malém množství recyklovat, než jej ukládat na skládku nebo vypouštět do kanalizace. Současně znamená pro výrobce betonu finanční úsporu.

První druh technického řešení recyklace čerstvého betonu pracuje na principu bubnu, ve kterém dochází vymývací vodou k vyplavování neztvrdlého betonu. Buben může být buď pevný s rotujícími lopatkami, nebo otočný se spirálou. Druhé řešení je šnekový systém, kde k separaci hrubozrnné frakce slouží šikmo uložená rotující šnekovnice, která vynáší šterkopískovou fázi z prostoru recyklace. Kamenivo je

Recyklace betonu: Teoretická část

z recyklačních zařízení vysypáno vedle stroje, kapalná fáze uložena do usazovacích nádrží, kde je čištěna. Příklad bubnového a šnekového recyklačního zařízení je na obr. č. 5 [14].



Obrázek č. 5 Příklad bubnového (vlevo) a šnekového recyklačního zařízení

1.5 Výroba betonových recyklátů

Rozsah recyklace se ve světě různí dle společenských a ekonomických aspektů dané země. Smíchání různých druhů S & D odpadu znamená nezvratné znehodnocení, které znemožňuje použití recyklátu jako kameniva do betonu. Třídění a zpracování probíhá v tzv. recyklačním středisku. Proto je pro získání vysoké kvality recyklátu nutné stavební suť pečlivě třídít. Nejvyšší kvality lze dosáhnout tříděním přímo v místě vzniku odpadu, z časových důvodů však často dochází k rychlé demolici, ke smíchání odpadů a následnému třídění mimo pozemek demolovaného objektu – typicky u výrobce recyklátu, což je méně efektivní a dražší. Při třídění během demoličních prací je účelné klást důraz na:

- a) oddělení kontaminovaného a nekontaminovaného materiálu
- b) oddělení cizorodého materiálu (např. dřevo, lepenka, sádkarton, plast, kovy aj.) a minerální suti určené k recyklaci
- c) roztřídění minerální suti alespoň na základní druhy: cihelná suť, betonová suť, živičná suť a výkopová zemina

Technologie zpracování minerálních sutí má zásadní vliv na kvalitu produkovaných recyklátů. Hlavními kroky recyklace betonových odpadů jsou tradičně předtřídění s oddělením cizorodých látek, drcení a následné odloučení cizorodých látek a výztuže a třídění výsledného produktu na různé frakce, viz obrázek č. 6 [10]. V praxi se však dají většinou koupit pouze široké frakce např. 0/16 mm nebo 0/32 mm. Po třídění může následovat ještě sekundární drcení a třídění. V budoucnu by k výše uvedenému měl přibýt i další technologický krok – separace prachových a lehkých částic, případně praní kameniva. Tato činnost souvisí s nutností oddělit z povrchu kameniva cementový prach, který zhoršuje jeho vlastnosti. Předpokládá se, že v rámci budoucího certifikování recyklovaných produktů bude i u nás přítomnost této funkce nezbytností.



Obrázek č. 6 Tři základní technologické operace recyklace stavebních materiálů

Betonová drť se dá zpracovat celkem třemi způsoby [2]:

1) Recyklace pomocí zahřátí drceného betonu

Tento způsob má za cíl dosáhnout výsledného produktu blízcího se svými vlastnostmi co nejvíce přírodnímu kamenivu. Jde o co nejdokonalejší odstranění povrchového cementového prachu, který zhoršuje vlastnosti kameniva. Ve speciální peci se recyklát zahřeje na teplotu 300-500 °C, čímž dojde k oddělení cementového prachu. Tento vedlejší produkt lze také použít v nově vzniklé betonové směsi jako náhradu, takto lze však nahradit maximálně deset procent cementu. Druhou možností je vrstvu cementu na povrchu obrousit. Výhodou tohoto způsobu je kamenivo s vlastnostmi blízcími se přírodnímu, nevýhodou je vysoká energetická náročnost procesu. Využití části cementového prachu však může tyto poměrně vysoké náklady snížit.

2) Recyklace S & D odpadu s důkladným tříděním

Tento způsob spočívá pouze v šetrném mechanickém postupu. Čelistovým drtičem je recyklát rozdrčen a magnetem zbaven všech zbylých ocelových částí, především konstrukční výztuže. Po dalším drcení jsou odfouknuty jemné částice, např. plasty. Následuje další drcení čelistovým či odrazovým drtičem a frakční třídění pomocí síťového rozboru. Nižší energetická náročnost tohoto postupu je vykoupena nejistými mechanickými vlastnostmi betonu kvůli residuálnímu cementovému prachu. Takto vzniklý beton je tedy spíše vhodný na konstrukce bez vysokých nároků na pevnost, trvanlivost a mechanické vlastnosti.

3) Recyklace S & D odpadu se zjednodušeným tříděním

Tento postup spočívá pouze v základním roztřídění recyklátu, podrcení a rozdělení do jednotlivých frakcí dle využití. Je velmi rychlý a finančně nenákladný, avšak nezaručuje příliš stálé vlastnosti výsledného produktu. Takto vyrobené kamenivo je používáno především do zásypů, násypů a podsypů.

1.6 Recyklační linky

Recyklační linky jsou zařízením recyklačních středisek. Dělí se podle svojí mobility – na mobilní, semimobilní a stacionární. Celková roční kapacita linek v České republice je asi 7 500 000 tun, tj. více než o 50 % vyšší, než je produkce této komodity [10]. Recyklační firmy používají mobilní drtiče a třídiče i k zakázkovému drcení kameniva v lomech a třídění materiálu v pískovnách proto, aby využily svá zařízení co nejvíce.

1.6.1 Stacionární recyklační linky

Tento typ linek je nepohyblivý, jejich roční kapacita několik set tisíc tun převyšuje možnosti mobilních linek. Linky jsou realizovány u velkých aglomerací pro minimalizaci dojezdové vzdálenosti. Efektivita je nejvyšší při vysokém výkonu linky (200 – 1000 t/h). Součástí těchto linek jsou drtiče, třídiče, magnetické separátory a někdy i odlučovače lehkých částic. Produktem jsou vysoce kvalitní recykláty, pro jednotlivé frakce jsou budovány samostatné zásobníky. V zemích EU představují přibližně 40 % všech recyklačních linek [15].

1.6.2 Mobilní recyklační linky

Tyto linky jsou používány přímo v místě demolice, ekonomicky se jedná o výhodný způsob, pokud množství S & D odpadu převyšuje 10 000 tun. Efektivně zpracovávají i malé množství materiálu, od 30 tun za hodinu. V praxi provozovatel často provozuje vícero recyklačních center, kam je několikrát do roka převezena mobilní recyklační linka, která za krátkou dobu zpracuje nahromaděné odpady. Tento systém je ekonomicky výhodnější než vlastnit a provozovat více stacionárních linek.

K provozování mobilní recyklační linky je až na výjimky potřeba dle zákona o odpadech platný souhlas krajského úřadu. Při používání linky na více stanovištích provozovatel může požádat o souhlasy na jednotlivá stanoviště nebo na celé území daného kraje. První způsob se vyplatí při používání linky ve své provozovně, druhý je praktičtější, pokud se linka používá na různých externích zakázkách.

Na mobilní recyklační linky se vztahuje i zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. Přestože řeší pouze určité stacionární zdroje, recyklační linky stavebních hmot s výkonem nad 25 m³/den nevyjímaje, musí jej dodržovat i linky mobilní, protože z hlediska tohoto zákona je i mobilní linka stacionárním zdrojem. Dle zákona o ovzduší

je nutné požádat o další povolení k provozu, opět buď na konkrétní lokalitu, nebo na celý kraj. Nejednotný výklad zákona způsobuje problémy obzvláště u povinnosti informovat před každým zahájením provozu ČIŽP a obecní úřad příslušné obce. V některých krajích postačuje informace o zahájení provozu, v jiných musí být provoz odsouhlasen, popřípadě projednán se čtrnáctidenním předstihem, což může být z provozního hlediska problém. Existují také nejasnosti ohledně vypracování odborného posudku a rozptylové studie. Ze zákona není zřejmé, zda-li musí být dokumenty vypracovány zvláště pro všechny kraje, ve kterých je linka provozována, a každý kraj si zákon vykládá jiným způsobem.

1.6.3 Zařízení recyklačních linek

V ČR je na rozdíl od EU více než 90 % všech materiálů recyklováno mobilními drtiči a třidiči [12]. Tyto prošly za posledních patnáct let intenzivním vývojem. Z počátku se jednalo o velmi rozměrné stroje, umístované na přívěsy nákladních vozidel. Menší stroje (drtiče) byly převáženy v kontejnerech, do nichž byly instalovány. Stroje však nebyly samohybné a neumožňovaly flexibilní recyklaci v místě demolice, neustálé dovážení stavebního odpadu ke strojům výrazně bylo finančně velmi nevýhodné.

Po přelomu tisíciletí došlo k rozšíření pásových podvozků, byly použity i u recyklačních strojů – drtičů a třidičů. Stroje byly také dovybaveny dálkovým ovladačem, obvykle se nacházejí v nakladači nebo rypadle, které recyklační stroj zaváží.

Velká část výrobců recyklátu dnes používá tzv. recyklaci neúplnou technologií, z důvodu snížení provozních nákladů na minimum. Jedná se o provoz třídících zařízení bez drtiče nebo naopak provozování samotného drtiče bez předtřídění a následujícího třídění.

Využití samostatných třidičů je vhodné především pro recyklaci výkopové zeminy. Využití samostatných drtičů se objevuje u firem, které jej provozují pouze jako vedlejší činnost. I v případě, že je drtič vybaven předtříděčem, je kvalita produktu diskutabilní a lze ji použít pouze do zásypů. Nepoužívá se však do nosných vrstev komunikací. Jediný způsob plnohodnotného využití stavebního odpadu je tedy zpracování firmou s odpovídajícím zařízením a souhlasem příslušného krajského úřadu § 14 zákona 185/2001 Sb. (Zákon o odpadech). V České republice existuje těchto firem přibližně 40 a za poslední roky se kvalita jejich výrobků zlepšila natolik, že některé

získaly certifikát výrobku v souladu se zákonem 22/1997 Sb. Nedostatečná legislativa deklarující požadovanou kvalitu recyklátů však znamená, že tyto produkty stále nedosahují kvality certifikovaných recyklátů v zahraničí. Jedná se také o následek ekonomické náročnosti nákupu a provozu přídatných zařízení zlepšujících kvalitu výsledného produktu (odlučovače, vodní pračky).

Vývojové trendy posledních let směřují ke sloučení funkce drtící a třídící do jednoho stroje. Toto zařízení je kompaktní a náklady na jeho pořízení jsou nižší než při pořízení samostatného tříděče a drtiče, stejně tak provozní náklady. Mezi jeho nevýhody patří vysoká hmotnost a větší rozměry, přičemž obojí způsobuje problémy při dopravě po veřejných komunikacích. Dále není většinou možné využít jen samotného drtiče, pouze samotného tříděče, a to pomocí bypassu. Tyto multifunkční stroje disponují také funkcí změn v toku zpracovávaného stavebního materiálu. Například je užitečné neposílat podsítnou složku do odrazového drtiče, zamezit tak jeho opotřebení a propojit ji s materiálem z drtiče vycházejícím.

1.6.3.1 Drtiče

Pro zmenšení frakcí minerálních stavebních sutí se používá dvou druhů drtičů – čelistových (jednovzpěrné, dvouvzpěrné v menší míře) a odrazových. Další druhy jako kuželové a vertikální odrazové se v České republice vyskytují jen výjimečně.

Produkt odrazového drtiče má výhodu ve větší míře zdrobnění, ovšem obsahuje také velké množství jemných frakcí kameniva, které produkt čelistového drtiče téměř vůbec neobsahuje. Odrazový drtič produkuje kamenivo s výhodnějším tvarovým součinitelem, viz obrázek č. 7 [12].

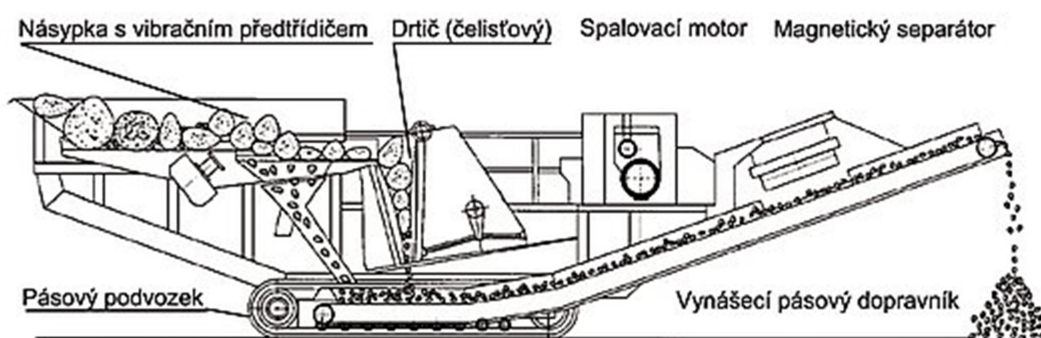


Obrázek č. 7 Typické tvary produktů po drcení čelistovým (vlevo) a odrazovým drtičem

Další nevýhodou čelistového drtiče je, že není vhodný k recyklaci armovaného betonu. Může dojít k ucpávání, nedokonalému odstranění magnetickým separátorem

nebo v případě rozměrné výztuže (ocelové nosníky, kolejnice) k značnému poškození. U odrazového drtiče není toto riziko tak vysoké. Dále nejsou čelistové drtiče vhodné k recyklaci asfaltu – dochází k jejich zalepení, další problémy jsou známy u betonových prvků tvaru tenkých desek (betonové stěny, panely) – dochází k nedostatečnému zdrobnění. Tento problém částečně řeší zaplnění drtící komory na 70 až 80 %.

Výhodou čelistových drtičů jsou nízké provozní náklady a životnost čelistí, která podstatně převyšuje životnost prvků odrazového drtiče – odrazových lišt a odrazových desek. Mezi další výhody patří malá hlučnost a prašnost, což může být rozhodujícím faktorem u mobilních recyklačních linek, které jsou v provozu v místě demolice, v blízkosti zástavby. Schéma čelistového drtiče je vidět na obrázku č. 8.



Obrázek č. 8 Schéma mobilního čelistového drtiče s pásovým podvozkem

Odrazové lišty v odrazových drtičích mají životnost maximálně 15 000 tun zpracované suti, v případě tvrdších materiálů (železobeton) však této hranice zdaleka nedosáhnou. A to vše i přesto, že lišty umožňují otáčení, takže je lze maximálně materiálově využít. Výměna lišt je nákladná a představuje dlouhou technologickou přestávku, dle typu lišty od 45 minut do 5 hodin [12]. Stejnou nebo i delší dobu trvá i otočení lišt.

Lze tedy říci, že i přes horší tvarové vlastnosti recyklátu je použití čelistového drtiče opodstatněno řadou výhod. Nejedná se však o recyklaci v pravém slova smyslu, protože recyklovaný materiál je povětšinou znehodnocován a použit pro podřadné aplikace, tzv. Down-cycling – recyklace sestupného typu, což odpovídá způsobu recyklace 2) a 3) v kapitole 1.5. Opakem je pak Up-cycling, recyklace vzestupného typu, která je náročnější na energii a produkuje materiál se stejnými nebo lepšími vlastnostmi, což odpovídá způsobu 1) v kapitole 1.5.

1.6.3.2 Třídíče

Mezi používané typy třídíčů patří rezonanční, vibrační a hrubotřídíče. Tato zařízení vynikají vysokou spolehlivostí a nízkými provozními náklady.

Rezonanční třídíče slouží ke konečnému třídění na 3 – 5 frakcí. Jsou vhodné jak pro suché třídění, tak pro třídění se sprchováním. Výhodou jsou nízké náklady na provoz a údržbu, spolehlivost, vysoký výkon, nenáročná obsluha. V třídíči nezávisle kmitají dvě plochy, horní a dolní, vzájemně proti sobě. Nosná konstrukce je opatřena pryžovými pružinami se společným rámem. Jak již název napovídá, dochází zde k rezonanci obou oscilujících rámců. Produkt zachycují na ocelová síta nebo děrované plechy.

Vibrační třídíče slouží pro konečné roztrídění materiálu na 2 – 4 frakce za sucha nebo se sprchováním. Při rozběhu a vypnutí zařízení jsou nepříznivé rezonanční vlivy bržděny řídicím systémem stejnosměrného brždění. Vynikající vlastnosti zahrnují provozní spolehlivost a nízké náklady na provoz a údržbu.

Hrubotřídíče se používají pro sekundární třídění hrubozrnného materiálu na 2 – 3 frakce. Celé zařízení lze umístit na betonový základ příslušné únosnosti, přičemž nemusí být nijak kotveno. Opět patří k vysoce spolehlivým provozním zařízením. Pod hrubotřídíče se řadí i odhliňovací třídíče, které jsou určeny pro primární třídění, což značně zjednoduší práci primárnímu drtiči.

1.6.3.3 Separátory kovů

Z betonového odpadu je potřeba již v prvotní fázi odstranit kovové (železné a ocelové) konstrukční prvky, které by ztěžovaly průběh třídění a drcení. Vzhledem k poměrně vysoké výkupní ceně kovových odpadů je tato činnost výdělečná. Existují čtyři druhy separátorů kovů – magnetické bloky, závěsné separátory, bubnové separátory – magnetické válce a EC separátory.

Magnetické bloky jsou umístěny nad pásem. Z dočasných magnetů po odpojení železné předměty odpadnou, permanentní magnety jsou nezávislé na elektrické energii, což spoří náklady na separaci. Umístění magnetu volíme dle výšky vrstvy materiálu, jeho charakteru a šířky dopravní cesty, která by měla odpovídat šířce magnetického bloku. U suchého materiálu je odstranění železných předmětů jednodušší než u např. kameniva smíšeného s hlínou.

Nejčastěji používané jsou závěsné separátory. Okolo zavěšeného magnetu obíhá pás, který železný odpad odstraňuje kontinuálně. Železné předměty jsou přitahovány magnetickým polem, po dopravě na pásu mimo separační zónu opustí působení pole a automaticky odpadnou. U tohoto typu separátoru je důležité chlazení, jelikož studený elektromagnet je asi o 15 % výkonnější než zahřátý [15]. Chladicí látkou je většinou olej.

Bubnové separátory se uplatňují pro třídění železných odpadů velikosti centimetrů až mikrometrů. Principem je permanentní magnet uložený uvnitř nemagnetického rotačního bubnu se svislou podélnou osou. Neferomagnetický produkt není přitahován a padá válcem přímo dolů, železné části ulpívají na povrchu pláště bubnu a otáčením válce jsou odváděny mimo magnetické pole. Bubnové separátory se nejčastěji umísťují na konec pásového dopravníku.

Tzv. EC separátory slouží k separaci neželezných kovů, třídí všechny druhy kovů – hliník, měď, mosaz a pracují na základě vířivých proudů. Každý elektricky vodivý předmět je zmagnetizován elektrickým proudem, na omezenou dobu získají opačný magnetický pól než původní magnetické pole a jsou odpudivými silami odhozeny. Magnety jsou chemicky tvořeny neodymem, železem a borem.

1.7 Beton z recyklovaného kameniva

Experimenty bylo prokázáno, že při výrobě betonu lze úspěšně nahradit přírodní kamenivo kamenivem z recyklovaného S & D odpadu. Nevýhodou recyklovaného kameniva je jeho vysoká (až desetinásobná) nasákavost způsobená cementovým tmelem a prachem na povrchu. V závislosti na množství a kvalitě recyklátu má beton s recyklovaným kamenivem horší mechanické a deformační vlastnosti a je také ovlivněna jeho mrazuvzdornost a trvanlivost. Využití nalézá především v základových konstrukcích, vnitřních nenosných konstrukcích a podlahách. Nejvyšší kvality recyklátů a betonů s recyklovaným kamenivem na světě je dosahováno v Holandsku a Belgii.

1.7.1 Požadavky a vlastnosti recyklovaného kameniva do nového betonu

Evropská legislativa definuje požadované vlastnosti recyklovaného kameniva a možnosti jeho použití do betonu v rámci států EU. V některých státech jako Belgie, Německo a Nizozemí existují normy upravující tyto požadavky pro potřeby daného regionu, z důvodu rozdílných vlastností recyklátů a demoličních postupů. V ČR se této problematice věnuje norma ČSN EN 12620+A1, která popisuje zkoušky přírodního kameniva do betonu. Stejně zkoušky jsou používány i pro recyklované kamenivo. Zkoušky kameniva zjišťují vlastnosti geometrické, fyzikální a chemické. Mezi zkoušky geometrických vlastností patří prosévací zkouška, ze které je odvozena čára zrnitosti, podíl jemných částic a modul jemnosti a výpočet tvarového indexu. Mezi fyzikální vlastnosti patří odolnost proti drcení a otěru, mrazuvzdornost, hustota matrice, objemová hmotnost a, v tomto případě nejdůležitější, nasákavost. Chemické vlastnosti představují obsah alkálií, rozpustných sulfidů a u recyklátů je zkoumán také obsah ostatních stavebních materiálů, tzv. identifikační test.

Požadavky na vlastnosti recyklovaného kameniva a typy betonu, do kterého jej lze použít jsou uvedeny v ČSN EN 206-1/Z3. V zemích EU se mírně liší typy kameniva: německá norma uvádí čtyři, portugalská tři a belgická a nizozemská dva. Všechny se však shodují v požadavku na nejkvalitnější typ 1, musí obsahovat minimálně 90 % betonové drti. Česká norma povoluje jako kamenivo do betonu pouze tento typ, navíc musí splňovat stupeň X0, tzn. nemusí odolávat vlivu prostředí. Německá norma, která je předlohou české, povoluje u těchto konstrukcí nahradit kamenivem typu 1 až 45 % přírodního kameniva. Typy s menším obsahem kameniva

Recyklace betonu: Teoretická část

obsahující více suti, např. keramiky, jsou používány pro méně náročné účely. Obsah ostatních materiálů vyskytujících se v demolovaném objektu jako sklo, dřevo, plast a papír může být maximálně 1 %. Požadavky, které evropské normy u recyklátů zmírňují a které by byly dle nároků na přírodní kamenivo nesplnitelné, jsou shrnuty v tabulce č. 4 [16].

Tabulka č. 4 Vybrané požadavky na vlastnosti recyklovaného kameniva pro použití do betonu ve státech EU

| Vlastnosti | Belgie | Německo | Nizozemsko | Portugalsko | Česká republika |
|--|-----------------|-------------|------------|-------------|-----------------|
| Složení [% hmotnosti drceného betonu] | ≥ 95 | ≥ 90 | ≥ 95 | ≥ 95 | ≥ 95 |
| Objemová hmotnost [kg/m^3] | ≥ 2200 | ≥ 2000 | - | ≥ 2200 | ≥ 2000 |
| Nasákavost [%] | $\leq 10 \pm 2$ | ≤ 10 | - | ≤ 7 | ≤ 10 |
| Obsah jemných částic [%] | 1,5 | - | 1,0 | 4,0 | - |

- Složení recyklovaného kameniva

Vzorek kameniva je podroben identifikačnímu testu, při kterém se materiál rozdělí do šesti skupin – beton a kamenivo, slinutá keramika, vápencový pískovec, ostatní minerální podíly, asphalt a ostatní (sklo, keramika). Podle hmotnostního zastoupení těchto druhů hmot se určí typ kameniva, představuje jeho „kvalitu“.

- Zastoupení frakcí v kamenivu – čára zrnitosti

Z prosévací zkoušky dle EN 933-1 lze určit jednotlivé frakce kameniva, standartní laboratorní sada má dvanáct sít velikostí 0,063 mm, 0,125 mm, 0,250 mm, 0,500 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 125 mm, 63 mm. Z výsledku lze následně vykreslit kumulativní křivku propadů – čáru zrnitosti. Čára zrnitosti recyklátu typicky obsahuje menší podíl jemné frakce než kamenivo přírodní, což je vzhledem k vysoké nasákavosti jemných frakcí výhodou. Obsah jemných částic se dále

počítá jako poměr částic menších než 0,063 mm, tj. které propadly všemi síty, k celkové hmotnosti navážky.

Modul zrnitosti (někdy také označován jako modul jemnosti) je způsobem vyjádření zrnitosti kameniva, který hodnotí v rámci dané frakce zrnitost kameniva jediným číslem charakterizujícím jeho celkovou jemnost či hrubost. Modul zrnitosti je definován jako setina součtu všech celkových zbytků v procentech nalezených na určité sadě sít (většinou se jedná o síta velikosti 0,125 mm, 0,250 mm, 0,500 mm, 1 mm, 2 mm a 4 mm). Maximální hodnota modulu je 6, čím je modul zrnitosti vyšší, tím hrubší je kamenivo.

- Objemová hmotnost

Tato základní veličina se zjišťuje pomocí pyknometrické metody, s jejím použitím se stanoví objem. Lze porovnávat objemovou hmotnost v plně nasyceném stavu a v dokonale suchém stavu. V prvním případě se kamenivo během 24 hodin plně nasatí vodou, v některých případech je potřeba jej namáčet déle. V druhém případě je vysušeno v sušárně za teploty 100 ± 5 °C. Při srovnání s přírodním kamenivem jsou oba druhy objemové hmotnosti recyklátu nižší přibližně o 15 – 20 %, tento úbytek je způsoben cementovým tmelem ulpělým na povrchu zrn [16].

- Nasákavost

Tato vlastnost se zjišťuje také pyknometrickou metodou, stejným postupem jako objemová hmotnost. Rovná se poměru plně nasyceného a vysušeného kameniva. Hodnota nasákavosti se u přírodního kameniva pohybuje v rozmezí 1 – 4 %, recyklované kamenivo má naproti tomu vyšší pórovitost způsobenou cementovým tmelem, což vysvětluje ještě vyšší nasákavost jeho jemných frakcí. Poměr nasákavostí může být až desetinásobný, takto vysoké hodnoty jsou však měřeny jen u jemné frakce, např. 0/4. Je to právě nasákavost, která zvýšeným množstvím vody nejvíce negativně ovlivňuje vlastnosti recyklátu, což vede k menším pevnostem a následně větším průřezům konstrukčních prvků.

- Kontaminující látky

Pro aplikaci je potřeba z recyklátu odstranit kontaminující látky, které mohou představovat stěžejní problém. Jedná se o sádrovec, složku omítkovin, u kterého hrozí reakce se složkami betonu, tvorbě ettringitu a taumasitu a porušení betonu v důsledku

nárůstu objemu. Rozpínání má za následek také oxid manganatý, který se může objevit u konstrukcí se žáruvzdornými cihlami. Pokud kamenivo obsahuje papír, dřevo, bitumeny, sklo nebo hliník mají tyto látky za důsledek snížení pevnosti. Při obsahu posypových solí hrozí alkalicko-křemičitá reakce, která v kombinaci s reaktivním kamenivem způsobuje trhliny v důsledku objemových změn [12].

1.7.2 Vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem

Obecně lze říci, že přidání recyklátu do betonové směsi zhoršuje vlastnosti betonu a způsobuje větší rozptyl experimentálně naměřených hodnot vlastností betonu. Studiemi bylo prokázáno, že mechanické vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem jsou horší než u použití přírodního kameniva, u použití nekvalitního recyklátu je pevnost ještě menší. Pevnost v tlaku klesá až o 45 %, účinný modul pružnosti až o 52 % [6]. V průměru klesá pevnost v tlaku na 80 – 90 % [17]. K většímu poklesu pevnosti v tlaku dochází u betonů vyšší pevnostní třídy. Beton má dále nižší trvanlivost, vyšší součinitel dotvarování (až o 50 %) a projevy smršťování se zvyšují o 20 – 40 % [1].

Nasákavost a objemová hmotnost betonu závisí na vlastnostech recyklátu a na míře nahrazení přírodního kameniva, která se může pohybovat od 0 do 100 %. Nasákavost betonu je přímo úměrná nasákavosti recyklátu a míře nahrazení kameniva, může být až dvakrát vyšší než u standartního betonu. U použití vysoce kvalitního laboratorně vyrobeného recyklátu však nedochází k tak výraznému zhoršení vlastností betonu, což platí až do míry nahrazení 70 %.

Jemnou frakci recyklátu lze nahradit nejen přírodní písek, ale i část cementu. Do míry nahrazení 5 % cementu tak není ovlivněna ani zpracovatelnost, ani nedochází ke zhoršení mechanických a deformačních vlastností. Při nahrazení písku lze bez zhoršení vlastností zaměnit za jemnou frakci až 30 % [6]. I přes zhoršené vlastnosti betonu s obsahem recyklátu jej lze použít do vysoce kvalitních typů betonu jako vysokopevnostní, vysokohodnotné a samozhutnitelné [17].

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Princip experimentu

Cílem experimentální části bylo porovnat mechanické a deformační vlastnosti dvou typů vzorků betonu – betonu s přírodním kamenivem a betonu s recyklovaným kamenivem. Pro účely experimentu byly vytvořeny dva druhy vzorků tvaru válce, viz tabulka č. 5, systém číslování jednotlivých vzorků je patrný z tabulky č. 6.

Tabulka č. 5 Geometrické charakteristiky použitých vzorků a počty vzorků od každého druhu betonu

| | Vzorek č. 1 | Vzorek č. 2 |
|--|-------------|-------------|
| d – průměr [mm] | 65 | 100 |
| v – výška [mm] | 160 | 200 |
| V – objem [dm ³] | 0,531 | 1,571 |
| počet vzorků [ks] | 9 | 6 |
| V _C – celkový objem všech vzorků [dm ³] | 14,205 | |

Tabulka č. 6 Číslování vzorků

| | Vzorky č. 1 | Vzorky č. 2 |
|--------------------------------|--|---|
| Beton s přírodním kamenivem | 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 | 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 |
| Beton s recyklovaným kamenivem | <u>1.1</u> , <u>1.2</u> , <u>1.3</u> , <u>1.4</u> , <u>1.5</u> , <u>1.6</u> , <u>1.7</u> , <u>1.8</u> , <u>1.9</u> | <u>2.1</u> , <u>2.2</u> , <u>2.3</u> , <u>2.4</u> , <u>2.5</u> , <u>2.6</u> |

Celý postup byl současně proveden pro obě sady vzorků. Byla testována pevnost v tlaku ve stáří 18 – 22 hodin na vzorcích č. 1 a ve stáří 28 dní na vzorcích č. 2. Dále byly zkouškou dotvarování testovány vzorky č. 1 ve stáří 14 dní, hodnoty byly porovnány se stavem ve stáří 18 – 22 hodin. Průběh experimentu lze shrnout následujícími třemi výrobními cykly:

1. cyklus

- Den 1

Recyklace betonu: Experimentální část

Bylo vyrobeno šest vzorků č. 1 (1.1, 1.2, 1.3, 1.1, 1.2, 1.3) a šest vzorků č. 2 (2.1, 2.2, 2.3, 2.1, 2.2, 2.3). Všechny vzorky byly uloženy do neprodyšného obalu zajišťující stálou vlhkost. Čerstvě odbedněné vzorky 1. výrobního cyklu lze vidět na obrázku č. 9.



Obrázek č. 9 Čerstvě odbedněné vzorky č. 1 a 2 v 1. cyklu

- Den 2

Dva vzorky č. 1 (1.1, 1.2) byly podrobeny zkoušce válcové pevnosti v tlaku. Dva geometricky vhodné vzorky č. 1 (1.2, 1.1) byly ponechány na 13 dní v zařízení testujícím dotvarování betonu. Vzorky č. 1.3 a 1.3 představovaly rezervu. Díky zjištěné hodnotě pevnosti v tlaku jednodenního betonu byla při testování dotvarování nastavena vhodná zatěžovací hodnota, přibližně 50 % hodnoty válcové pevnosti v tlaku vzorku s menší naměřenou pevností ze vzorků 1.1 a 1.2.

2. cyklus

- Den 15

Zkouška dotvarování na vzorcích 1.2 a 1.1 byla po 13 dnech vyhodnocena. Dále bylo vyrobeno dalších šest vzorků č. 1 (1.4, 1.5, 1.6, 1.4, 1.5, 1.6) a šest vzorků č. 2 (2.4, 2.5, 2.6, 2.4, 2.5, 2.6). Formy byly opět uloženy do prostředí se stálou hodnotou vzdušné vlhkosti.

- Den 16

Dva vzorky č. 1 (1.6, 1.6) byly opět podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku. Další vzorky č. 1 (1.4, 1.5) byl ponechány na 13 dní v zařízení testujícím dotvarování betonu, byla použita stejná zatěžovací hodnota jako v předchozím případě.

3. cyklus

- Den 29

Byly vyhodnoceny vzorky 1.4 a 1.5, testované na hodnoty dotvarování. Dále byly po 28 dnech od výroby testovány vzorky 2.1, 2.2, 2.3, 2.1, 2.2 a 2.3 zkouškou pevnosti v tlaku. Bylo vyrobeno posledních šest zkušebních vzorků č. 1 (1.7, 1.8, 1.9, 1.7, 1.8, 1.9).

- Den 30

Dva vzorky č. 1 (1.9, 1.8) byly opět podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku a další vzorky č. 1 (1.7, 1.9) byly ponechány na 13 dní v zařízení testujícím dotvarování betonu, se stejnou zátěží jako v předchozích případech.

- Den 43

Byly vyhodnoceny vzorky 1.7 a 1.9, uložené v zařízení testující hodnoty dotvarování. Dále byly po 28 dnech od výroby testovány vzorky 2.4, 2.5, 2.6, 2.4, 2.5, a 2.6 zkouškou válcové pevnosti betonu v tlaku.

Celkově tedy byly v průběhu trvání experimentu provedeny 3 série zkoušek dotvarování na vzorcích č. 1, 3 série zkoušek tlakové pevnosti na vzorcích č. 1 a 2 série zkoušek tlakové pevnosti na vzorcích č. 2.

Menší válce byly vyrobeny pro zkoušku dotvarování, zatíženy po cca 1 dni a měřeny po dalších 13 dnech. V každé sérii bylo jedno těleso použito pro stanovení válcové pevnosti v tlaku (pro stanovení zatěžovací síly pro zkoušku dotvarování), jedno na zkoušku dotvarování a poslední představovalo rezervu.

Větší válce sloužily pouze pro stanovení válcové pevnosti v tlaku ve třech cyklech, vždy po 28 dnech.

2.2 Prosévací zkouška recyklovaného kameniva

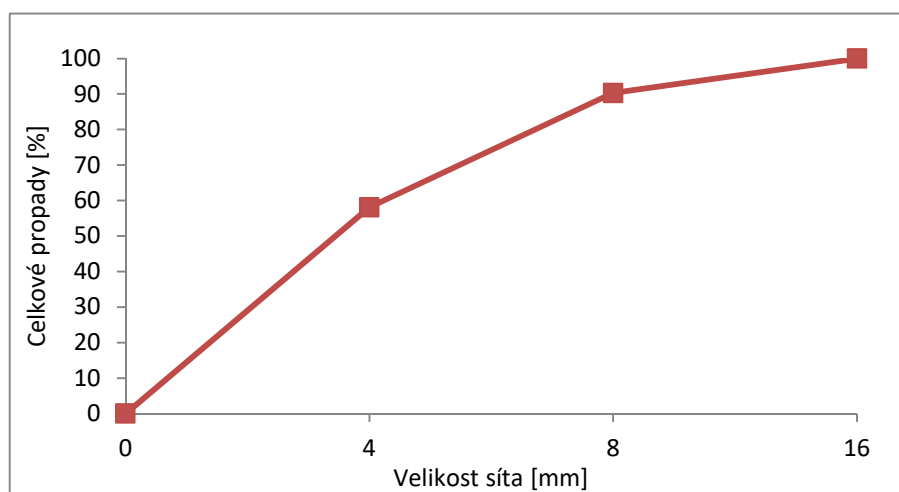
Dle informací výrobce recyklátu, firmy WEKO, s.r.o., část materiálu pochází z demolice betonové konstrukce runway Letiště Václava Havla v Praze a část z neznámého zdroje. Vzhledem ke kontaminujícím látkám obsaženým v materiálu, viz obrázek č. 12, se pravděpodobně jednalo o demolici panelového domu.

V souladu s kapitolou 1.7.1 byla provedena prosévací zkouška recyklovaného kameniva, hmotnost zkušební navážky byla 57,5 kg. Výsledky prosévací zkoušky zaznamenává tabulka č. 7.

Tabulka č. 7 Výsledky prosévací zkoušky recyklovaného kameniva

| Velikost síta [mm] | Dílčí zbytky | | Celkové zbytky [%] | Celkové propady [%] |
|-----------------------|--------------|------|-----------------------|------------------------|
| | [g] | [%] | | |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 8 | 5 600 | 9,7 | 9,7 | 90,3 |
| 4 | 18 500 | 32,2 | 41,9 | 58,1 |
| 0 | 33 400 | 58,1 | 100 | 0 |
| Součet | 57 500 | 100 | | |
| Modul zrnitosti | | | 1,516 | |

Jak je vidět z nízké hodnoty modulu zrnitosti, materiál byl převážně jemné frakce. Grafické vyjádření zrnitosti nabízí čára zrnitosti na obrázku č. 10.



Obrázek č. 10 Čára zrnitosti – grafické vyjádření výsledků prosévací zkoušky recyklovaného kameniva

Recyklace betonu: Experimentální část

V části materiálu se v průběhu prosívání objevovaly slepence, které pravděpodobně vznikly při nesprávném skladování recyklátu při nadměrné vlhkosti. Tyto musely být manuálně rozdrceny a roztrženy. Průběh prosévací zkoušky a její konečný produkt, rozdělení na tři různé frakce, je vidět na obrázku č. 11.



Obrázek č. 11 Průběh prosévací zkoušky recyklovaného kameniva a výsledný produkt – tři různé frakce kameniva

Byl proveden identifikační test materiálu. Recyklát obsahoval pouze stopové množství kontaminujících látek, mezi nimi např. cihelné zdivo, obklady a dlaždice, dřevo, třísky, obalový materiál a ostatní látky organického původu. Kontaminující látky jsou vidět na obrázku č. 12.



Obrázek č. 12 Kontaminující látky v recyklátu – identifikační test

2.3 Návrh a příprava betonových směsí

Pro porovnání obou typů betonu byla použita betonová směs z katalogu Experimentálního centra ČVUT. Podle dostupného množství materiálu byla nahrazena část přírodního kameniva stejnou hmotností recyklátu, konkrétně bylo nahrazeno 70 % frakce 0/4 a 4/8 a 40 % frakce 8/16. Množství na 1 kubický metr je vidět v tabulce č. 8. Byl použit tekutý plastifikátor Glenium Ace 442. Z důvodu horší zpracovatelnosti směsi BRK bylo množství plastifikátoru oproti BPK navýšeno na dvojnásobné množství.

Tabulka č. 8 Použitá betonová směs, množství složek na 1 kubický metr

| | Beton s přírodním kamenivem | Beton s recyklovaným kamenivem |
|----------------------------------|-----------------------------------|--|
| Procento nahrazení recyklátem | | 70 % frakce 0/4 a 4/8, 40 % frakce 8/16 |
| PK 0/4 mm [kg] | 800 | 240 |
| PK 4/8 mm [kg] | 100 | 30 |
| PK 8/16 mm [kg] | 776 | 466 |
| RK 0/4 mm [kg] | - | 560 |
| RK 4/8 mm [kg] | - | 70 |
| RK 8/16 mm [kg] | - | 310 |
| Cement CEM I 42,5 [kg] | 499 | 499 |
| Voda [kg] | 190 | 222 (+ 11,2 + 27,9 – saturace) |
| Plastifikátor [kg] | 4,1 | 8,2 |
| Vodní součinitel w/c | 0,381 | 0,415 |
| Vodní součinitel w/c' | | 0,523 |

Recyklované kamenivo frakce 4/8 a 8/16 bylo před použitím dokonale nasáklé a poté ponechané 3 hodiny na suchu. Recyklované kamenivo frakce 4/8 nasáknutím zvýšilo svou hmotnost o 16 % hm., frakce 8/16 o 9 % hm. Hmotnost vody se tímto zvýšila o 11,2 kg a 27,9 kg na 1 metr krychlový betonové směsi, viz tabulka č. 8. Vodní součinitel w/c' bere v úvahu i toto množství záměsové vody. Bylo získáno kamenivo, které je pro experiment vhodné – nasáklé a povrchově suché kamenivo (NPSK). Pro dokonalou saturaci kameniva bylo ponecháno pod hladinou vody po dobu 24 hodin.

Přídavek vody nutný pro saturaci jemné frakce (0/4) recyklátu oproti betonu s přírodním kamenivem byl vypočítán na základě předpokladu hodnot nasákavosti a vlhkosti recyklovaného kameniva o frakci 0/4 mm. Byla předpokládána hodnota

Recyklace betonu: Experimentální část

nasákavosti recyklovaného kameniva 12 % hm. a hodnota vlhkosti 6,3 % hm. [6]. O toto množství byla navýšena dávka záměsové vody pro BRK oproti BPK.

$$W_{add} = 560 \cdot (0,12 - 0,063) = 32 \text{ kg}$$

Z důvodu vyšší nasákavosti RK se zvýšil vodní součinitel u BRK z hodnoty 0,381 na 0,523, tedy o 37 %. Vodní součinitel má vliv na pevnost, zpracovatelnost a pórovitost betonu.

2.4 Rozdíly v hmotnosti a struktuře betonu

Rozdíly mezi oběma typy betonových směsí spočívaly ve zpracovatelnosti směsi, v barvě vzorků, jejich struktuře a naměřených charakteristikách, viz kapitola 2.4 a 2.5. Jak je uvedeno v kapitole 1.7.1, recyklované kamenivo má nižší objemovou hmotnost o 15 – 22 %. Vzorky BRK tedy byly lehčí než vzorky BPK, průměrně o 6,72 % u vzorků č. 2, viz tabulka č. 9. Menší rozdíl v hodnotách hmotnosti je způsoben ostatními složkami směsi, které jsou pro oba typy betonu stejné a rozdíl objemových hmotností kameniv minimalizují. Tento závěr potvrzují i hmotnosti vzorků č. 1, viz příloha č. 1.

Tabulka č. 9 Rozdíly hmotností BPK a BRK demonstrované na vzorcích č. 2

| Číslo vzorků BPK | Hmotnost m [g] | Číslo vzorků BRK | Hmotnost m' [g] | Rozdíl hmotností m - m' [g] | Průměrný rozdíl hmotností m - m' [g] | Rozdíl hmotností m - m' [%] | Průměrný rozdíl hmotností m - m' [%] |
|------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 2.1 | 3725,57 | <u>2.1</u> | 3473,15 | 252,42 | 250,79 | 6,78 | 6,72 |
| 2.2 | 3700,21 | <u>2.2</u> | 3472,99 | 227,22 | | 6,14 | |
| 2.3 | 3730,08 | <u>2.3</u> | 3512,63 | 217,45 | | 5,83 | |
| 2.4 | 3745,90 | <u>2.4</u> | 3472,25 | 273,65 | | 7,31 | |
| 2.5 | 3742,55 | <u>2.5</u> | 3466,00 | 276,55 | | 7,39 | |
| 2.6 | 3730,85 | <u>2.6</u> | 3473,40 | 257,45 | | 6,90 | |

Směrodatná odchylka hmotnosti souboru BPK byla 14,8 g, u BRK 15,5 g.

Tabulka č. 10 Porovnání objemových hmotností BPK a BRK na vzorcích č. 2

| Číslo vzorků BPK | Objemová hmotnost m [g.cm ⁻³] | Číslo vzorků BRK | Objemová hmotnost m' [g.cm ⁻³] | Rozdíl objemových hmotností m - m' [g.cm ⁻³] | Průměrný rozdíl objemových hmotností m - m' [g.cm ⁻³] |
|------------------|---|------------------|--|--|---|
| 2.1 | 2,37 | <u>2.1</u> | 2,21 | 0,16 | 0,16 |
| 2.2 | 2,36 | <u>2.2</u> | 2,21 | 0,14 | |

Recyklace betonu: Experimentální část

| | | | | | |
|-----|------|------------|------|------|--|
| 2.3 | 2,37 | <u>2.3</u> | 2,24 | 0,14 | |
| 2.4 | 2,38 | <u>2.4</u> | 2,21 | 0,17 | |
| 2.5 | 2,38 | <u>2.5</u> | 2,21 | 0,18 | |
| 2.6 | 2,37 | <u>2.6</u> | 2,21 | 0,16 | |

Na tabulce č. 10 je vidět porovnání objemových hmotností obou druhů betonu. Průměrná objemová hmotnost u betonu s přírodním kamenivem byla $2,37 \text{ g/cm}^3$, u betonu s recyklovaným kamenivem $2,21 \text{ g/cm}^3$.

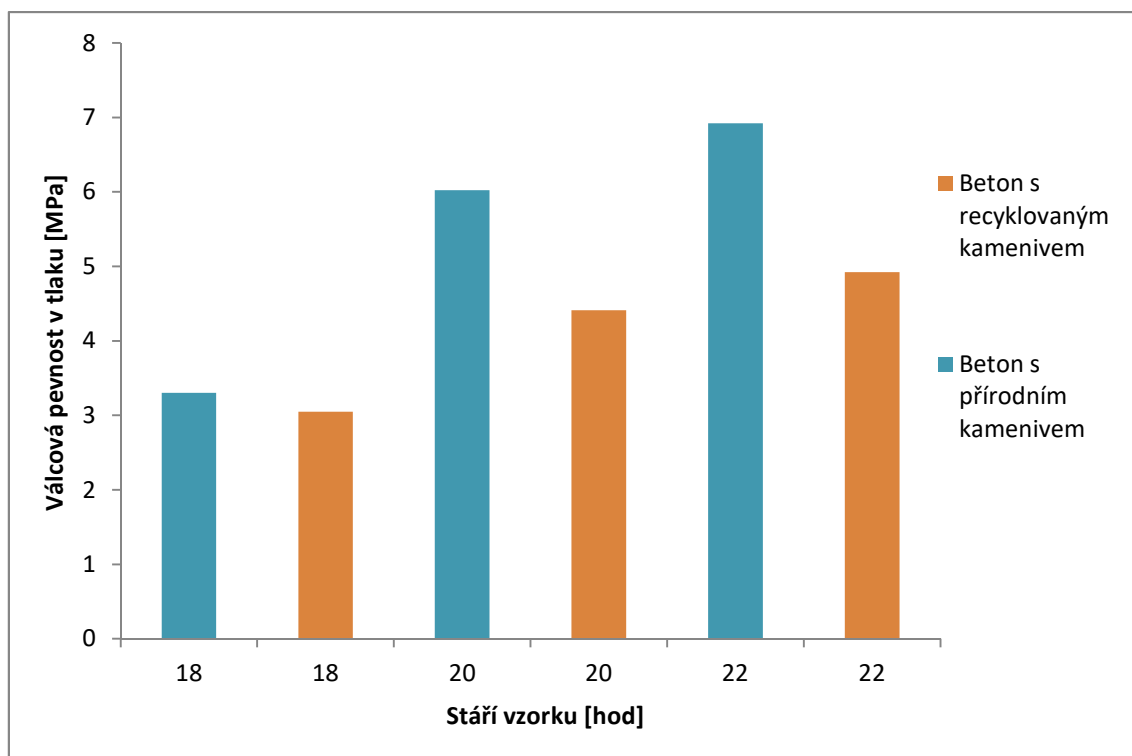
Rozdílné kamenivo způsobuje i jinou strukturu a barevnost, beton s recyklovaným kamenivem je tedy poznat na první pohled. Má méně homogenní, skvrnitou texturu a horní strany válců mají světlou, po dozrání betonu bílou barvu, viz obrázek č. 13.



Obrázek č. 13 Rozdíly ve struktuře a barevnosti BPK (vpravo a dole) a BRK

2.5 Zkouška válcové pevnosti v tlaku

Válcová pevnost byla zkoušena na obou typech vzorků. Vzorky č. 1 z prvního cyklu byly testovány ve stáří 20 hodin, druhý cyklus 18 hodin a třetí cyklus 22 hodin. Z výsledků na grafu na obrázku č. 14 je zřejmá závislost pevnosti na stáří betonu, patrný je dokonce rozdíl pouhých dvou hodin. Také je vidět, že s pokračující hydratací cementu se zvyšují rozdíly v pevnosti BPK a BRK. Průměrný rozdíl pevností byl 24 %, což je v souladu s teoretickým výzkumem v kapitole 1.7.2.



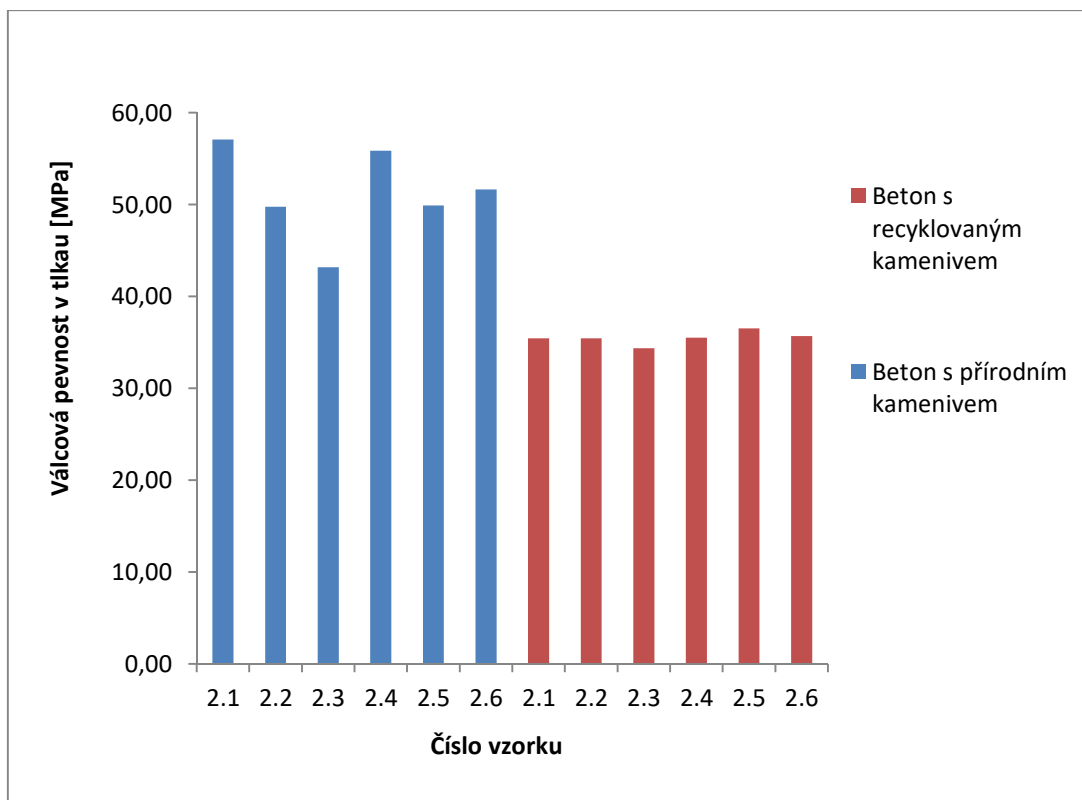
Obrázek č. 14 Graf válcové pevnosti v tlaku vzorků č. 1

Vzorky č. 2 byly testovány po 28 dnech, po tuto dobu byly uloženy v prostředí se stálou vlhkostí a teplotou přibližně 20 °C. Před zkouškou pevnosti v tlaku byly pomocí pasty z cementu a křemenného písku upraveny, tzv. zakončovány, jejich horní podstavy do roviny, tento způsob lze vidět na obrázku č. 15.



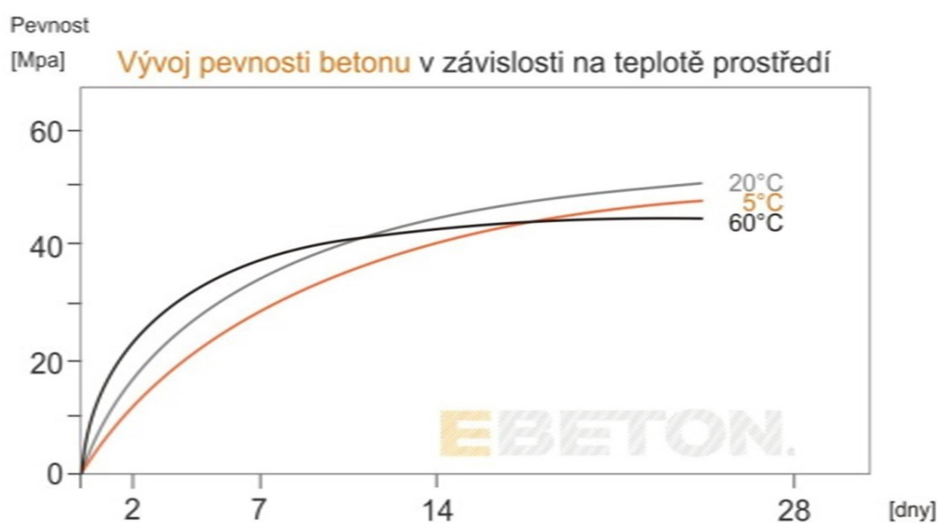
Obrázek č. 15 Zkouška válcové pevnosti vzorku č. 1 (stáří 20 hodin) a zakoncovaný vzorek č. 2 (stáří 28 dní)

Výsledky jednotlivých zkoušek zaznamenává sloupcový graf na obrázku č. 16. Zajímavým poznatkem je, že BRK vykazuje mnohem větší stálost výsledků, zatímco hodnoty vzorků BPK měly větší rozptyl, číselně byl rozdíl ve výsledcích až 13,92 MPa. Směrodatná odchylka souboru BPK byla 4,56 MPa, u BRK pouze 0,63 MPa. Průměrný rozdíl v pevnostech BRK oproti BPK byl u vzorků č. 2 31 %. Tyto výsledky také odpovídají kapitole 1.7.2. a vzhledem ke stáří vzorků mají vyšší vypovídací hodnotu než výsledky pevnosti vzorků č. 1. Beton s přírodním kamenivem odpovídal průměrně pevnostní třídě C50/60 (51,24 MPa), s recyklovaným kamenivem třídě C 35/45 (35,49 MPa).



Obrázek č. 16 Graf válcové pevnosti v tlaku vzorků č. 2

Výsledky všech vzorků jsou v souladu s typickou křivkou vývoje pevnosti betonu v závislosti na čase, která je zobrazena na obrázku č. 17 [18]. Odpovídá i konkrétní teplotní křivka pro 20 °C, další upřesnění křivky by spočívalo v druhu cementu (normální) a pevnostní třídě (42,5 MPa).



Obrázek č. 17 Vývoj pevnosti betonu v závislosti na teplotě prostředí

Recyklace betonu: Experimentální část

Byl pozorován rozdíl ve způsobu dosažení meze pevnosti u jednotlivých typů betonu. Zatímco u BPK došlo k drcení betonu klasickým, téměř nepozorovaným naprasknutím a postupným odpadáváním částí vzorku (viz obrázek č. 15), u druhého typu došlo ve 100 % případů k prudkému a náhlému puknutí celého vzorku s nebezpečně rychlým roztržením na velké množství částí na poměrně velkou vzdálenost. Takovýto způsob porušení se vyskytuje u vysokopevnostních betonů. U jednodenních vzorků však toto pozorováno nebylo. Pokusem tedy bylo dokázáno, že recyklované kamenivo způsobuje u vzorků stáří 28 dnů jiný způsob porušení.

2.6 Zkouška dotvarování

Objemové změny betonu lze rozdělit na dvě skupiny: změny na zatížení nezávislé – změna teploty, změna obsahu vody (vlhkosti), hydratace (smršťování) a změny na zatížení závislé – dotvarování. Všechny tyto změny jsou funkcí času, celkové přetvoření vzorku je součtem jednotlivých přetvoření:

$$\varepsilon_C(t) = \varepsilon_T(t) + \varepsilon_{CC}(t) + \varepsilon_{CS}(t) + \varepsilon_H(t)$$

kde $\varepsilon_{CS}(t)$ je přetvoření od kolísání teploty

$\varepsilon_{CC}(t)$ je přetvoření od dotvarování

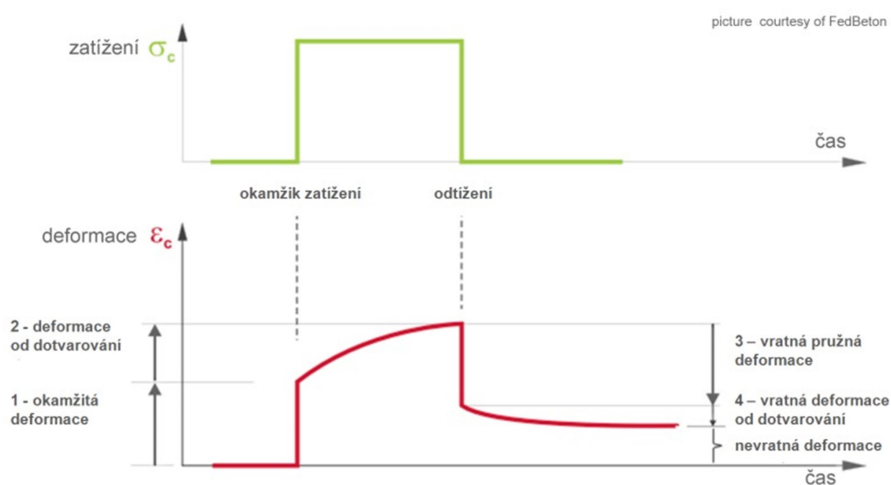
$\varepsilon_{CS}(t)$ je přetvoření od hydratace (smršťování)

$\varepsilon_H(t)$ je přetvoření od kolísání vlhkosti

Jelikož vzorky byly po celou dobu experimentu v prostředí se stálou vlhkostí a teplotou, uplatní se objemové změny od těchto vlivů pouze minimálně.

Smrštění spočívá v reakci cementových minerálů s volnými molekulami vody, které jsou v průběhu hydratace betonu přeměněny na dokonaleji uspořádanou hmotu cementového kamene. V důsledku tohoto jevu dochází k úbytku betonu.

Změny od zatížení lze rozdělit podle délky trvání zatížení na okamžitou deformaci a deformaci od dotvarování (dlouhodobé zatížení). Podle ochoty materiálu navrátit se do původní podoby pak na deformaci pružnou (vratnou) a plastickou (nevratnou), viz obrázek č. 18.



Obrázek č. 18 Princip dotvarování demonstrováný na grafech závislosti zatížení a deformace na času

Recyklace betonu: Experimentální část

Z molekulárního hlediska se jedná o změnu mikrostruktury cementového tmelu účinkem dlouhotrvajícího napětí v betonu. Molekuly vody, které nejsou v betonu chemicky vázané, jsou kapilárami vytlačovány k povrchu, kde se odpařují.

Velikost přetvoření od dotvarování závisí zejména na:

- složení betonové směsi – vyšší pórovitost zvětšuje účinky dotvarování
- vlivu prostředí – v suchém prostředí jsou přetvoření větší
- průřezu prvku – s klesajícím náhradním rozměrem průřezu (jeho plocha ku obvodu) přetvoření vzrůstají
- pevnost a stáří v okamžiku zatížení – starší a tedy i pevnější vzorek vykazuje menší přetvoření
- doba působení dlouhodobého zatížení – při delším zatížení je přetvoření větší

Podle hodnoty zatížení lze přetvoření rozdělit na:

- lineární – $\sigma_c \leq 0,45f_c$,
 - lze předpokládat, že deformace od dotvarování $\varepsilon_{CC}(\infty, t_0)$ je úměrná pružnému přetvoření materiálu

$$\varepsilon_{CC}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_C}$$

kde $\varphi(\infty, t_0)$ je součinitel dotvarování pro příslušné zatížení a dobu jeho trvání

- betonový prvek se chová jako méně tuhý, zavádí se tzv. účinný modul pružnosti $E_{c,eff}$

$$E_{c,eff} = \frac{E_C}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$$

- nelineární – $\sigma_c > 0,45f_c \wedge \sigma_c < 0,80f_c$ (pevnost betonu při dlouhodobém zatížení)
 - součinitel dotvarování se upraví následujícím způsobem

$$\varphi_k(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \exp[1,5(k_c - 0,45)]$$

kde k_c je poměr napětí $\sigma_c / f_{ck}(t_0)$

$f_{ck}(t_0)$ je charakteristická pevnost betonu v okamžiku zatížení

Recyklace betonu: Experimentální část

Zkouška dotvarování byla provedena na vzorcích č. 1. Pro zkoušku byly zvoleny mladé vzorky stáří 18 – 22 hodin, na kterých bude přetvoření dost velké na demonstraci rozdílných hodnot u BPK a BRK. Zatěžovací síla byla nastavena podle hodnot pevnosti v tlaku, které byly orientačně otestovány na vzorcích 1.1 a 1.2. Nižší hodnota síly na mezi pevnosti byla naměřena u vzorku s recyklátem, její hodnota byla 15,5 kN. Zátěž působila na oba druhy vzorků zároveň po dobu 13 dní a její tíha působící na jeden vzorek se rovnala polovině této hodnoty, 7,75 kN, aby bylo bezpečně zabráněno porušení méně pevného vzorku z BRK.

Testovací zařízení funguje na principu jednoramenné páky, na jejímž konci je na závitové tyči naloženo břemeno – závaží. Rameno působící na vložený vzorek je dlouhé 50 mm, rameno závaží 500 mm, účinný poměr zařízení se proto rovná 10. Výpočet potřebné zátěže byl stanoven následovně:

$$M = 7,75 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 0,1 = 155 \text{ kg}$$

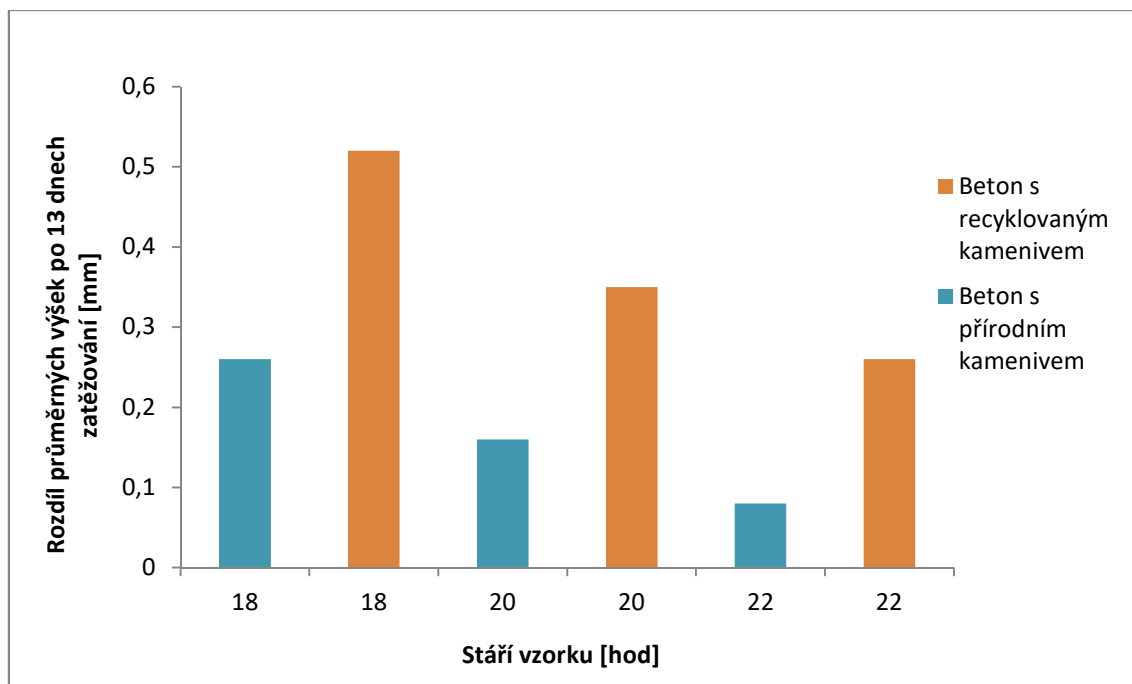
Jelikož byly testovány oba vzorky současně, byla potřebná zatěžovací síla 7,75 kN vynásobena dvěma. Zařízení se závažím lze vidět na obrázku č. 18.

Aby mohly vzorky z různých typů betonu rozdílně dotvarovávat nezávisle na sobě, byly do zařízení mezi samotný lis a roznášecí desku vloženy kloubové matky, jak je vidět na obrázku č. 19. Vzorky nebyly na horním povrchu nijak upravovány zakončováním, jelikož v průběhu zkoušky byly tlakem všechny nedokonalosti povrchu samy eliminovány.



Obrázek č. 19 Zkouška dotvarování vzorků č. 1 a závaží působící na vzorky

Velikost zatížení byla u všech tří cyklů vzorků zachována na stejné hodnotě 155 kg, aby bylo možné srovnání v rámci vzorků různého stáří. Rozdíly jsou patrné z grafu na obrázku č. 20, byla dokázána závislost stáří vzorku v okamžiku zatížení a celkovým dotvarováním.



Obrázek č. 20 Závislost rozdílu průměrných výšek na stáří vzorku v okamžiku zatížení

Hodnoty všech měřených výšek vzorků se zmenšily. Průměrný rozdíl ve výškách vzorků byl u BPK 0,10 %, u BRK 0,24 %. BRK tedy dosahoval v průměru o 140 % horších hodnot. Největší změna byla naměřena u vzorku s obsahem recyklátu č. 1.5, konkrétně 0,52 mm, který byl zatížen ve stáří 18 hodin.

Pro dosažení větších hodnot přetvoření od dotvarování by bylo třeba zvýšit hodnotu zátěže až do výše 70 % pevnosti betonu v tlaku (80 % již představuje pevnost betonu při dlouhodobém zatížení), což však z technických důvodů nebylo možné. Druhá možnost, zatížit mladší vzorky by nebyla vhodná, vzorky by měly příliš nízkou počáteční pevnost. U tří ze šesti vzorků z cyklu odbedněného po 18 hodinách se vyskytly na spodní straně trhliny, které mohou zkoušku dotvarování negativně ovlivnit, viz obrázek č. 21. Zatížení ještě mladších vzorků by mohlo způsobit kolaps, případně by musela být zátěž snížena a v průběhu zrání betonu postupně navyšována.



Obrázek č. 21 Prasklé vzorky č. 1 odbedněné po 18 hodinách

Abychom mohli porovnat součinitele dotvarování obou typů betonu, vypočteme je dle výše uvedených vzorců z průměrů naměřených hodnot přetvoření od dotvarování na vzorcích č. 1:

Výpočet 1 - BPK

$$\varepsilon_{CC}(14, t_0) = \varepsilon_{CC}(14,1) = 0,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$S = 3505,33 \text{ mm}^2$$

$$F = 7,75 \text{ kN}$$

$$E_C (C 50/60) = 37 \text{ GPa}$$

$$f_{ck}(t_0) = f_{ck}(1) = 5,415 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_c = \frac{F}{S} = \frac{7,75 \cdot 10^3}{3503,33 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 2,212 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_c}{f_{ck}(1)} = \frac{2,212 \cdot 10^6}{5,415 \cdot 10^6} = 0,41 < 0,45 \rightarrow \text{je uvažováno lineární dotvarování}$$

$$\varphi(14, t_0) = \varphi(14,1) = \frac{\varepsilon_{CC}(14,1)}{\frac{\sigma_c}{E_C}} = \frac{0,17 \cdot 10^{-3}}{\frac{2,212 \cdot 10^6}{37 \cdot 10^9}} = 2,844$$

$$E_{c,eff} = \frac{E_C}{1 + \varphi(14,1)} = \frac{37 \cdot 10^9}{1 + 2,844} = 9,625 \text{ GPa}$$

Výpočet 2 - BRK

$$\varepsilon_{CC}(14, t_0) = \varepsilon_{CC}(14,1) = 0,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$S = 3500,62 \text{ mm}^2$$

$$F = 7,75 \text{ kN}$$

$$E_C (C 35/45) = 33,5 \text{ GPa}$$

$$f_{ck}(t_0) = f_{ck}(1) = 4,129 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_c = \frac{F}{S} = \frac{7,75 \cdot 10^3}{3500,62 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 2,214 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_c}{f_{ck}(1)} = \frac{2,214 \cdot 10^6}{4,129 \cdot 10^6} = 0,54 > 0,45 \rightarrow \text{je uvažováno nelineární dotvarování}$$

$$\begin{aligned} \varphi(14, t_0) = \varphi(14,1) &= \frac{\varepsilon_{CC}(14,1)}{\frac{\sigma_c}{E_C} \cdot e^{1,5 \cdot \left(\frac{\sigma_c}{f_{ck}(1)} - 0,45\right)}} = \frac{0,38 \cdot 10^{-3}}{\frac{2,214 \cdot 10^6}{33,5 \cdot 10^9} \cdot e^{1,5 \cdot \left(\frac{2,214 \cdot 10^6}{4,129 \cdot 10^6} - 0,45\right)}} \\ &= 5,052 \end{aligned}$$

$$E_{c,eff} = \frac{E_C}{1 + \varphi(14,1)} = \frac{33,5 \cdot 10^9}{1 + 5,052} = 5,535 \text{ GPa}$$

Výsledky zkoušky dotvarování shrnuje následující tabulka č. 11:

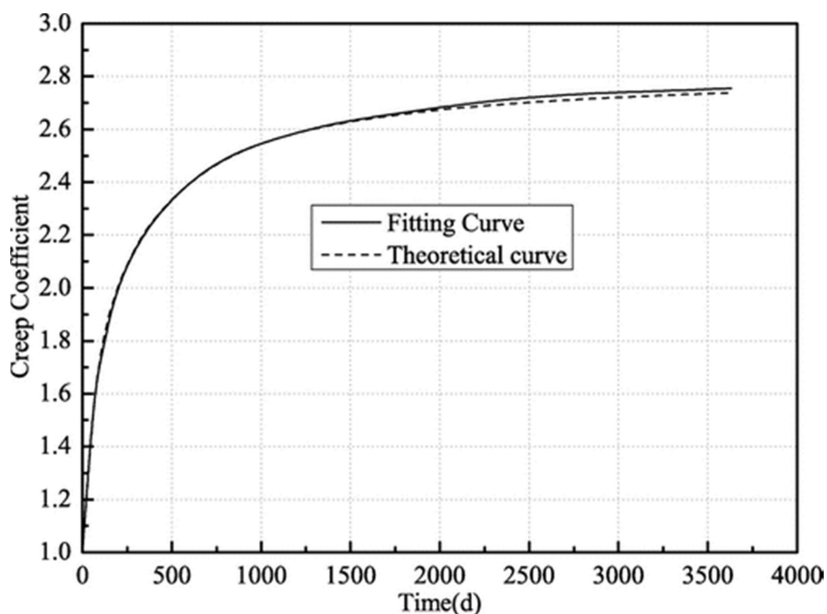
Tabulka č. 11 Vypočtené hodnoty součinitele dotvarování u obou typů betonu

| Typ betonu | Součinitel dotvarování ve 14 dnech |
|--------------------------|------------------------------------|
| S přírodním kamenivem | 2,844 |
| S recyklovaným kamenivem | 5,052 |

Součinitel dotvarování, jak vyplývá z výpočtu, roste především kvůli nižší pevnosti, na které závisí modul pružnosti. Účinný modul pružnosti klesá o 43 %, součinitel dotvarování roste o 78 %. Pokles účinného modulu pružnosti je v souladu s teoretickým předpokladem kapitoly 1.7.2. (až o 52 %), zvýšení součinitele dotvarování ale vychází značně odlišně, teoretický výzkum předpokládal zvýšení maximálně o 50 %.

Součinitel dotvarování je spočítán pro hodnoty po 14 dnech ($\varphi(14,1)$), ale jedná se o hodnotu proměnnou, která s časem roste, viz obrázek č. 22. Nabývá hodnot 0 - 6. Podle teorie stárnutí podoba křivky závisí na momentu prvního zatížení. Při zatížení mladšího betonu dosahují hodnoty součinitele dotvarování vyšších hodnot. Podle teorie

zpožděné pevnosti součinitel závisí na době, po kterou napětí působí, ale je nezávislý na stáří betonu, při němž napětí začalo působit.



Obrázek č. 22 Časová proměna součinitele dotvarování

Jak je vidět z naměřených hodnot v Příloze č. 1, průměrné hodnoty horních a spodních průměrů vzorků nevykazovaly žádný trend, došlo jak ke kladné, tak záporné změně hodnot. Bylo očekáváno mírné zvětšení rozměrů v důsledku Poissonova zákona, který popisuje závislost mezi podélným prodloužením a příčným zkrácením pomocí Poissonova čísla μ (pro beton $\mu = 0,2$). Tato hodnota však pravděpodobně byla vyvážena účinkem smršťování. Oba tyto jevy se v tomto případě pohybují v tak malých délkových změnách, že jsou prakticky neměřitelné.

Objemové změny betonu vedou k jednomu z nejzávažnějších poruch betonových konstrukcí, nejvíce se projevují u velkých, na dotvarování citlivých konstrukcí. Dochází k ohrožení jejich použitelnosti a náklady vyvolané jejich důsledky jsou velmi vysoké. Výzkum reologických projevů, smršťování a dotvarování, prošel dlouhým vývojem, jehož výsledkem jsou dva přístupy k analýze – průřezové modely a bodové modely [19].

Metoda průřezových modelů je metoda zjednodušená. Jejím výsledkem jsou integrální vnitřní síly – průřezové silové a momentové veličiny, nikoliv však velikost napětí, skutečné přetvoření a jejich rozložení po průřezu. Nejlepší výsledky z dosavadních modelů má model B3, avšak i ten není zcela vyhovující, neboť vstupní

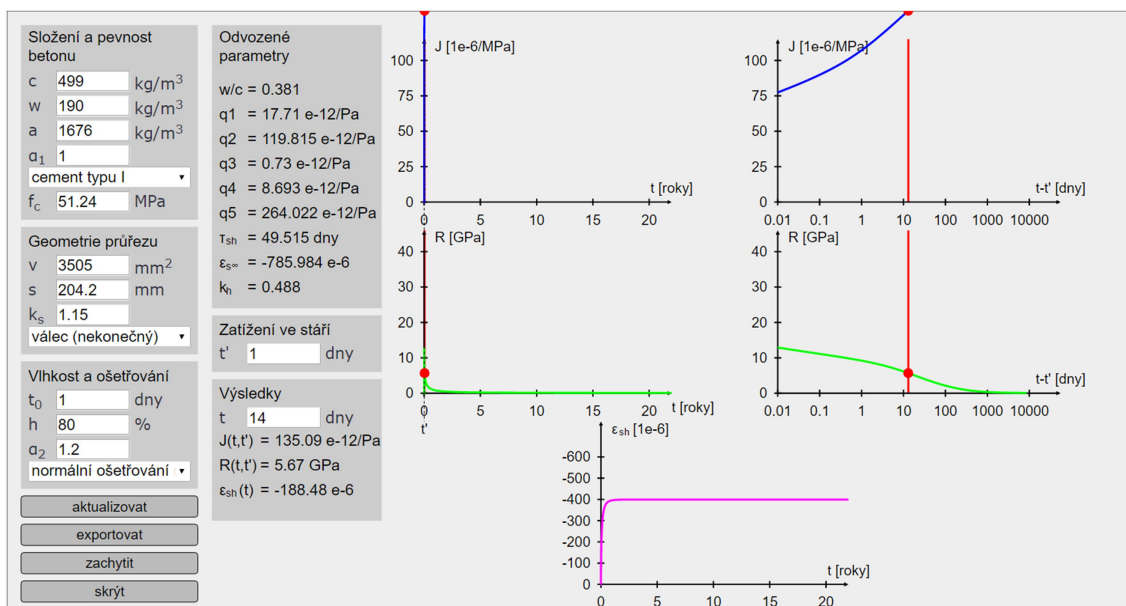
Recyklace betonu: Experimentální část

parametry jsou pouze odhadnuty (složení betonu) anebo převzaty. Modely predikce by měly být aktualizovány krátkodobými zkouškami dotvarování a smršťování betonu, např. jako v experimentální části této práce. Pomocí krátkodobých zkoušek a modelu B3 lze odhadnout výsledné křivky dlouhodobého dotvarování.

Bodové modely se zaměřují na skutečný stav napětí, rozložení napětí a přetvoření. Tento model je též schopen respektovat, že povrch konstrukce je vystaven změnám vlhkosti a teploty.

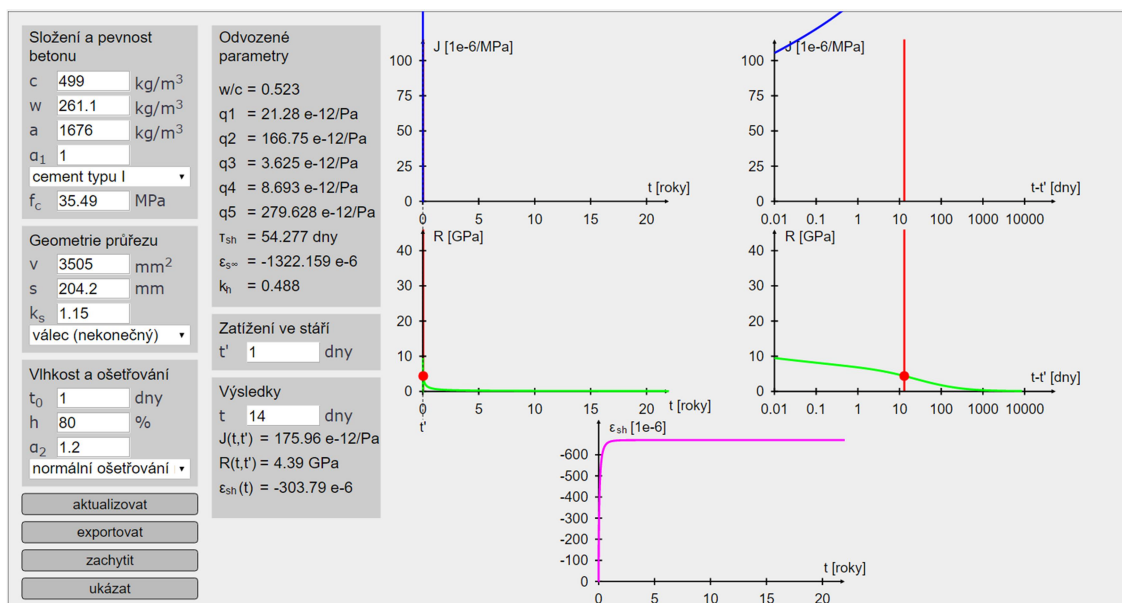
Díky modelu B3 lze odhadnout funkci poddajnosti betonu (dotvarování), relaxační funkci a smrštění [20]. Funkce poddajnosti po přenásobení napětím od zatížení vyjadřuje celkovou poměrnou deformaci materiálu, představuje tedy hodnotu deformace vyvolanou jednotkovým napětím. Podobně pak relaxační funkce představuje vývoj napětí, pokud je materiál vystaven jednotkové poměrné deformaci.

Pro konkrétní příklad vzorků č. 1 funkce vypadají následovně:



Obrázek č. 23 Predikce dotvarování a smrštění dle modelu B3 pro BPK

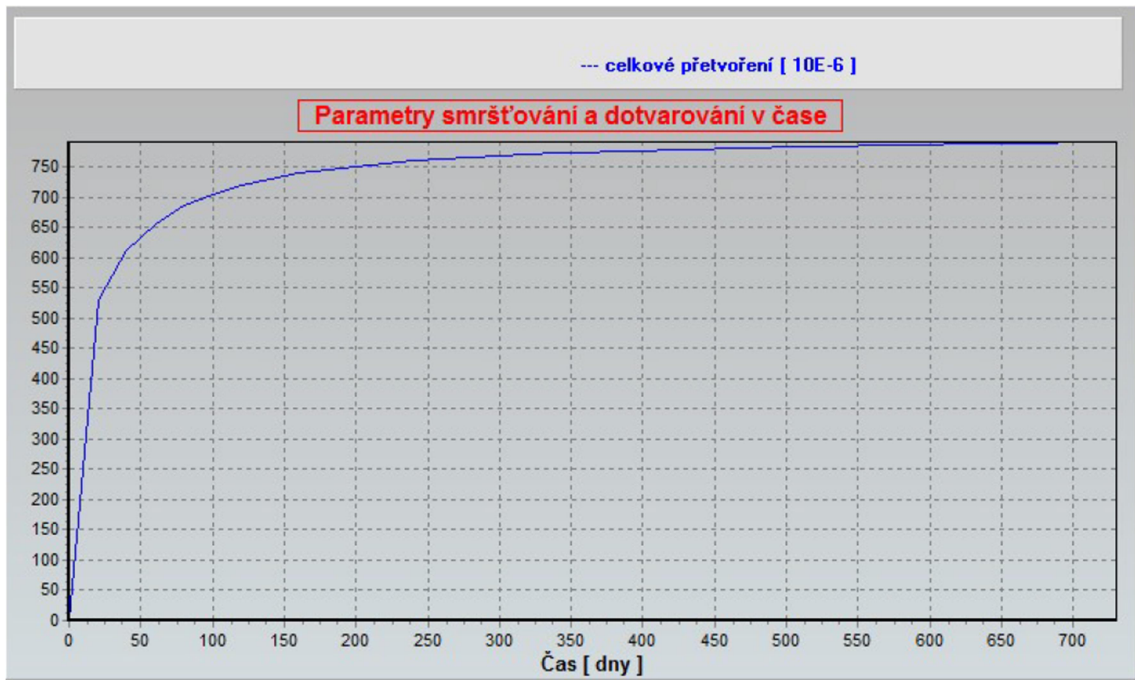
Recyklace betonu: Experimentální část



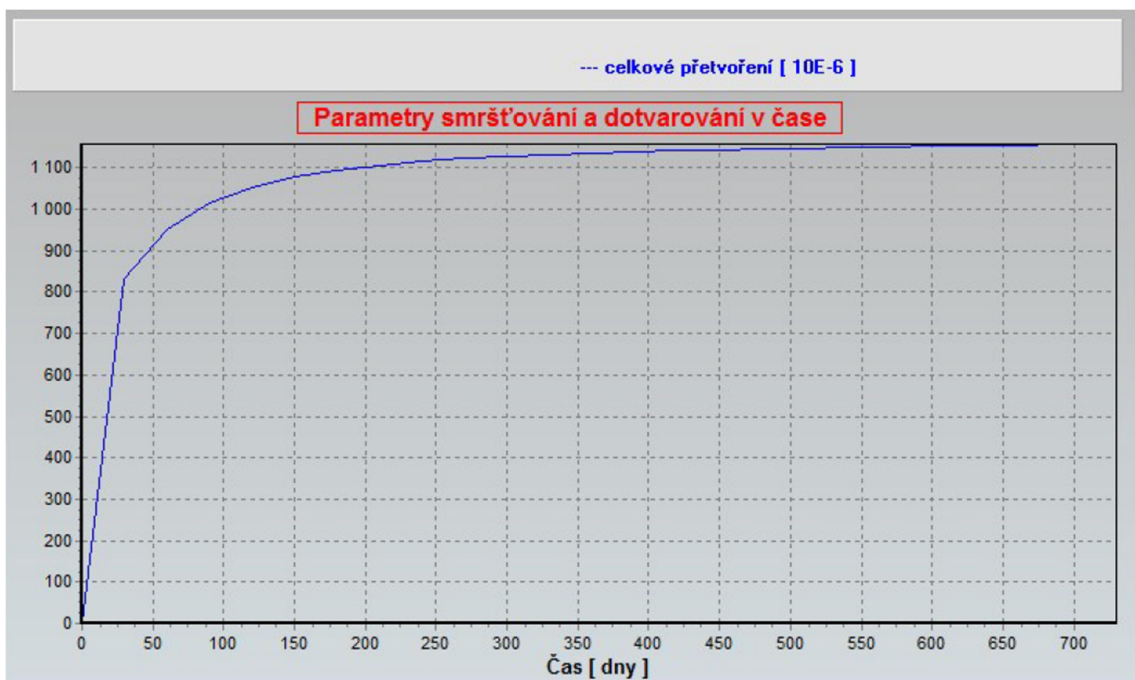
Obrázek č. 24 Predikce dotvarování a smrštění dle modelu B3 pro BRK

Ze srovnání vyplývá u BRK větší smrštění betonu, větší hodnota poddajnosti a menší hodnota funkce relaxace – tedy menší hodnota napětí. Ve všech parametrech je beton s recyklovaným kamenivem dle očekávání mírně horší, procentuální rozdíly dle metody B3 však nejsou tak markantní jako výsledky výpočtů z přímo naměřených veličin.

Existují také simulátory modelu B3, jejichž výsledkem již není obecná funkce poddajnosti, ale konkrétní hodnoty přetvoření pro konkrétní působící napětí [21]. Díky tomuto modelu lze odhadnout například celkovou deformaci po 2 letech:



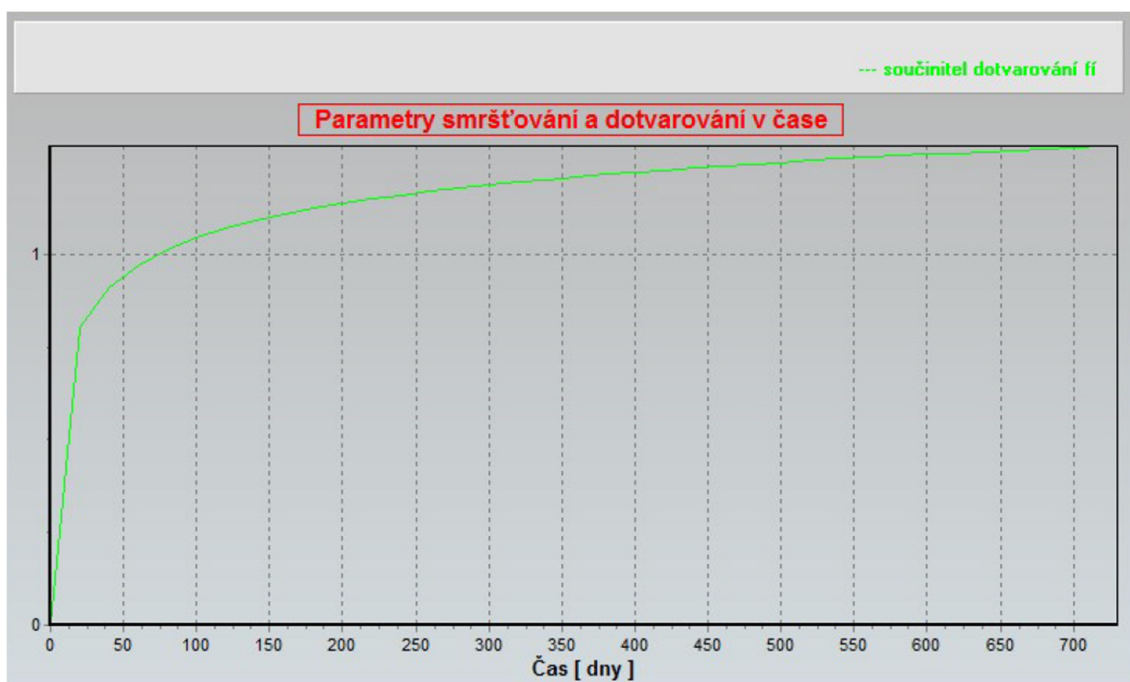
Obrázek č. 25 Celkové přetvoření po 2 letech dle modelu B3 pro BPK



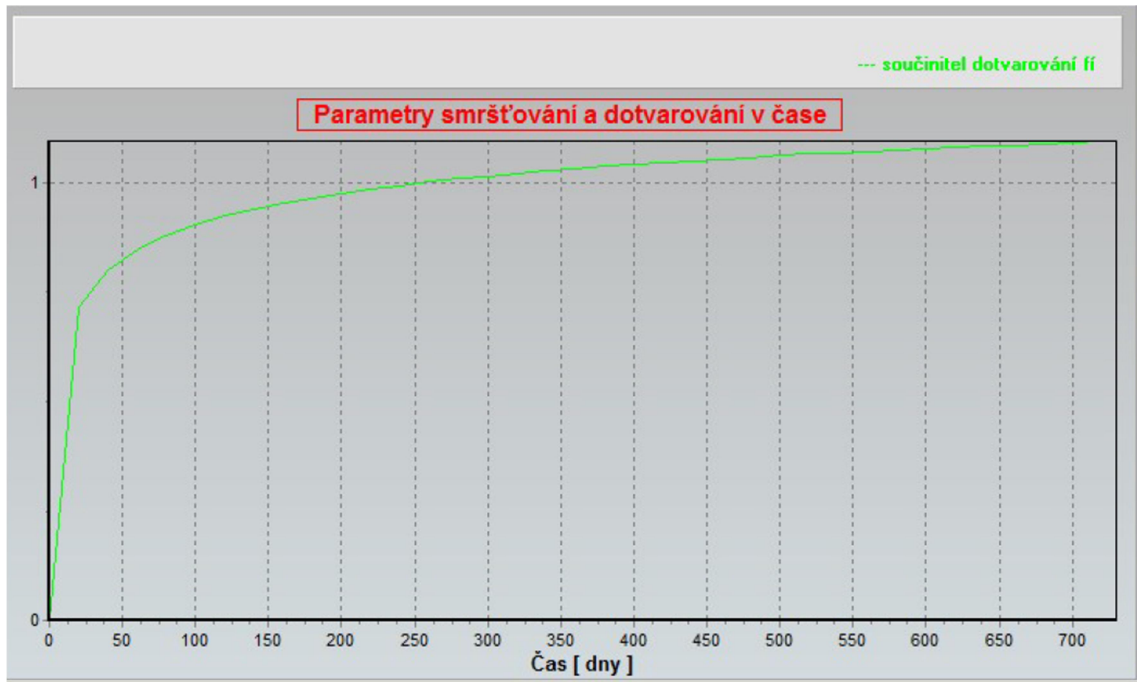
Obrázek č. 26 Celkové přetvoření po 2 letech dle modelu B3 pro BRK

Celková deformace po dvou letech je dle B3 u BPK 0,79 mm, u BRK 1,16 mm. Jak je vidět na obrázcích č. 25 a 26, časem by se tyto deformace ještě zvyšovaly, ale už pouze minimálně.

Naměřené hodnoty celkové deformace odpovídají výsledkům experimentu, celková deformace u BRK je vyšší než u BPK. Součinitele dotvarování u obou typů betonu vychází mnohem menší, než z prostého výpočtu z naměřených veličin na straně 51 a 52. Tyto nesrovnalosti mohou být způsobeny nepřesnostmi měření i případnou nevhodností modelu B3 pro vzorky z mladého betonu. Zajímavé také je, že pro BRK navzdory očekávání nabývá součinitel menších hodnot než pro BPK, viz obrázek č. 27 a 28. Menší součinitel dotvarování je následkem většího pružného poměrného přetvoření, které se při výpočtu součinitele dotvarování nachází ve jmenovateli. Konečná hodnota součinitele dotvarování byla u BPK vyčíslena na 1,29 a u BRK na 1,10. Kompletní přehled výsledků funkcí modelu B3 je vidět v příloze č. 3 a 4.



Obrázek č. 27 Součinitel dotvarování po 2 letech dle modelu B3 pro BPK



Obrázek č. 28 Součinitel dotvarování po 2 letech dle modelu B3 pro BRK

ZÁVĚR

Lze říci, že oblast recyklace S & D odpadů má před sebou jednoznačně další rozvoj. Předpokládá se, že by se objem recyklovaného kameniva mohl zvýšit na šest milionů tun [10], což by tvořilo asi 9 % z celkového množství vytěženého kameniva v ČR. Už dnes se však podíl recyklace kameniva blíží 70 %, což nás řadí ve světovém žebříčku na špičku. Většímu využití brání obavy z horších stavebně-technických vlastností, dnes již částečně překonané. Při dodržení technologie zpracování (předepsaná vlhkost a kvalita zhutnění) však lze dosáhnout při použití recyklátu jako podloží pevnosti až 100 MPa [10], což je hodnota naprosto postačující pro většinu stavebních prací. V současné době je většina recyklátu, přibližně 75 %, používáno na zásypy a podkladní vrstvy vozovek.

Co se týče použití recyklovaného kameniva do nového betonu, bude se toto množství pravděpodobně stále zvětšovat i za cenu větších průřezů v porovnání se standardním betonem. Podmínkou je však důkladné třídění a recyklace a potažmo splnění příslušných norem, jedině tak lze dosáhnout úspory přírodních zdrojů a zabránit záboru půdy ke skládkování S & D odpadu.

Experimentem byl potvrzen fakt, že vzorky z BRK dosahují nižších hodnot pevnosti v tlaku a vyšších hodnot přetvoření od dotvarování než vzorky z BPK. Válcová pevnost v tlaku byla v průměru o 31 % nižší, součinitel dotvarování o 78 % vyšší a účinný modul pružnosti klesl o 43 %. Je zajímavým zjištěním, že i přes nižší pevnost beton s recyklovaným kamenivem vykazoval na mezi únosnosti typ porušení, který je typický pro vysokopevnostní betony. Beton s přírodním kamenivem odpovídal průměrně pevnostní třídě C50/60, s recyklovaným kamenivem třídě C 35/45. Tyto výsledky odpovídají teoretickému předpokladu a splňují nároky na použití betonu s recyklovaným kamenivem ke konstrukčním účelům.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] KOHOUTKOVÁ, Alena a Jaroslav PROCHÁZKA. *Recyklace betonu*. [online]. 2015 [cit. 2017-02-08]. Sborník přednášek z předmětu YTBK, Fakulta stavební, ČVUT. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/prochja2/YTBK/Prednaska_10_2015.pdf
- [2] PAVLŮ, Tereza a Magdaléna ŠEFFLOVÁ. Recyklace betonu: je třeba oddělit cementový prach. *Odpady*. 2015, č. 7-8, s. 20-21. ISSN 1210-4922.
- [3] Ceník společnosti WEKO s.r.o. *Weko.cz*. [online]. © 2017 WEKO, s.r.o. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <https://www.weko.cz/soubor/cenik-2016-pdf/>
- [4] Our Common Future, Chapter 2: Towards Sustainable Development... *Un-documents.net* [online]. [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.un-documents.net/ocf-02.htm>
- [5] Agenda 21. *MA21.cenia.cz*. [online]. 2016 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://ma21.cenia.cz/Z%C3%A1kladn%C3%ADinformaceoMA21/Agenda21/tabid/101/language/cs-CZ/Default.aspx>
- [6] PAVLŮ, Tereza. *Use of recycled Aggregate for Concrete Structures*. Prague, 2015. Doctoral Thesis. Czech Technical University in Prague, Department of Building Structures.
- [7] ČESKO. Vyhláška č. 93/2016 ze dne 31. března 2016 o Katalogu odpadů. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2016, částka 38. Dostupný také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-93/zneni-20160401>
- [8] Surovinová politika v oblasti nerostných surovin | MPO. *Mpo.cz*. [online]. © 2005 – 2017 MPO [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-93/zneni-20160401>
- [9] Portál Jihomoravského kraje – Plán odpadového hospodářství... *Kr-jihomoravsky.cz*. [online]. © 2017 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <http://www.kr-jihomoravsky.cz/Default.aspx?ID=279397&TypeID=2>
- [10] ŠKOPÁN, Miroslav. Vývojové trendy v technologiích pro recyklaci stavebních a demoličních odpadů. In: *Stavebni-technika.cz*. [online]. © 2014 – 2017

[cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://stavebni-technika.cz/clanky/trendy-v-technologich-pro-recyklaci-odpadu>

[11] KRÁSA, Ondřej. Česko již plní požadavky roku 2020. *Odpady*. 2015, č. 7-8, s. 17-18. ISSN 1210-4922.

[12] *Beton – vztah mezi strukturou a vlastnostmi*. [online]. 2015, s. 146, 147, 154. [cit. 2017-03-23]. Sborník přednášek z předmětu MAI, Fakulta stavební, ČVUT. Dostupné z: http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/MAIN/MI_beton.pdf

[13] TENLOC – spojka panelov | Peikko Slovakia s.r.o. *Peikko.sk*. [online]. © 2017 Peikko [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.peikko.sk/product-sk/p=TENLOC+-+spojka+panelov>

[14] Recyklační zařízení. *Schwing.cz*. [online]. © 2017 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <http://www.schwing.cz/cz/recyklacni-zarizeni.html>

[15] BASLÍKOVÁ, Ludmila. *Recyklace stavebního materiálu*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Agronomická fakulta.

[16] PAVLŮ, Tereza. Zkoušení a vlastnosti recyklovaného kameniva pro použití do betonu. In: *Stavba.tzb-info.cz*. [online]. © 2001 – 2017 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10265-zkouseni-a-vlastnosti-recyklovaneho-kameniva-pro-pouziti-do-betonu>

[17] SAFIUDDIN, Md. et al. Use of recycled concrete aggregate in concrete: a review. In: *Journal of Civil Engineering and Management*. [online] 2013, v. 9, i. 6. [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2013.799093>

[18] Vývoj pevnosti betonu | eBeton – Specialista na beton. *Ebeton.cz*. [online]. 2017 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/vyvoj-pevnosti-betonu>

[19] VÍTEK, Jan L. et al. Reologické projevy v prvcích betonových komorových nosníků. *Stavební obzor*. [online]. 2013, č. 6, s. 152-153. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.profesis.cz/files//dokumpdf/sobzor/so062013pdf.pdf>

[20] Intermech – model B3 pro smšnění a dotvarování betonu. *Mech.fsv.cvut.cz*. [online]. © 2011 – 2015 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://mech.fsv.cvut.cz/~stransky/cs/intermech/modelB3/>

[21] Výpočetní program pro stanovení účinků a parametrů smršťování a dotvarování beotnu dle modelu B3. *People.fsv.cvut.cz*. [online]. © 2011 – 2015 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/www/vrablluk/Cviceni/CaS.exe>

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek č. 1** Rovnováha sociální (1), environmentální (2) a ekonomické (3) sféry (průnik 1 a 2 – snesitelný, 1 a 3 –spravedlivý, 2 a 3 - životaschopný)
- Obrázek č. 2** Graf skladby odpadů v EU dle druhu materiálu
- Obrázek č. 3** Spojka panelů TENLOC
- Obrázek č. 4** Graf využití recyklovaného betonu
- Obrázek č. 5** Příklad bubnového a šnekového recyklačního zařízení
- Obrázek č. 6** Tři základní technologické operace recyklace stavebních materiálů
- Obrázek č. 7** Typické tvary produktů po drcení čelistovým a odrazovým drtičem
- Obrázek č. 8** Schéma mobilního čelistového drtiče s pásovým podvozkem
- Obrázek č. 9** Čerstvě odbedněné vzorky č. 1 a 2 v 1. cyklu
- Obrázek č. 10** Čára zrnitosti – grafické vyjádření výsledků prosévací zkoušky recyklovaného kameniva
- Obrázek č. 11** Průběh prosévací zkoušky recyklovaného kameniva a výsledný produkt – tři různé frakce kameniva
- Obrázek č. 12** Kontaminující látky v recyklátu – identifikační test
- Obrázek č. 13** Rozdíly ve struktuře a barevnosti BPK (vpravo a dole) a BRK
- Obrázek č. 14** Graf válcové pevnosti v tlaku vzorků č. 1
- Obrázek č. 15** Zkouška válcové pevnosti vzorku č. 1 (stáří 20 hodin) a zakoncovaný vzorek č. 2 (stáří 28 dní)
- Obrázek č. 16** Graf válcové pevnosti v tlaku vzorků č. 2
- Obrázek č. 17** Vývoj pevnosti betonu v závislosti na teplotě prostředí
- Obrázek č. 18** Princip dotvarování demonstrováný na grafech závislosti zatížení a deformace na času
- Obrázek č. 19** Zkouška dotvarování vzorků č. 1 a závaží působící na vzorky
- Obrázek č. 20** Závislost rozdílu průměrných výšek na stáří vzorku v okamžiku zatížení
- Obrázek č. 21** Prasklé vzorky č. 1 odbedněné po 18 hodinách
- Obrázek č. 22** Časová proměna součinitele dotvarování
- Obrázek č. 23** Predikce dotvarování a smrštění dle modelu B3 pro BPK
- Obrázek č. 24** Predikce dotvarování a smrštění dle modelu B3 pro BRK
- Obrázek č. 25** Celkové přetvoření po 2 letech dle modelu B3 pro BPK

Obrázek č. 26 Celkové přetvoření po 2 letech dle modelu B3 pro BRK

Obrázek č. 27 Součinitel dotvarování po 2 letech dle modelu B3 pro BPK

Obrázek č. 28 Součinitel dotvarování po 2 letech dle modelu B3 pro BRK

SEZNAM TABULEK

- Tabulka č. 1** Produkce S & D odpadu dle druhu materiálu v ČR
- Tabulka č. 2** Čtyři základní skupiny S & D odpadu dle původu odpadu v ČR
- Tabulka č. 3** Geometrické charakteristiky použitých vzorků a počty vzorků od každého druhu betonu
- Tabulka č. 4** Vybrané požadavky na vlastnosti recyklovaného kameniva pro použití do betonu ve státech EU
- Tabulka č. 5** Geometrické charakteristiky použitých vzorků a počty vzorků od každého druhu betonu
- Tabulka č. 6** Číslování vzorků
- Tabulka č. 7** Výsledky prosévací zkoušky recyklovaného kameniva
- Tabulka č. 8** Použitá betonová směs, množství složek na 1 kubický metr
- Tabulka č. 9** Rozdíly hmotností BPK a BRK demonstrovány na vzorcích č. 2
- Tabulka č. 10** Porovnání objemových hmotností BPK a BRK na vzorcích č. 2
- Tabulka č. 11** Vypočtené hodnoty součinitele dotvarování u obou typů betonu

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1** Protokol naměřených a vypočtených veličin vzorků č. 1
- Příloha č. 2** Protokol naměřených a vypočtených veličin vzorků č. 2
- Příloha č. 3** Výsledky funkcí modelu B3 pro beton s recyklovaným kamenivem
- Příloha č. 4** Výsledky funkcí modelu B3 pro beton s přírodním kamenivem