



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

MECHANICKÁ AKTIVACE BETONOVÝCH
RECYKLÁTŮ JAKO AKTIVNÍ PŘÍMĚSÍ

MECHANICAL ACTIVATION OF RECYCLED CONCRETE AS AN ACTIVE
INGREDIENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

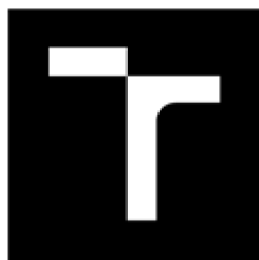
Bc. Lubomír Opat

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | N3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3607T020 Stavebně materiálové inženýrství |
| Pracoviště | Ústav technologie stavebních hmot a dílců |

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | |
|------------------------|---|
| Student | Bc. Lubomír Opat |
| Název | Mechanická aktivace betonových recyklátů jako aktivní příměsi |
| Vedoucí práce | prof. Ing. Rudolf Hela, CSc. |
| Datum zadání | 31. 3. 2019 |
| Datum odevzdání | 10. 1. 2020 |

V Brně dne 31. 3. 2019

PODKLADY A LITERATURA

Databáze internetových vědeckých časopisů Web of science, Scopus a další.

Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých sympozií.

Diplomové a disertační práce publikované na FAST VUT v Brně.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V současné době se recykluje stále více betonových konstrukcí. Při jejich recyklaci vzniká hrubé kamenivo frakcí 4 až 32 mm, pro které se v praxi nachází uplatnění buď jako kamenivo pro podkladní vrstvy, zásypy nebo i jako plnivo pro nižší pevnostní třídy. Pro frakci 0/4 mm se uplatnění nachází velmi obtížně, pro výrobu betonů se naprosto nehodí. Jedna z možností pro jejich uplatnění v technologii betonu je jejich namletí na granulometrii menší než 0,125 mm. Pak by bylo možné tento materiál použít jako příměs typu I, resp. II.

V teoretické části udělejte rešerži z odborné zahraniční či tuzemské literatury o možnostech využívání jemných podílů vzniklých při drcení betonových recyklátů. Popište možnosti jejich mletí a dopad velikostí částic či měrného povrchu na vlastnosti betonů v čerstvém stavu – vodonáročnost, ztrátu konzistence v čase do 90 minut. Následně i možné dopady na pevnosti betonů, vodotěsnost či mrazuvzdornost.

V praktické části připravte z betonových recyklátů z dálnice D1 a z výroby spirall panelů, mechanickým mletím jemný prach s velikostí středního zrna kolem 0,060mm. Připravte vzorky s různým měrným povrchem v rozmezí od 200 do 600 m²/kg. Z těchto jemných podílů připravte normové kaše s cementem CEM I 42,5 pro stanovení indexu aktivity. Současně ověřte dopady různé jemnosti mletí na vodonáročnost kaší. V případě dosažení indexů účinnosti stanovte optimální dávkování na receptuře betonu pevnostní třídy C25/30, konzistence S3 ve stáří 7, 28 a 60 dnů. Dále hloubky průsaku a nasákavosti betonů.

Rozsah práce cca 80 stran

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou použití drobných frakcí betonového recyklátu. V práci jsou popsány teorie k mletí a principy mechanické aktivace při vysokoenergetickém mletí. Dále jsou okomentovány články, ve kterých autoři s úspěchem zaktivovali betonové recykláty. V experimentální části diplomové práce bylo navrženo a testováno 11 receptur malt s jemně mletým betonovým recyklátem a 3 receptury betonů. Je provedeno zhodnocení přínosu použití jemně mletého recyklátu jako možná náhrada části cementu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stavební a demoliční odpad, odpadní beton, betonový recyklát, recyklace, mikromletý beton, index účinnosti, beton, náhrada pojiva.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the issue of using fine powder of concrete recycle. In this thesis, the theoretical expectations of milling are summarized as well as high energy milling. Afterwards professional articles, in which fine powder of concrete recycle is successfully activated, are described and commented on. In the experimental part, there are 11 recipes of cement mortar and 3 recipes of concrete mixed. The benefit of using fine powder of concrete recycle as a possible substitute for part of the cement is evaluated.

KEYWORDS

Construction and demolition waste, waste concrete, recycling, micronized concrete, efficiency index, concrete, binder replacement. recycle, concrete recycle

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Lubomír Opat,

Mechanická aktivace betonových recyklátů jako aktivní příměsi

Brno, 2020. 122 stran, bez příloh.

Diplomová práce.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,

Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

Dále prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je obsahově shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 9.1.2020

podpis skryt kvůli GDPR

Lubomír Opat

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

V těchto pár odstavcích bych chtěl poděkovat zejména panu profesoru Ing. Rudolfovi Helovi, CSc. za odborné a pedagogické vedení, dále za cenné rady a trpělivost, které se mi během zpracování závěrečné práce dostávalo.

Dále bych chtěl poděkovat všem zaměstnancům Ústavu technologie stavebních hmot a dílců při FAST VUT Brno, kteří mi se zpracováním bakalářské práce pomohli. Jmenovitě např. paní Blance Bártové, doc. Lence Bodnárové.

Dále také snoubence a rodině za zázemí a podporu při tvorbě této práce.

Obsah

| | | |
|----------|---|---------------|
| 1 | ÚVOD | - 10 - |
| 2 | CEMENT | - 12 - |
| 2.1 | Historie cementu | - 12 - |
| 2.2 | Výroba cementu | - 13 - |
| 2.3 | Slínkové minerály | - 15 - |
| 2.4 | Znečištění z výroby cementu | - 18 - |
| 3 | PŘÍMĚSI DO BETONU | - 19 - |
| 4 | RECYKLÁT | - 20 - |
| 4.1 | Jemné podíly do 0,125 mm | - 21 - |
| 5 | VYSOKOENERGICKÉ MLETÍ | - 24 - |
| 5.1 | Účinnost mletí..... | - 25 - |
| 5.2 | Teorie popisující mletí..... | - 27 - |
| 5.3 | Použitý vibrační mlýn a princip mletí..... | - 30 - |
| 6 | TEORIE MECHANICKÉ AKTIVACE | - 31 - |
| 6.1 | Mechanická aktivace jako proces..... | - 33 - |
| 6.2 | Limit mletí..... | - 37 - |
| 6.3 | Vztah mletí a mechanické aktivace | - 38 - |
| 6.4 | Druhy lomů látek | - 41 - |
| 7 | POZNATKY Z ODBORNÝCH PUBLIKACÍ VĚNOVANÝCH MECHANICKÉ AKTIVACI | - 43 - |
| 7.1 | Vliv mikromletého betonu a mramorové moučky na vlastnosti cementových past - Experiment I | - 44 - |
| 7.2 | Vliv jemnosti recyklované betonové moučky - Experiment II..... | - 48 - |

| | | |
|-----------|---|---------------|
| 8 | REOLOGICKÉ VLASTNOSTI..... | - 54 - |
| 8.1 | Reologie | - 54 - |
| 8.2 | Faktory ovlivňující reologii..... | - 63 - |
| | EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE | - 67 - |
| 9 | CÍL PRÁCE..... | - 67 - |
| 10 | METODIKA A POSTUP PRÁCE | - 67 - |
| 11 | POSTUP ZKOUŠEK PROVEDENÝCH V EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE..... | - 68 - |
| 11.1 | Statistický náhled na hodnocení výsledků | - 68 - |
| 11.2 | Zkouška sednutí kužele | - 68 - |
| 11.3 | Objemová hmotnost..... | - 69 - |
| 11.4 | Pevnost v tahu za ohybu trámečky 4-4-16..... | - 70 - |
| 11.5 | Pevnost v tlaku | - 71 - |
| 11.6 | Index účinnosti | - 73 - |
| 11.7 | Nasákavost do ustálené hmotnosti..... | - 73 - |
| 11.8 | Reologie cementových past | - 74 - |
| 11.9 | Rentgenová difrakční analýza | - 74 - |
| 12 | POUŽITÉ SUROVINY | - 76 - |
| 13 | POUŽITÉ RECYKLÁTY A JEJICH VLASTNOSTI | - 77 - |
| 13.1 | Úprava recyklátů před mletím | - 77 - |
| 13.2 | Mletí ve vibračním mlýně | - 78 - |
| 13.3 | Recyklát z bourané Dálnice D1 | - 78 - |
| 13.4 | Recyklát z bourané části Shopping Parku Avion Brno..... | - 79 - |
| 13.5 | Recyklát dodaný firmou Prefa Kuřim | - 81 - |
| 13.6 | RTG analýza namletých recyklátů..... | - 82 - |

| | | |
|-----------|---|----------------|
| 14 | TESTOVÁNÍ CEMENTOVÝCH MALT S NAMLETÝMI RECYKLÁTY | - 86 - |
| 14.1 | Příprava cementových malt..... | - 86 - |
| 14.2 | Receptury cementových malt a vlastnosti v čerstvém stavu..... | - 87 - |
| 14.3 | Vlastnosti cementových malt ve ztvrdlém stavu | - 89 - |
| 15 | MĚŘENÍ REOMETRIE CEMENTOVÝCH PAST | - 97 - |
| 16 | TESTOVÁNÍ BETONŮ S NAMLETÝMI RECYKLÁTY..... | - 104 - |
| 16.1 | Příprava betonů | - 104 - |
| 16.2 | Receptury betonů a vlastnosti v čerstvém stavu | - 104 - |
| 16.3 | Konzistence sednutím kužele | - 105 - |
| 16.4 | Vlastnosti betonů ve ztvrdlém stavu | - 106 - |
| | ZHODNOCENÍ POZNATKŮ | - 109 - |
| | ZÁVĚR..... | - 111 - |
| | POPIS OBJEKTŮ A POUŽITÉ ZDROJE..... | - 112 - |
| 17 | POUŽITÉ ZKRATKY | - 112 - |
| 18 | POUŽITÉ JEDNOTKY..... | - 113 - |
| 19 | POUŽITÉ ZDROJE | - 114 - |
| 20 | OBRÁZKY A TABULKY | - 119 - |
| 20.1 | Obrázky | - 119 - |
| 20.2 | Tabulky | - 121 - |
| 20.3 | Rovnice | - 122 - |

1 ÚVOD

Světová populace za posledních 200 let vzrostla sedminásobně. Jako tzv. velké zrychlení bývá označován trend exponenciálního růstu mnoha socioekonomických a enviromentálních ukazatelů. Tento růst probíhá od poloviny 20. století. Kromě světové populace je to například růst světového HDP, populace ve městech, stoupající spotřeby vody nebo produkování emisí oxidu uhličitého. [1] Existence člověka má tak **větší negativní dopad na životní prostředí**. Toto je hlavní důvod, kvůli kterému se v posledních desetiletích začaly objevovat nové přístupy, které na tento vývoj reagují. Pojem ochrana životního prostředí se dnes používá naprosto běžně, ve vyspělých zemích je součástí vládních strategií a věnuje se mu řada organizací občanské společnosti. Se zvýšeným zájmem o přírodu a její ochranu se přitom můžeme setkat až ve 2. polovině 19. století, kdy také došlo k založení oboru ekologie a vzniku prvního národního parku. [2]

Lineární ekonomika - vyrobit, prodat, spotřebovat a vyhodit – tak funguje takzvaná **lineární ekonomika**. Velké procento výrobků tak zbytečně končí na skládkách. Proti tomuto tradičnímu ekonomickému modelu stojí nový způsob výroby a spotřeby.



Obrázek 1: Znárodnění rozdílů mezi lineární a cirkulární ekonomikou [3]

Cirkulární ekonomika neboli **oběhové hospodářství** zhodnocuje už existující výrobky, suroviny a materiály s cílem prodloužit jejich životní cyklus a současně minimalizovat odpad [3]. Na obrázku 1 je zřejmé, jak toto myšlení funguje.

Principem této myšlenky a praktik je propojení toků materiálů a udržování jejich hodnot v cyklech po co nejdelší dobu. Materiály, jež by se v dosavadní lineární ekonomice staly odpady, jsou opětovně využívány anebo recyklovány. Aby toto bylo možné, je důležité zakomponovat tuto myšlenku již ve fázi designu a výroby. Tento způsob zacházení se surovinami **pomáhá chránit životní prostředí**, a podpořit by to mělo také ekonomický růst a přinést pozitivní sociální efekty. Díky tomu, že úzce souvisí s udržitelným rozvojem, o který usiluje řada nadnárodních společností, včetně Evropské Unie a OSN, se jedná o pozitivní směr do budoucna.

V souladu s těmito myšlenkami se diplomová práce zabývá možností využití betonu ze staveb, které již svému účelu nemohou dále sloužit. Znovu využitím těchto materiálů lze ušetřit primární zdroje.

2 CEMENT

Cement je definován dle ČSN EN 197-1 ed. 2: Cement - část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití (z r. 2012):

Cement je hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smísení s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě. Cement dle této normy označovaný jako CEM, musí při odpovídajícím dávkování a smíchání s kamenivem a vodou umožnit výrobu betonu nebo malty zachovávající svou zpracovatelnost po dostatečnou dobu vhodnou zpracovatelnost - čas tuhnutí a tvrdnutí. Po předepsané době zrání musí mít předepsanou pevnost a dlouhodobou objemovou stálost. [4] Slínek může být portlandský, nebo hlinitanový. Portlandský slínek je zrnitá látka, která obsahuje kalciumsilikáty. Kromě nich obsahuje také kalciumalumináty a kalciumaluminátferity /více v kapitole o slínkových minerálech/. Portlandský slínek se vyrábí pálením jemně rozemleté homogenní suroviny s vhodným složením při teplotách nad hranici slinutí, která je okolo 1 450 °C /viz kapitola o výrobě cementu/. Obsahuje CaO, SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃. V menších množstvích obsahuje také MgO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, Cr₂O₃, případně další oxidy. [5] [6]

2.1 Historie cementu

Kořeny slova cement je přikládán starověkým Římanům, kteří používali výraz „opus caementicium“ pro zdivo podobné betonu, tedy směsi kameniv pojených vápnem se sopečným popelem, které díky přítomnosti alkalického vápna dosáhlo pucolánové aktivity. [7]

Číňané používali cementové materiály pro spojování bambusů při stavbě svých člunů i Velké čínské zdi. [8] John Smeaton /Velká Británie/ roku vyrobil maltovinu, ze které za tři roky postavil 18 metrů vysoký maják v Eddystonu, jehož světlo bylo rozsvíceno roku 1759. [9]

Roku 1824 byl Johnovi Aspdinovi udělen patent na výrobu portlandského cementu. Název získal na základě vzhledové podobnosti s šedozeleným pískovcem z blízkého okolí města Portland. Tento původně patentovaný cement se od dnešních značně lišil, neboť byla v průběhu výroby neustále zlepšována technologie, včetně vývoje k ostrému pálení v polovině 19. století. *4* Neustálým zlepšováním účinnosti chlazení se dosahuje výhodnějšího poměru minerálů a jejich zastoupení v cementu.

První zmínky o hydraulických maltovinách v Čechách pochází ze spisů alchymisty Bavora ml. Rodovského z Hustiřan /1576-1591/, který uvádí receptury na různé malty a podlahy z cihlového betonu. [5]

2.2 Výroba cementu

Výroba cementu začíná těžbou surovin v lomech a pokračuje výpalem v cementárně.

1/ Těžba a drcení primární suroviny

Suroviny se dělí na hlavní a pomocné. Mezi hlavní suroviny patří vápenec, hydraulické složky (břidlice, jíly, hlíny) a některé přísady (železná ruda, kyzové výpalky). Nejdůležitějšími surovinami pro výrobu portlandského slínku jsou vápenec, jíly, břidlice a jiné horniny. K těmto surovinám se přidávají i korekční suroviny. Materiály se těží v lomech buď clonovými odstřely, nebo pomocí jiné těžké techniky. Suroviny se poté naloží nakladačem na dampr (velkokapacitní nákladní automobil), který převeze surovinu z místa odstřelu k primárnímu drtiči. Primární drcení provede čelistový drtič, za který je zařazen drtič kladivo odrazový. Ten surovinu zdrobní na velikost do 40 mm.

2/ Skladování a homogenizace surovin

Suroviny se skladují v kryté hale (např. Hranice), kde se řídí skladování vhodnou homogenizací a vytvořením několikadenních zásob. Následuje krok nadávkování surovin a společné mletí v kulovém mlýně. Suroviny se tedy mletím zároveň zhomogenizují a připraví se tzv. surovinová moučka. Surovinová moučka se

ve skladovacích silech může pomocí vzduchu dále homogenizovat. Je z nich odebírána pro předeřev, před samotným vstupem do pece.

3/ Předeřev surovinové moučky ve výměníku

Moučka je odebírána ze spodní části sila, a poté je dopravena do horní části výměníku, kde se v jednotlivých cyklonech postupně ohřívá odtahovanými horkými plyny z pece. Při vstupu do rotační pece má již teplotu cca 900 °C.

4/ Výpal surovinové moučky v rotační peci

Rotační pec je ve sklonu uložený válec, který rotuje podél své podélné osy, což způsobuje, že se surovinová moučka pomalu posunuje směrem k plameni hořáku ve spodní části. Pec je opatřena žáruvzdornou vyzdívkou. Plamen hořáku moučku při posunu plynule ohřívá až na mez slinutí /tj. přibližně 1450 °C/, kdy se surovinová směs přemění na slínek ve tvaru drobných šedých koulí.

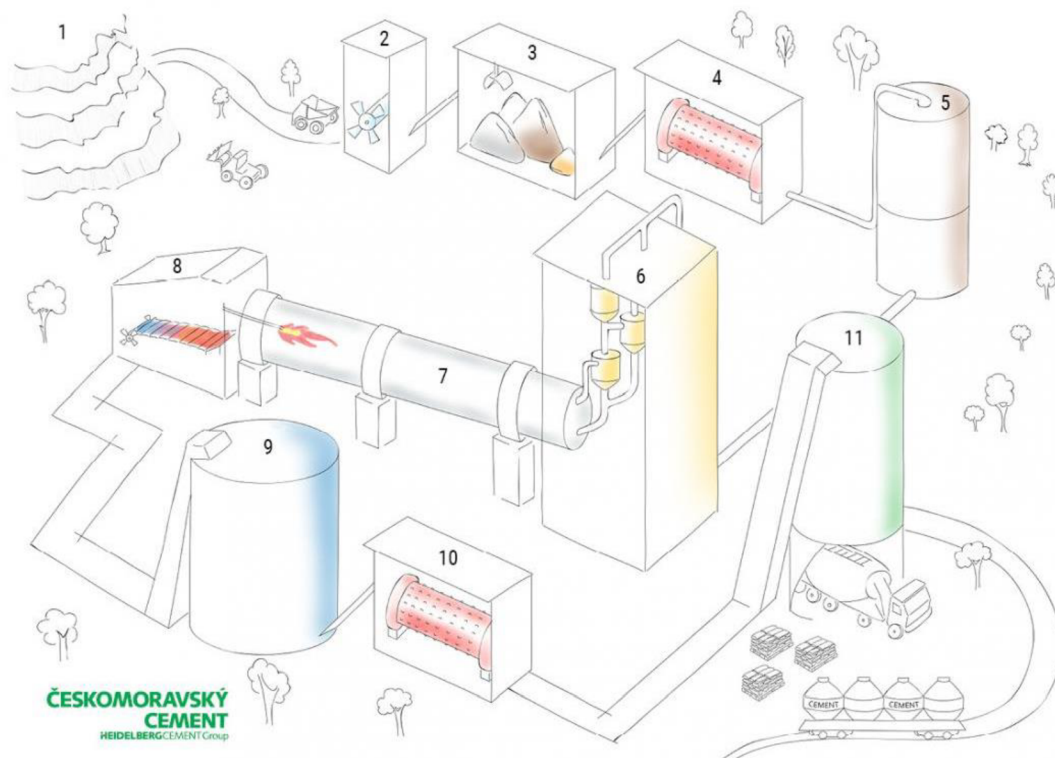
5/ Chlazení, drcení a skladování slínku

Horký slínek, který padá z rotační pece, se musí rychle ochladit, aby v něm zůstaly žádané minerály. Chladí se například v roštovém chladiči, proudem studeného vzduchu. Po ochlazení se drtí na velikost do 50 mm. Ochlazený a podrcený slínek je dopraven do zásobního slínkového sila, odkud je dávkován dle potřeby do cementových mlýnů.

6/ Mletí slínku, skladování a expedice cementu

Slínek se společně se sádrovcem a popřípadě i dalšími složkami /dle druhu cementu - vápenec, vysokopeční struska atd./ společně pomele v kulovém mlýně - vzniká cement.

Namletý cement se skladuje v cementových silech, odkud se expeduje cisternami jako volně ložený - autocisterny, železniční cisterny. Nebo se na balící lince balí do papírových pytlů s vnitřní PE vložkou, je srovnán na palety a expedován. [10]



Obrázek 2: Schéma výroby cementu v cementárně, Českomoravský cement [10]

2.3 Slínkové minerály

Slínek je směs různých vápenatých silikátů, aluminátů, feritů. Je zde přítomnost i dalších fází a také jejich tuhé roztoky, ve slínku je obsažena i nevykrytalovaná amorfní část.

Mineralogické složení slínku, tj. přítomnost a vzájemné zastoupení tzv. slínkových minerálů, má zásadní vliv na konečné vlastnosti slínku a poté i samotného cementu. V portlandském slínku bylo doposud popsáno více než 25 minerálních fází [6], rozhodující význam pro vlastnosti cementu však mají zejména tyto čtyři hlavní sloučeniny [11]:

- $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (zkráceně označované jako C_3S , resp. Trikalciumsilikát)
- $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S , resp. Dikalciumsilikát)
- $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A , resp. Trikalciumaluminát)
- $\text{C}_2\text{F} - \text{C}_{12}\text{A}_7 - \text{CaO}$ - průměrně je zastoupen jako
- $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF , resp. jako Tetrakalciumaluminátferit)

Kromě těchto, čistě minerálních fází, se ve slínku rozlišují tzv. technické minerály – alit, belit a celit. V technické praxi se většinou klade rovnítko mezi C_3S a alitem, C_2S a belitem a C_4AF a brownmilleritem /zkráceně označován jako celit/. [12]

| Vlastnost | C_3S | C_2S | C_3A | C_4AF |
|--------------------|-------------------------------------|---|---|---|
| Rychlost hydratace | Vysoká | Mírná, ovlivněná rychlostí chlazení a přítomností cizích oxidů ve struktuře | Vysoká, je třeba přidat sádrovec jako regulátor | Nízká |
| Pevnost | Vysoká počáteční pevnost | Vysoká konečná pevnost | Podporuje vývoj počátečních pevností | Velmi nízká |
| Hydratační teplo | 500 kJ/kg | 250 kJ/kg | 860 kJ/kg | 420 kJ/kg |
| Zvláštní znaky | Hlavní nositel pevnosti v p-cementu | Pro vývoj pevností je rozhodující modifikace $\alpha' > \beta$ | Ovlivňuje síranovou odolnost, vysoký vývin tepla na počátku hydratace | Dodává slínku a cementu typické zbarvení (díky MgO šedozeleň) |

Tabulka 1: Soupis slínkových minerálů a jejich vlastnosti [13]

2.3.1 Alit

Alit je nejdůležitějším slínkovým minerálem. Obsah Alitu ovlivňuje rychlost tvrdnutí, hydratační teplo a pevnosti, zejména počáteční, cementu. Alit se vyznačuje velkou reaktivností, která se projevuje rychlým nárůstem pevností a značným vývinem hydratačního tepla.

2.3.2 Belit

Belit se vyznačuje pomalejším, ale déletrvajícím růstem pevnosti a menším vývinem hydratačního tepla.

Alit a Belit představují hlavní slínkové složky, jejichž obsah je obvykle 75 - 85 % z hmotnosti ve slínku.

2.3.3 Trikalciumaluminát

Spojovací hmota mezi krystaly Alitu a Belitu je tvořena zejména aluminátovou a ferrialuminátovou fází. Mezerní hmota představuje obvykle asi 20 - 25 % objemu slínku. Aluminátová fáze je ve slínkách reprezentována zejména sloučeninou C_3A . Trikalciumaluminát se vyznačuje zvýšenou reaktivností s vodou, rychlým tuhnutím a tvrdnutím, proto se ke slínku při mletí přidává sádrovec jako regulátor tuhnutí (viz kapitola hydratace slínkových minerálů), a rychlým vývojem hydratačního tepla. Větší obsah C_3A nepříznivě ovlivňuje odolnost portlandského cementu vůči síranovým vodám a má vliv také na objemové změny cementu.

Celit - Tetrakalciumaluminátferrit

Ferrialuminátová fáze je představována zejména tetrakalciumaluminoferitem – C_4AF . Tato složka bývá v technické praxi často označována přímo jako celit nebo brownmillerit. Vyznačuje se pomalejším růstem pevností a nižším vývinem hydratačního tepla. [14]

2.4 Znečištění z výroby cementu

Při výrobě každé tuny portlandského slínku dochází k uvolnění přibližně **jedné tuny oxidu uhličitého do ovzduší**. Na celém světě se každý rok vyrobí zhruba 2,5 miliardy tun cementu, a stavebnictví se tak podílí zhruba pěti procenty na celkových emisích CO₂. [15]

Při výrobě slínku se horniny obsahující vápenec pálí při teplotách vyšších než 1400 °C. Při tomto procesu vzniká oxid uhličitý, který uniká do ovzduší spolu se spalinami.

Další emise CO₂ vznikají při spalování paliv při vyhřevu pece/materiálu na velmi vysokou teplotu. Emise CO₂ se odhadují na 900 až 1 000 kg/t slínku při měrné spotřebě tepla 3 500 až 5 000 MJ/t slínku (v závislosti na typu paliva). Dále vznikají další skleníkové plyny, včetně NO_x. /Skleníkové plyny jsou plyny, vyskytující se v atmosféře Země, které nejvíce přispívají k tzv. skleníkovému jevu (efektu). Nejvýznamnější skleníkové plyny přirozeného původu jsou vodní pára, oxid uhličitý, metan a oxid dusný. [16]/ Emise ze spalování je možné redukovat pomocí alternativních paliv.

Dále je možné používat vstupní suroviny, které nemají atomy vápníku Ca vázané ve sloučeninách/sloučenině, která při rozkladu bude produkovat nějaký škodlivý skleníkový plyn (pára je zřejmě přípustná).

3 PŘÍMĚSI DO BETONU

Pokud uvažujeme o využití recyklátu do betonu, může jemně mletý recyklát nahradit část cementu a působit jako příměs typu II, nebo jako příměs typu I, pokud se neprojeví jako aktivní role.

Příměsi jsou většinou práškovité látky omezené velikostí zrn /do 0,250 mm/ přidávané do čerstvého betonu nebo malty za účelem zlepšení některých vlastností nebo k docílení zvláštních vlastností. Dělí se na dva typy:

- I. inertní příměsi - (typ I.) - pigmenty a filery a další.
- II. pucolány nebo latentně hydraulické látky (typ II.).

Latentní hydraulická je schopnost látky v alkalickém vodném prostředí (například přítomnost Ca(OH)_2) tvrdnout za normálních podmínek. Podobné vlastnosti mají pucolánové látky, které se vyznačují vysokým obsahem aktivního SiO_2 a podmínkou chemické reakce je alkalické prostředí roztoku vytvářené jinými chemickými sloučeninami, které nazýváme budiče hydraulicity.

Mezi příměsi typu II patří diatomity, opál, křemičité úlety, mikrosilika, pálené hlíny, popílký, struska, látky obsahující sopečné sklo tzn. tufy, sopečné sklo, trasy. [17]

4 RECYKLÁT

Recyklované kamenivo z betonu má všeobecně horší křivku zrnitosti než přírodní kamenivo, zvláště než těžené. Drcením recyklátu vzniká především kamenivo s jiným poměrem hrubého a drobného, velký je obsah jemných podílů. Je to zapříčiněno i jiným drtícími zařízeními, než jaké se používají pro drcení přírodních kameniv. Výsledkem je zejména odlišný tvarový index a rozložení hlavní velikosti zrn v cílové frakci.

Recyklovaný beton navíc může být znečištěn organickými i anorganickými nečistotami, jako textiliemi, polymery, alkáliemi, bahnem (nebo zeminou, znečištění jíly a humusovými látkami /může způsobit retardace tuhnutí betonu, prokluz výztuže/). Z chemického znečištění lze očekávat frakce hlinitanového betonu, sírany, chloridy, kamenivo vyvolávající ASR. Cizorodé složky se zjišťují dle normy na stanovení cizorodých částic v recyklátu (ČSN EN 933-11 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - část 11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva).

Tyto negativní vady lze minimalizovat pečlivým tříděním při demolici konstrukce a správným zatříděním při přejímce v místě odevzdání sutin. Při úpravě na recyklačních linkách je vhodné mít zpevněný a očištěný povrch ploch - například panely, vybetonované plochy atp.

Odpadní beton tvoří velký podíl mezi stavebními odpady. Ve formě drti se beton používá na:

- zásypy a obsypy, například inženýrské stavby,
- pro podkladní vrstvy vozovek
- větší frakce jako kamenivo
- frakce <4 mm
 - primárně (ze stavby) - někdy znečištěno
 - bez většího využití -> zásypy/skládkování
 - sekundárně (podsítné při drcení) - čistější
 - zásypy,

- kamenivo
- frakce <1 mm jen experimentální využití:
 - termálně aktivovaná náhrada pojiva
 - směs pro výrobu cementu
 - jako součást pojiv na bázi geopolymerů [18].
-

Zrna vzniklá drcením betonového recyklátu mají obecně horší tvar, ale dle mého názoru to není striktní pravidlo - záleží na původu a lomu horniny přírodního kameniva.

- Pro aktivní využití se hledají postupy, aby se zabránilo neefektivnímu využívání (násypy, zásypy), ba dokonce ukládání na skládky. Také se hledají další možnosti účinné aplikace. [19]

Tyto snahy ale musí přijmout fakt, že tento odpadní materiál obsahuje:

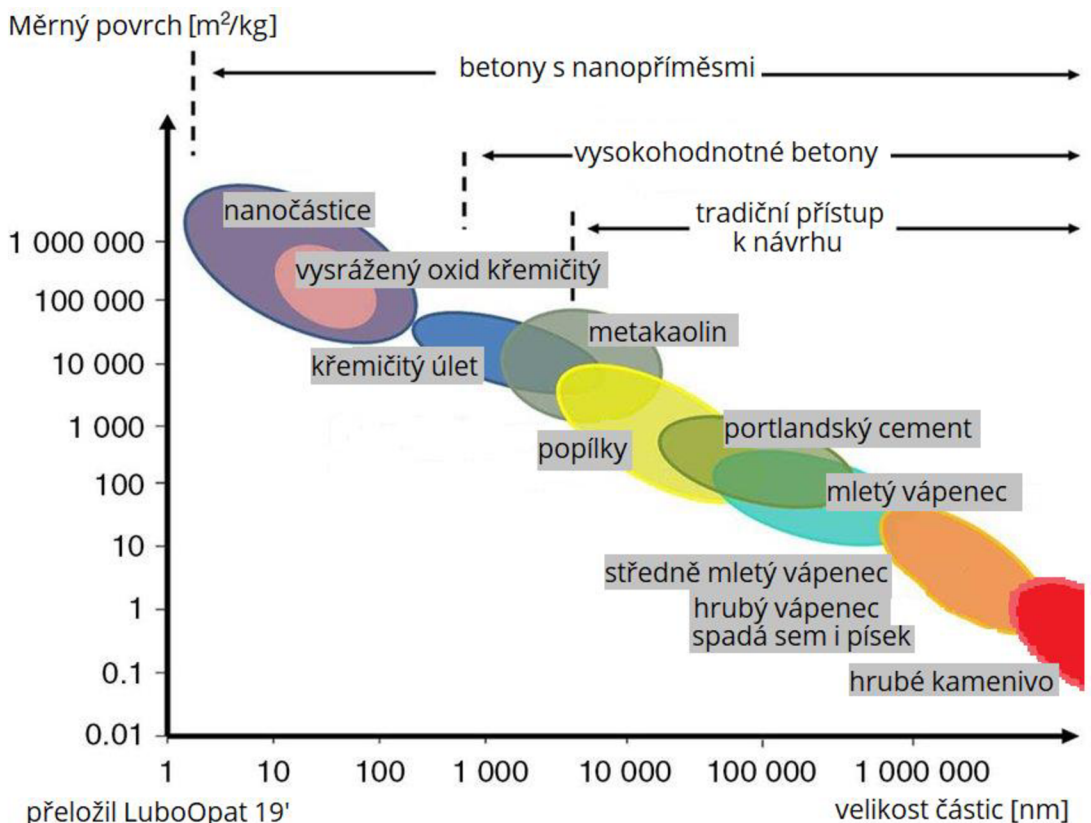
- minerální plnivo,
- hydratované - nereaktivní pojivo,
- nezanedbatelnou část nezhydratovaného pojiva, tzv. zbytkové slínky.

4.1 Jemné podíly do 0,125 mm

Velikost a tvar částic kameniva v betonovém kompozitu je důležitý v rovině hrubých zrn - tvarový index, oblost, vliv na konzistenci směsi - zahrnuje požadavek čerpatelnosti /potřeba tekutosti/, ale hlavně i v rovině jemných podílů.

Vliv na vlastnosti kompozitu (myšleno při zpracování a tuhnutí) má zejména měrný povrch. Při velkém měrném povrchu stoupá spotřeba záměsové vody. Naopak zde lze aplikovat s úspěchem plastifikační přísady. Částice jsou velikostně i hmotnostně malé. (Dnešní gram cementu (v závislosti na jemnosti mletí) obsahuje kolem 330 miliónů zrníček. [20]) A proto může dojít k elektrostatickému odpuzování jemných částic, nejen cementu.

Následující obrázek ukazuje oblasti velikosti částic a jejich měrný povrch.



Obrázek 3: Oblasti velikosti částic a jejich měrný povrch [57]

Jde o to, že velikosti částic odpovídá jejich měrný povrch. Existuje rovnice pro tento vztah, který vypočte z průměru částice její povrch:

$$S = 2\pi \int_a^b f(x) \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx$$

$$\text{a po úpravě: } S = 4\pi r^2$$

Rovnice 1: Povrch koule v závislosti na průměru [58]

| | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| průměr koule [m] | 0,010 | 0,005 | 0,001000 | 0,000100 | 0,000010 | 0,000001 |
| poloměr r [m] | 0,005 | 0,0025 | 0,000500 | 0,000050 | 0,000005 | 0,000001 |
| průměr D [mm] | 10,00 | 5,00 | 1,00 | 0,10 | 0,01 | 0,001 |
| povrch koule So[m ²] | 7,85 x 10 ⁻⁵ | 1,96 x 10 ⁻⁵ | 7,85 x 10 ⁻⁷ | 7,85 x 10 ⁻⁹ | 7,85 x 10 ⁻¹¹ | 7,85 x 10 ⁻¹³ |
| So [mm ²] | 78,54 | 19,63 | 0,7854 | 7,85 x 10 ⁻³ | 7,85 x 10 ⁻⁰⁵ | 7,9 x 10 ⁻⁷ |

Tabulka 2: Povrch koule v závislosti na průměru

Veliký měrný povrch, zvláště pokud je materiál nasákavý /recykláty/, potřebuje na své smočení více vody, která nevstupuje do procesu hydratace, ale působí pouze jako voda pro zachování zpracovatelnosti. Tedy po odpaření vody jsou zde přítomny kapiláry a otevřená pórovitost, které spolu zvyšují nasákavost nového kompozitu. Vysoká nasákavost má následně negativní vliv na trvanlivost kompozitů, zejména na mrazuvzdornost.

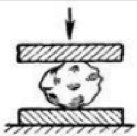
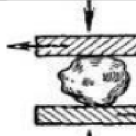
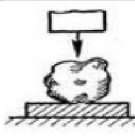
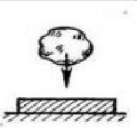
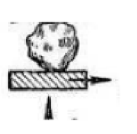
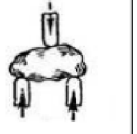
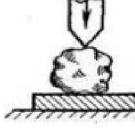
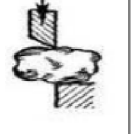
5 VYSOKOENERGICKÉ MLETÍ

Cílem činnosti rozpojování je překonání rovnováhy sil, které jsou uvnitř zrna mleté látky. Jako první důsledek je vznik trhliny od povrchu zrna. Tato trhlina prostoupí celým průřezem zrna a dojde k rozdrčení hrubé částice na několik částic velikostně menších, než bylo původní zrno. Rozpojování je nevratný děj.

Mletí je technologická činnost vedoucí nejen ke zjemňování zrnitosti, ale také ke zvětšení měrného povrchu materiálu. A v neposlední řadě vede také i k otevírání zrn (například dutých cenosfér). Mletím se změň některé fyzikální parametry, získají se jiné, které jsou důležité z hlediska dalšího zpracování materiálu.

K rozpojování částic dojde působením několika typů namáhání. Nejběžněji se používá mechanické předávání kinetické energie částicám materiálu, který je upravován - hovoří se o mletí mechanickém. Pokud použijeme jiné možnosti předání energie, hovoříme například o ultrazvukovém rozpojování, šokovém termickém, elektrické nebo o rozpojení elektro hydraulickém. *39*

I tyto metody jsou využívány (v omezené míře) k rozrušování vhodných látek a ke zjemňování zrnitosti látek pevných, tedy k mletí. V mechanických mlýnech je k zjemňování využito několika základních přetvoření (viz. následující obrázek).

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Tlak | Střih | Tlakový impuls (stísněný úder) | Volný úder |
|  |  |  |  |
| 5 | 6 | 7 | 8 |
| Volný úder + střih | Tah/Ohyb (střih 2) | Štípání | Řezání |
|  |  |  |  |

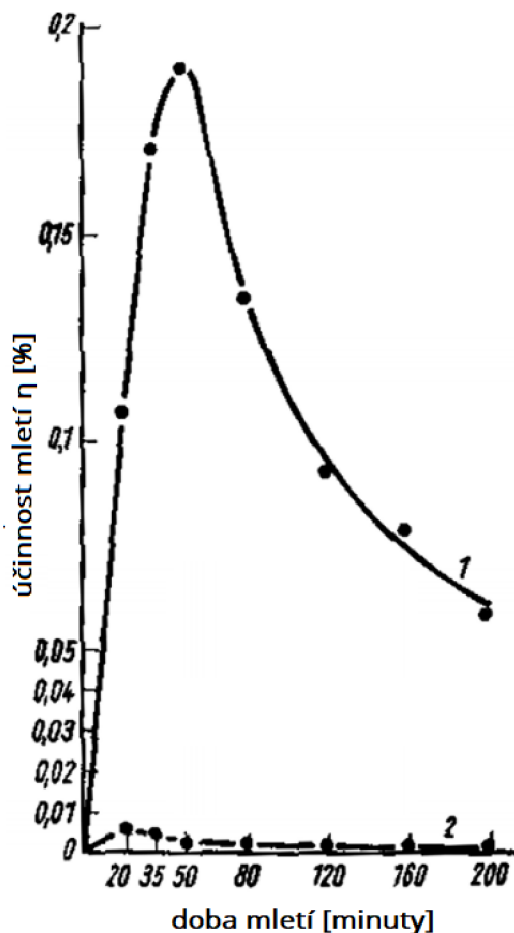
Obrázek 4: Základní mechanizmy mletí [29]

Je nutné rozlišit, zda jestli tato namáhání jsou na hranici pracovních těles a rozpojovaný/zjemňovaný materiál, anebo působí ve vrstvách materiálu mezi pracovními tělesy. Dále namáhání může proběhnout při srážce částice a pracovního tělesa, srážky částice - částice, srážka s médiem a částicí (srážka s prostředím). [21], [22]

V klasických mlýnech (kulové mlýny, prstencové, tyčové, kolové, válcové mlýny, mlýny kotoučové a vibrační) jde o mletí za pomoci principu 1, 2, 3; je zde působeno na částice, nebo na vrstvu částic mezi mlecími tělesy.

5.1 Účinnost mletí

Použití mechanismů 1-3 je z hlediska energie obvykle málo efektivní, protože před rozmělněním musí být překonána adheze mezi mlecím zařízením a nebo mezi částicemi látky ve vrstvě. Pak musí částice projít fází plastické deformace. Protože ke kontaktu mlecích těles a částic upravovaného materiálu dochází při relativně malých rychlostech, dokáže vnitřní struktura část energie vykompenzovat (svou pružností, dvojčatění (souměrnost zrn) atd. [23] Tyto procesy vedou k tomu, že se převážná část vložené energie spotřebuje/přemění na teplo a není efektivně využito na zjemnění zrnitosti/zvětšení měrného povrchu. Schrader zkoumal efektivitu mletí [24] a odhadl závislost účinnosti mletí kalcitů η na době mletí. viz (obr. 5).



Účinnost mletí vápence CaCO_3 , η
v závislosti na době mletí
[Schrader a Hoffmann 1973] přeložil LuboOpat 19'

Obrázek 5: Účinnost mletí vápence na době mletí [22]

Na základě prezentovaných grafů lze získat maximální hodnoty

$\eta = 0,19\%$ (1) a $0,006\%$ (2) pro:

1 - celková účinnost mletí,

2 - mlecí účinnost spotřebovaná pro zvětšení měrného povrchu.

Porovnáním těchto hodnot je vidět, že se spotřebují pouze 3% celkové energie na zvětšení měrného povrchu CaCO_3 .

Další nevýhodou těchto mechanismů je, že mají relativně malý kontakt povrchu pracovních těles s částicemi mletého materiálu. Proto jsou tyto mlýny vzhledem ke své produktivitě navrhovány o velkém objemu a velké hmotnosti [25].

Moderní mechanické mlýny také využívají principů 1-3, avšak k porušování dochází při vyšší rychlosti, tedy s vyšší energetickou

účinností. [26] [27]

Mechanismy, které zařízení používá a jeho další konstrukční parametry rozhodují o závislosti efektivnosti zjemňování, mletí. Tato efektivitu se pokoušeli definovat někteří autoři, pomocí teorií, ve kterých používají jako kritéria účinnosti množství spotřebované práce na:

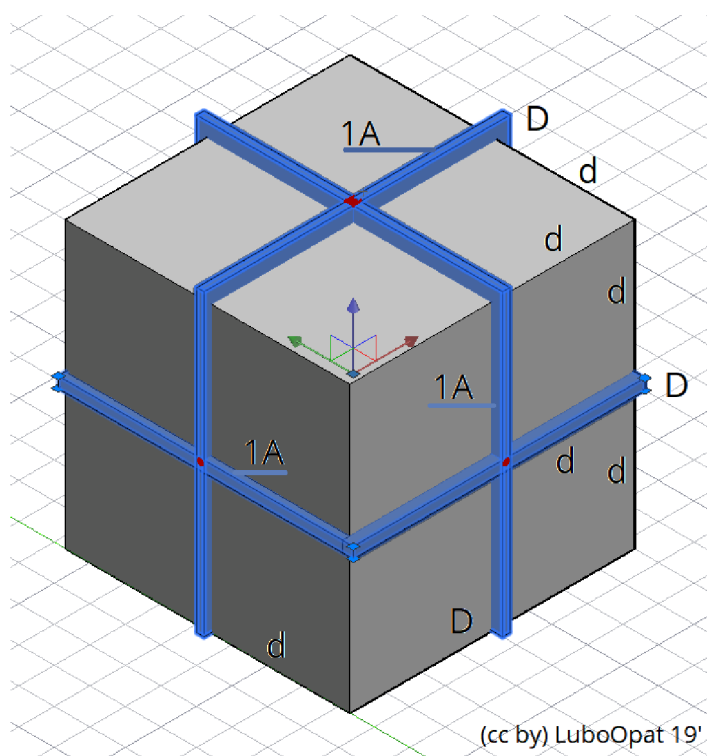
- jednotku nově vytvořeného povrchu, rozměru
- hmotnost částic zjemňovaného materiálu
- nebo na kombinaci těchto dvou veličin

5.2 Teorie popisující mletí

5.2.1 Rittingerova hypotéza

Tato hypotéza vychází z představy, že existuje souvislost mezi velikostí nově vzniklého povrchu a dodanou prací nutnou pro rozpojování. Proto se označuje jako **povrchová hypotéza**.

Nejlépe je možno demonstrovat hypotézu na rozpojování shodně velkých krychlích o jednotkových rozměrech. Práci potřebnou k rozdělení krychle jednou rovinou označíme jako A a nazveme ji jako specifickou práci. Při rozpojení



Obrázek 6: Naznačení lomových rovin na krychli

krychličky o hraně $d = D/2$, kde D je rozměr krychle a d je rozměr rozpojené krychličky, vzniknou **tři roviny** a bude zapotřebí práce $3A$. Případně vzniknou 3×2 roviny a bude zapotřebí práce $6A$. Viz (obrázek 6).

Obecný vzorec pro práci:

$$A_0 = 3 \cdot A \cdot (n - 1)$$

Rovnice 2: Obecný vzorec pro práci

Pokud práci A_0 vztáhneme na jednotku D^3 , bude platit:

$$\frac{A_0}{D^3} = \frac{3 \cdot A \cdot D^2}{D^3} \cdot \left(\frac{D}{d} - 1 \right) = \frac{3A}{D} \cdot (n - 1)$$

Rovnice 3: Práce na jednotku rozměru původní krychle

Při rozpojování je energie vztažena na jednotku objemu nepřímo úměrná velikosti vstupních částic D . *Spotřeba energie pro rozpojování jemného materiálu při stejném stupni rozpojení n bude větší než u hrubého materiálu.* [28]

Rovnice pro různý stupeň rozpojení:

$$\frac{A_{p1}}{A_{p2}} = \left(\frac{n_1 - 1}{n_2 - 1} \right)$$

Rovnice 4: Rovnice popisující různý stupeň rozpojení

Ritinger ale naprosto zanedbává adsorpci energie jak při elastické, tak při plastické deformaci, která převažuje nad spotřebou energie na zjemnění zrnitosti – tedy na vytvoření nového povrchu [22].

Ritingerova teorie přesto nejlépe vystihuje absorpci energie při jemném mletí, tedy procesy, které probíhají při zjemňování materiálu v oblastech zrnitosti pod 0,050 mm = 50 μ m. [29]

5.2.2 Kickova hypotéza

Další hypotéza a zejména experimentální zkoušky této hypotézy dokazují, že hypotéza relativně dobře popisuje **rozpojování velkých částic**, u kterých se uvažuje elastické přetvoření a stupeň rozpojení je malý. Tato teorie nejlépe charakterizuje absorpci energie při drcení, tedy v oblastech zrnitostí nad 5 mm [29]

V provozních podmínkách jsou ztráty jdoucí na vrub deformační práce mnohdy převažující nad vlastní teoretickou spotřebou práce na vytvoření nových povrchů. Hypotéza udává, že rozpojovací práce je úměrná hmotnosti rozpojovaného materiálu. Kick vycházel z představy, že práce pro rozpojení je různá, je-li nově

vzniklá plocha stejná. Vzorec pro deformační práci má tento tvar:

$$A = \frac{1}{2} \cdot F \cdot \Delta l = \frac{1}{2} \cdot F \cdot \frac{F \cdot l}{E \cdot S} = \frac{1\sigma^2}{2E} \cdot V = k_k \cdot V$$

Rovnice 5: Rovnice práce v Kickově hypotéze [29]

5.2.3 Zobecnění hypotéz o rozpojování

Charlesova rovnice rozpojování [r. 957] zahrnuje všechny známé teorie a zobecňuje tyto rovnice rozpojování do podoby dif. rovnice. Charlesova rovnice je definována změnou měrné rozpojovací práce W v závislosti na velikosti zrna U , platí tedy:

$$dw = -C \cdot \frac{du}{u^m}$$

kde: W ... měrná rozpojovací práce

U ... rozměr částic

C ... konstanta úměrnosti

m ... exponent /kde $m=2 - 3/$

Rovnice 6: Charlesova rovnice rozpojování [30]

V průmyslové praxi se pak obecně (pro zjednodušení pochopení) udává spotřeba energie na zjemnění jako poměr hodinového příkonu mlecího zařízení E vztaženého k hodinovému výkonu zařízení Q :

$$E = \frac{e}{Q} \quad [kWh/t]$$

Rovnice 7: Rovnice popisující mletí v běžné praxi [31]

Pro upřesnění podmínek se uvádí obvykle zrnitost (či měrný povrch) upravovaného materiálu před a po mletí.

Otázka spotřeby energie při mletí a také investičních nákladů, a možných úspor spojených s tímto procesem je velmi důležitá, neboť se v celosvětovém měřítku spotřebuje na tyto procesy cca **4-5 % vyráběné energie** [32] [33] a [34].

Energetická náročnost mletí cementu v cementárnách uvádí BC práce Terezy Vigárové [28] že na 1 tunu cementu je potřeba 20 až 30 kWh. Pro snížení spotřeby energie se do cementu přidávají aktivátory/intenzifikátory mletí. Tyto látky /povrchově aktivní látky - například sloučeniny akrylátů - zkrátí (a tím i zlevní) proces až o 35 %. **odkaz na Aktivátory [35]**

5.3 Použitý vibrační mlýn a princip mletí

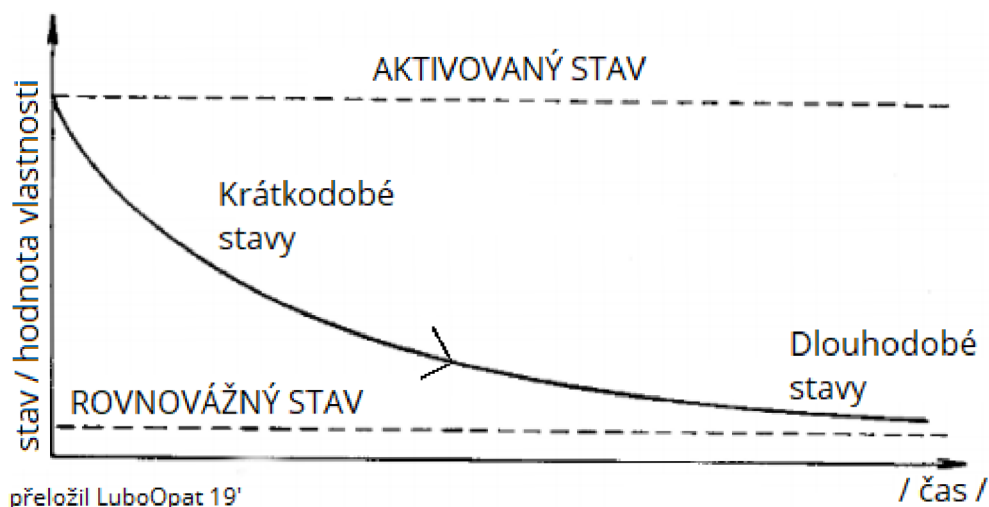
Vibrační diskové mlýny jsou vhodné i pro velmi jemné mletí. K mletí v přístroji dochází pomocí **rázů a tření**. Tyto jevy v mlýnu vznikají působením odstředivé síly na mlecí tělesa a vedou ke vzniku až analytické jemnosti materiálu ve velmi krátkém čase (1-3 minuty). Mlecí tělesa se skládají z mlecího prstence a mlecího disku. Mlecí těleso je k vibrační desce uchyceno pomocí rychloupínací páky. Deska s mlecím tělesem je pak vystavena kruhovým, horizontálním vibracím. Tyto vibrace jsou vytvářeny 3fázovým motorem.

6 TEORIE MECHANICKÉ AKTIVACE

Termín „mechanická aktivace“ byl představen badatelem Smékalem (v roce 1942), který ji považoval za proces, při kterém se zvýší reakční schopnost látky.

U mechanické aktivace látka zůstává chemicky nezměněna. Pokud mechanická aktivace (MA) způsobí změnu ve složení nebo struktuře materiálu, jedná se o mechanicko-chemickou (MchA) aktivaci. V tomto případě mechanická aktivace předchází reakci a nemá žádné působení během této reakce. MchA je definována jako odvětví chemie, které se zabývá fyzikálně-chemickými změnami v látkách ve všech stavech agregace vlivem mechanické energie. [28] Definice mechanické aktivace, jež byly zveřejněny i dalšími autory, byly vždy odvislé od pozorovaného materiálu/účinku. [22] K určitému sjednocení přispěl pan Butyagin (v roce 1984). Uvažoval chování pevných látek vystavených působení mechanické energie z pohledu tří hlavních faktorů:

- strukturální neuspořádanost (structural disordering)
- strukturální relaxace (structure relaxation)
- strukturální mobilita (structural mobility).
- Za reálných podmínek ovlivňují reaktivitu pevné látky tyto tři faktory synergicky. MA je definována jako zvýšení reakční schopnosti v důsledku stabilních změn v pevné struktuře (Butyagin roku 1984). Strukturální relaxace však hraje důležitou roli v mechanické aktivaci. Lyachov (roku 1993) publikoval zobecněnou relaxační křivku pro aktivované pevné látky, kde jednotlivé části křivky odpovídají procesům s různými charakteristickými dobami odležení materiálu (obr. 7) [22]



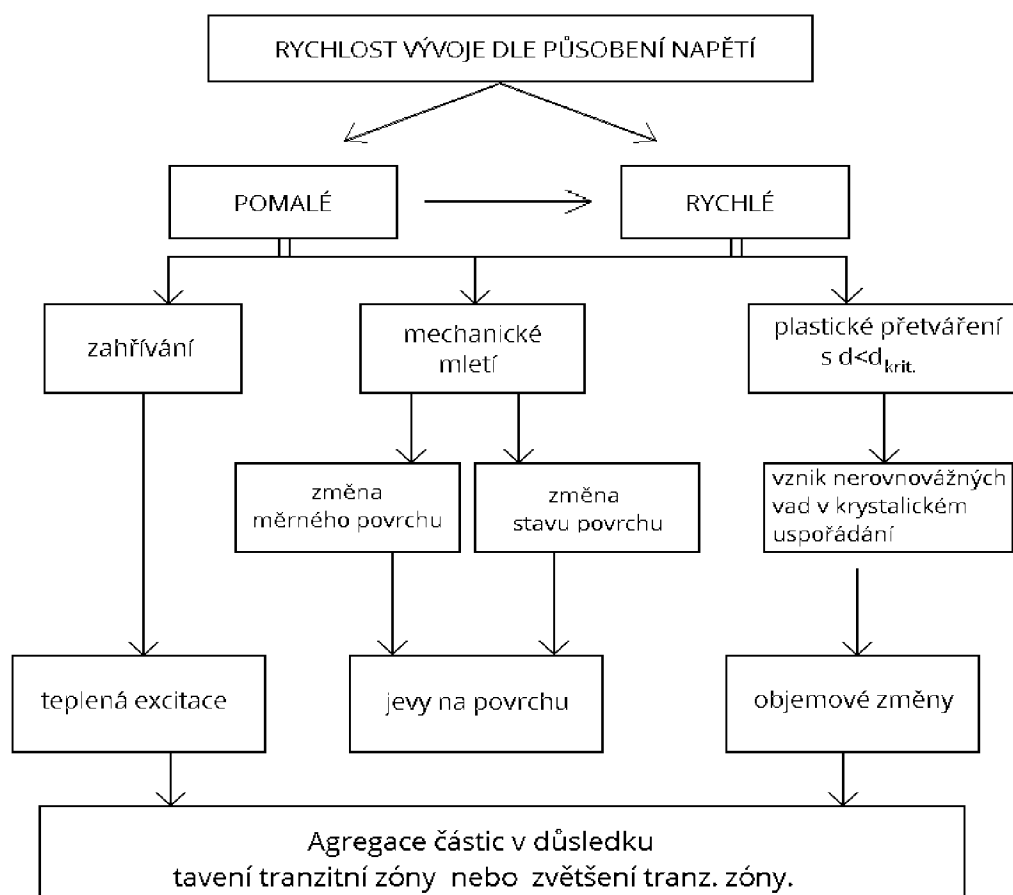
Obrázek 7: Zobecněná relaxační křivka mechanicky aktivované látky (Lyachov 1993) [22]

Touto teorií není možné ovlivnit reaktivitu aktivovaných pevných látek prostřednictvím stavů, jejichž relaxační doba je kratší než charakteristická doba samotné reakce /myšleno ztráta aktivovaného stavu/. Naopak některé stavy s dlouhou životností (např. změna měrného povrchu) mohou být považovány za konstantní v průběhu reakce a jejich vliv by měl být předmětem studií MA.

Co se týče druhů relaxačních procesů, byly popsány různé procesy:

zahřívání, vytváření nových aktivních povrchů (povrchů nukleace), agregace (shlukování), rekombinace (změna v uspořádání), adsorpce (hromadění na povrchu jiné látky), snížení nedokonalostí látky/stavu, chemická reakce mezi sousedními částicemi atd. (Boldyrev r. 1986; Juhasz a Kollath r. 1993).

Rychlost těchto relaxačních procesů se může výrazně lišit a procesy se mohou měnit z jednoho způsobu relaxace na druhý (pochody popisuje obr. 8 na další straně).



Vývojový diagram změn relaxačních procesů [Boldyrev 1986] - přeložil LuboOpat 19'

Obrázek 8: Vývojový diagram změn relaxačních procesů (Boldyrev r. 1986) [22]

6.1 Mechanická aktivace jako proces

Takto může být mechanická aktivace považována za vícekový proces se změnami (energických) parametrů a množství akumulované energie aktivovaných pevných látek v každém kroku aktivace.

- akumulace defektů (the accumulation of defects),
- amorfizace (změna na amorfní strukturu) (amorphization),
- tvorba metastabilních polymorfních forem (the formation of metastable polymorphous forms),
- chemické reakce (chemical reaction).

Tyto procesy jsou autory (Boldyrev a Tkáčová roku 2000) spojeny pod pojmem „mechanická aktivace“.

Juhasz navrhl, že procesy pod pojmem mechanické aktivace se mohou rozdělit na primární a sekundární:

- **Primární proces** (např. zvýšení vnitřní a povrchové energie, zvětšení měrného povrchu, snížení energie při soudržnosti pevných látek) obecně zvyšuje reaktivitu látky.
- **Sekundární procesy** (např. agregace, adsorpce, rekrystalizace) probíhají spontánně v aktivovaných systémech a mohou se objevit i během mletí nebo i po dokončení mletí.

(Juhasz r. 1974, r. 1985, r. 1998; Juhasz a Kollath 1993).

- Chemické interakce mezi pevnými látkami probíhají spotřebou vstupních surovin a tvorbou produktů. Tyto procesy probíhají v souladu s fyzikálně-chemickými zákony a lze je charakterizovat pomocí základních termodynamických rovnic. Podle Gibbse a Helmholtze se drží rovnice:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

kde: ΔG ... Gibbsova volná energie,

ΔH ... je entalpie a

ΔS ... je entropie systému.

Rovnice 8: Rovnice Gibbsovy energie

Jestliže entropie ΔS je malá (krystalová struktura je (většinou) zachována a její porušení jsou malá), nabývá část $T \cdot \Delta S$ malé hodnoty,

a tedy Gibbsova volná energie ΔG je určována převážně změnou entalpie ΔH .

U vysoce nesourodých pevných látek se entropie ΔS stává významnou a část $T\Delta S$ již nelze vynechat.

Hlavní možnost, že dojde k jedné nebo druhé chemické reakci, je určena znaménkem členu ΔG . Podle zákonů termodynamiky se proces vyskytuje spontánně ve směru snižování volné Gibbsovy energie.

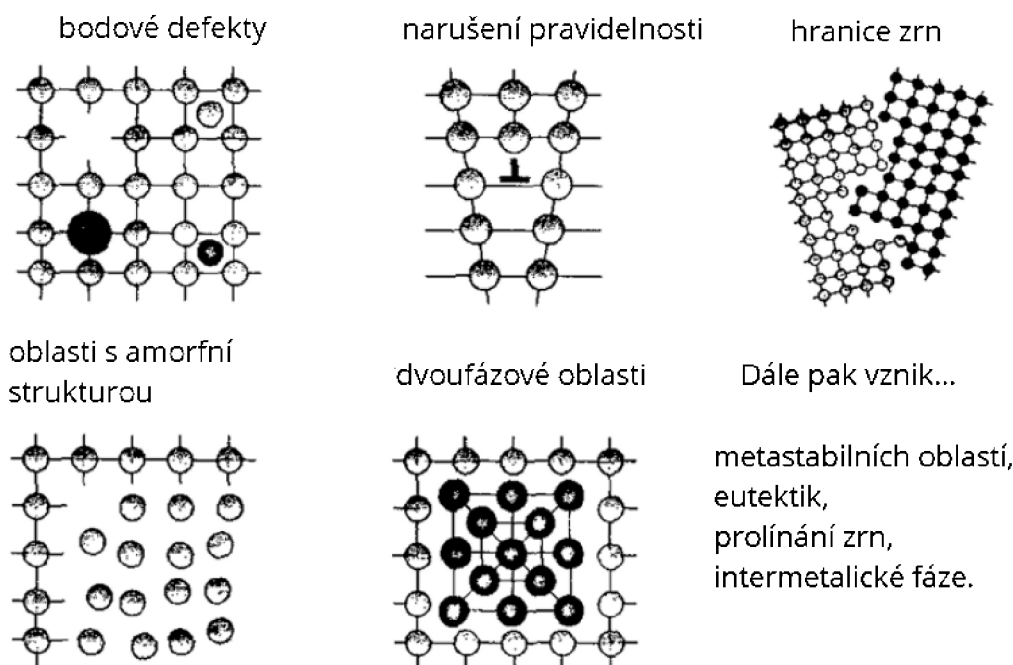
Reakce mezi látkami pokračuje při tvorbě produktů, pokud je splněna rovnice

$$\Delta G_{reakce} = \sum \Delta G_{\text{konečné produkty}} - \sum G_{\text{výchozí látky}}; \text{ kde } \Delta G < 0$$

Rovnice 9: Reakční rovnice vyjádřena Gibbsovou energií [22]

a zaujímá vratný směr, pokud $\Delta G > 0$. V případě, že je systém v rovnováze, tak je ΔG rovno nule.

Interpretace vztahu mezi stavem pevné látky před a po mechanické aktivaci vyžaduje popis pomocí všech dat, která jsou k dispozici. Na rozdíl od plynů a kapalin nemohou být tyto pevné částice charakterizovány pouze několika termodynamickými faktory souvisejícími s těmito stavy. I při teplotě absolutní nuly /0 °K/ mají aktivované pevné látky konečnou entropii zvýšenou o způsobené poruchy v krystalickém uspořádání. Vnitřní termodynamické rovnováhy je dosaženo až nad teplotou tání. Stav jakékoli nižší teploty značně závisí na předběžném zpracování /např. druh, intenzita a trvání mechanického namáhání/. Druh a koncentrace různých defektů (obr. 9) [22] které z toho vyplývají, určují termodynamický stav pevné látky [Heegner, 1989].



Vady vzniklé mechanickou aktivací pevných látek [Hoffmann a kol. r. 2005]

Přeložil LuboOpat 19'

Obrázek 9: Vady vzniklé mechanickou aktivací pevných látek [22]

Novou definici aktivované pevné látky uvedl Huttig roku 1943. Definoval tento stav jako termodynamicky a strukturně nestabilní uspořádání při teplotách, která je vyšší než teplota tání (pův. a thermodynamically and structurally unstable arrangement at temperatures exceeding the melting point). A aktivovaný stav charakterizoval „zbytkovou“ Gibbsovou energií ΔG :

$$\Delta G = G_T^* - G_T$$

kde: G_T^* ... volná entalpie aktivované pevné látky

G_T ... volná entalpie neaktivované látky,

kde: T ... je teplota posuzovaného stavu

Rovnice 10: Gibbsova entalpie [22]

Gibbsova energie ΔG byla analyzována několika autory a byla odvozena zjednodušená formulace:

$$\Delta G = \Delta G_1^* + \Delta G_2^*$$

kde: ΔG_1^* ... zbytková povrchová energie

ΔG_2^* ... energie od vzniku vad ve strukturním uspořádání.

Rovnice 11: Zjednodušená formulace Gibbsovy energie [22]

To platí pro povrchovou energii v termodynamice

$$\Delta G_1 = \sigma \Delta S$$

kde: σ ... měrná povrchová energie

ΔS ... energie uchovaná ve změně celkového povrchu pevné látky.

Rovnice 12: Povrchová energie při změně povrchu látky

Pro mechanickou aktivaci iontových krystalů bylo odhadnuto, že povrchová energie ΔG_1 odpovídá přibližně 10 % celkové Gibbsovy energie ΔG [uvedli autoři Schrader a Hoffmann r. 1973]. [22]

6.2 Limit mletí

Existence limitu při mletí je problém, který je spojen s mletím na jemný prášek. Experimentální studie [36] ukazuje, že částice, které jsou větší než určitá mezní hodnota, se zlomí, jsou-li vystaveny dostatečně intenzivnímu namáhání. Zatímco menší částice podléhají pouze plastické deformaci [Schbnert, 1982, 1990]. Povahu tohoto jevu lze vysvětlit pomocí konceptů přenesených z fraktografie.

U polykrystalických kovů je již dlouho známa tzv. tvárno-křehká přeměna. Pokud je velikost zrn větší než určitá velikost (velikost tvárno-křehkého přechodu), kovový vzorek selže v důsledku křehkého lomu. Pokud jsou zrna menší než tato velikost, je vzorek podroben tvárnému (nebo tažnému) lomu. Analogie s křehko-tvárným přechodem při jemném mletí je zřejmá. *Typy zlomů jsou uvedeny v kapitole 6.4. a na připojených obrázcích v této kapitole.*

Má-li mechanická energetická relaxace v zrnech polykrystalu stejnou povahu jako v částicích prášku, je mez mletí totožná s velikostí tvárno-křehkého přechodu.

Analýza fyzického pozadí napětí na polykrystalech ukazuje, že existence tvárno-křehkého přechodu je způsobena hlavně skutečností, že mezikrajová hranice je nejsilnějším blokem pro dislokaci v těle zrna [Goldberg a Pavlov r. 1990]. Protože se ošetření ve většině mlecích zařízení provádí napětím na materiálovém loži, zdrobňování/mletí a aktivace jsou způsobeny napětím při mezičásticových kontaktech [Schönert r. 1990]. Při projednávání limitu mletí je třeba mít na paměti další možný důvod.

Napětí potřebné k rozbití malé částice může být poměrně vysoké, zejména pokud je materiál vysoce pevný. Na druhé straně je zřejmé, že mechanické rázy v mlýnu jsou omezeny intenzitou.

Tento limit je určen konstrukcí mlýna a jeho provozním režimem. Pokud v zařízení chybí nárazy dostatečné intenzity, nelze materiál dále brousit; velikost částic je však stále větší než velikost tvárného a křehkého přechodu. [36]

6.3 Vztah mletí a mechanické aktivace

Když se způsob mechanické relaxace změní z křehkého lomu na tvárnou poruchu, rozsah napětí se dramaticky zvýší - z 0,1 - 0,3 % na 30-100 % [McLean r. 1965]. To ukazuje, že v částicích dochází k intenzivnímu narušování. Pohyblivé a vzájemně se ovlivňující narušení mohou zase způsobit vady jiného druhu, takže lze očekávat, že zpracování od drcení/mletí do plastické deformace je doprovázeno růstem deformací struktury [Schiinert r. 1990; Goldberg a Pavlov r. 1990]. Ve skutečnosti se zastavení růstu potřebné energie často časově shoduje s časem podstatných změn struktury [Pavlukhin a Boldyrev r. 1988].

6.3.1 Deformace struktury jako mechanická aktivace

Deformace struktury může zase významně ovlivnit chemické vlastnosti, takže plastické přetvoření malých částic může být v některých případech považováno za mechanickou aktivaci [Goldberg a Pavlov r. 1990]. Takový druh mechanické aktivace se projevuje hlavně v procesech, které jsou citlivé primárně na celkový stupeň narušení nebo také zahrnují rovnováhu po stránce chemické.

Pro aktivaci je nutné, aby byly splněny dvě podmínky:

- **Za první,** částice by měly být menší, než je velikost přechodu tvárně - křehkého lomu.
- **Za druhé,** aktivační napětí by mělo být vyšší než mez kluzu, což závisí na velikosti částic.
- Pokud výchozí materiál neobsahuje dostatečně malé částice, měly by být vyrobeny rozbitím/mletím. Čas na vytvoření takových částic představuje indukční období z hlediska aktivace.

Druhá podmínka definuje omezení pro vhodné zařízení používané k aktivaci. Aby mohla být aktivace možná, musí částice zažít větší napětí σ^* než při tvárném lomu vs. křehkém lomu. **Pokud jsou nárazy v zařízení slabé, aktivace není možná.** Nicméně je možné změnit provozní režim zařízení takovým způsobem, že mlecí

účinnost se zvyšuje; tato změna může vést k aktivaci. Tento jev je znám jako „prahový efekt“ (pův. threshold effect) [Pavlukhin a Boldyrev r. 1988]. [36]

6.3.2 Kinetický popis mechanické aktivace (kinetic description of activation)

Popis kinetiky MA je spojen s problémem popisu pohybu/zpracování v mlecím zařízení. Když se uvažuje o hrubém mletí, používá se obvykle koncept lomové energie (pův. breakage energy) [Schonert r. 1982]. Je zřejmé, že to není správné, pokud je účelem mletí jemné, nebo dokonce aktivace za pomoci mletí. Stejná energie by měla být dodána ve formě mnoha slabých nárazů/srážek než několika málo velkými nárazy/srážkami.

Pokud je však napětí způsobené rázem nižší než napětí na mezi kluzu (nebo lomové napětí v případě jemného mletí), jakékoliv množství této energie nepůsobí požadovaný účinek mletí.

Nerovnost energie prezentovaná ve formě různých napětí nás nutí zavést distribuci dopadů mlecího napětí v zařízení $f(\sigma)$, místo charakteristik energie.

Použitím tohoto rozdělení může být frekvence nárazů pro chtěnou aktivaci vyjádřena prostřednictvím charakteristik zařízení: a to tak, že:

$$P(r) = \omega_k \int_{\sigma_t(r)}^{\infty} f(\sigma) d\sigma$$

kde: ω_k ... kinematická frekvence dopadů bez ohledu na jejich intenzitu a

$\sigma_t(r)$... je napětí funkcí meze kluzu, jako vlastnost materiálu.

Rovnice 13: Závislost mletí na napětí při mletí [36]

Kinematická frekvence tedy představuje kvantitativní aspekt procesu, zatímco funkce $f(\sigma)$ představuje kvalitativní vlastnosti procesu.

Pro odvození rovnice pro proces aktivace je třeba uvést dvě okolnosti.

Zaprvé, protože se deformace materiálu vytvářeného tvárným lomem podstatně liší od deformací způsobených křehkým lomem, lze počáteční fáze aktivace

považovat za přechod v pevné fázi. Tento předpoklad usnadňuje kinetický popis, protože materiál může být pouze ve dvou stavech, aktivní a neaktivní.

Za druhé, v obecném případě, když částice bude namáhána houževnatými lomy, nebude aktivován veškerý materiál částice, ale pouze jeho část.

Kolik, to může záviset na mnoha faktorech, jako je délka nárazu, množství aktivního materiálu v částici (původně) a samozřejmě na povaze materiálu. Pokud se předpokládá, že aktivní frakce částice je konstantní, K , je rovnice popisující kinetiku aktivace následující:

$$\frac{\partial \alpha(r, t)}{\partial t} = \kappa \{ \varphi(r, t) - \alpha(r, t) \} \omega_k \int_{\sigma_t(r)}^{\infty} f(\sigma) d\sigma$$

Rovnice 14: Rovnice popisující kinetiku aktivace [36]

Je vidět, že kinetika aktivace závisí na kinetice mletí.

6.3.3 Zhodnocení poznatků

Výše uvedené úvahy vedou k následujícím závěrům o vzájemném vztahu mezi aktivací a jemným mletím:

1. Mez mletí je určena tvárno-křehkým přechodem.
2. Počáteční fáze aktivace nahrazují jemné mletí, když se velikost částic blíží limitu jemného mletí.
3. Indukční část aktivace je spojena s akumulací částic menších, než je velikost tvárno-křehkého přechodu.
4. Aktivační schopnost mlecího zařízení je určována četností nárazů, které vyvíjejí dostatečné napětí pro zahájení tvrdého toku malých částic, které se nemohou zlomit.
5. Prahové účinky jsou způsobeny absencí dopadů dostatečného napětí, které způsobí tvrdý tok.

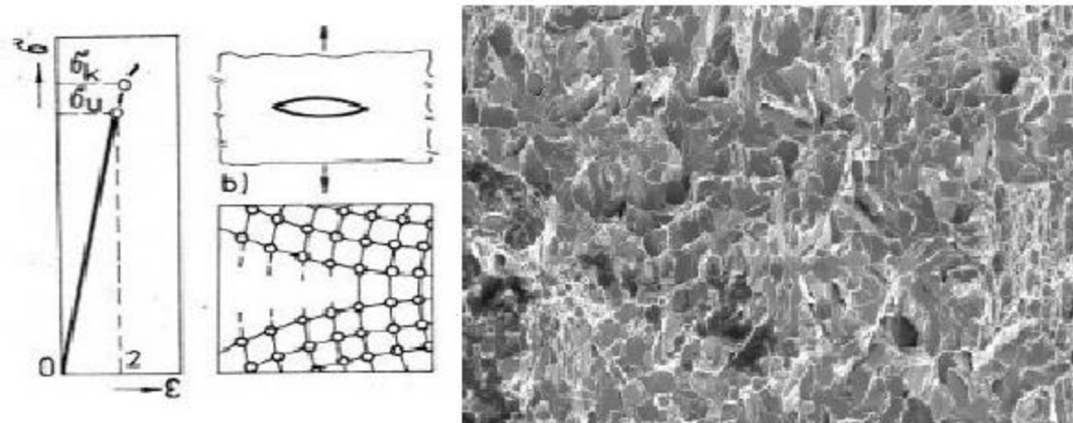
6.4 Druhy lomů látek

Vědní nauka, která se zabývá lomy látek, se nazývá fraktografie. Ta dělí lomy dle energie potřebné k vzniku lomové plochy na křehký a tvárný lom. [37]

6.4.1 Křehký lom (brittle transition)

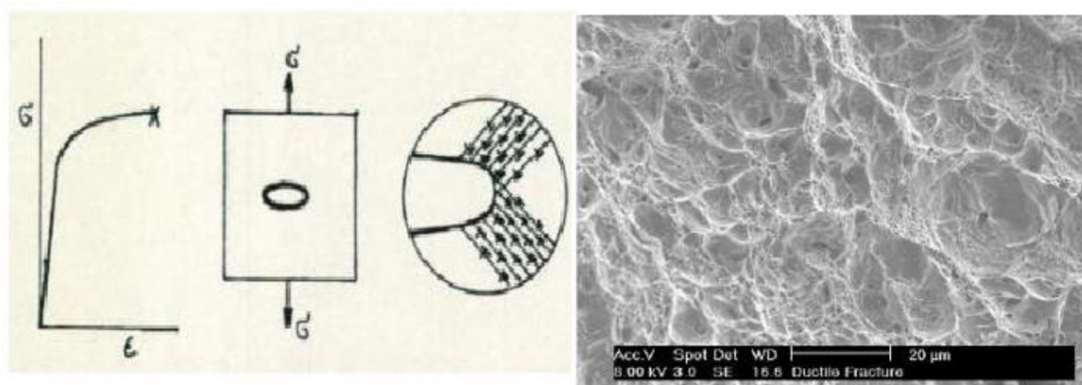
- nízká spotřeba energie na vznik lomové plochy, kde nedochází k výraznému plastickému přetvoření před zlomením. Nastává při menším napětí, než je mez kluzu [38]. [18]

Mikrostrukturu zobrazuje obrázek křehké fraktury, zřejmě úlomek kovu:



Obrázek 10: Schéma vzniku křehkého lomu [37]

6.4.2 Tvárný/houževnatý lom (tough flow)



Obrázek 11: Schéma vzniku tvárného lomu [37]

Houževnatý, nebo také tvárný lom potřebuje pro své přelomení hodně energie, neboť je pro něj charakteristické, že zlomu předchází plastická deformace, nebo přetvoření. Napětí takového přetvoření se plynule mění v lom, jak ukazuje obrázek (obr. 11).

K přechodu z tvárného na křehké porušení tedy dochází, když je mez kluzu stejná (začne být menší) jako křehká pevnost - mez kluzu.

7 POZNATKY Z ODBORNÝCH PUBLIKACÍ VĚNOVANÝCH MECHANICKÉ AKTIVACI

Pro mechanickou aktivaci je třeba využít sofistikovanou technologii, která dokáže obsažené nezhydratované slínky obnažit, a umožnit jejich aktivaci. Poté lze materiál využít při výrobě alternativních cementových pojiv, nebo jako aktivní příměsí.

Článek z odborného časopisu WASTE Fórum hovoří například o technologii vysokorychlostního mletí. Výstupem tohoto mletí je mikromletý recyklovaný beton, kde jsou jednotlivé částice srovnatelné, ba dokonce i menší, než jsou zrníčka standartního cementu.

Do firmy Lavaris, vlastníci takového mlecí zařízení, jsem napsal, konkrétně panu Georg Karra'a a jeho kolegům o podklady či články které bych použil ve své práci. Jako odpovědi se mi dostalo, že jsou chráněné patenty a vnitropodnikovým tajemstvím. Jenž budu respektovat.

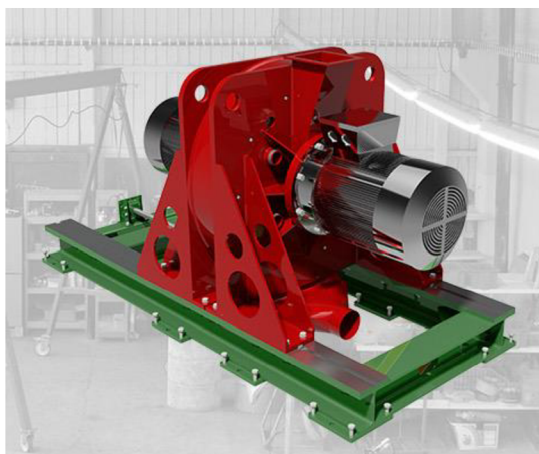
Způsob úpravy recyklovaného betonu je pak schopen nahradit nejen písek, ale i částečně pojivo v cementových kompozitech. Jsou zde však jisté limity náhrady: ukázalo se, mimo jiné, že při náhradě zhruba 30 hm. % cementu dochází k očekávanému /výraznému/ poklesu pevnosti v tlaku, i když pevnost v tahu za ohybu naopak roste. [18], [39]

7.1 Vliv mikromletého betonu a mramorové moučky na vlastnosti cementových past - Experiment I

Srovnání vlivu mikromletého betonu a mramorové moučky na mechanické vlastnosti cementových past

Zdeněk PROŠEK, Jaroslav TOPIČ, Jakub ĎUREJE, Jan TREJBAL [18]

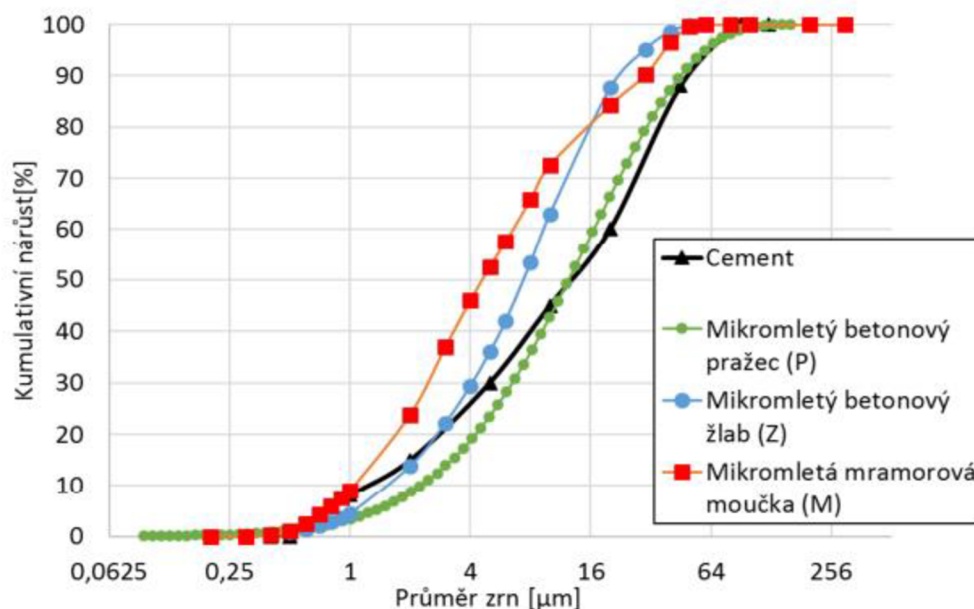
Pro experiment si autoři vyrobili za pomoci vysokorychlostního mlýnu moučku, kterou podrobili zkoumání. Vzorky byly zpracovány pomocí vysokorychlostního mlýnu S1000 firmy Lavaris, s. r. o. (Libčice nad Vltavou, ČR) o výkonu 2×30 kW.



Obrázek 12: Vysokorychlostní mlýn S1000 [59]

Použity byly mikromleté prášky z výrobků:

- staré (zřejmě použité) betonové železniční pražce,
- odvodňovací žlaby zničené při výrobě,
- *porovnání*: mikromletá mramorová moučka - odpadní kal při zpracování vápencového mramoru - lokalita Beroun.



Obrázek 13: Laserová granulometrie v experimentu I [18]

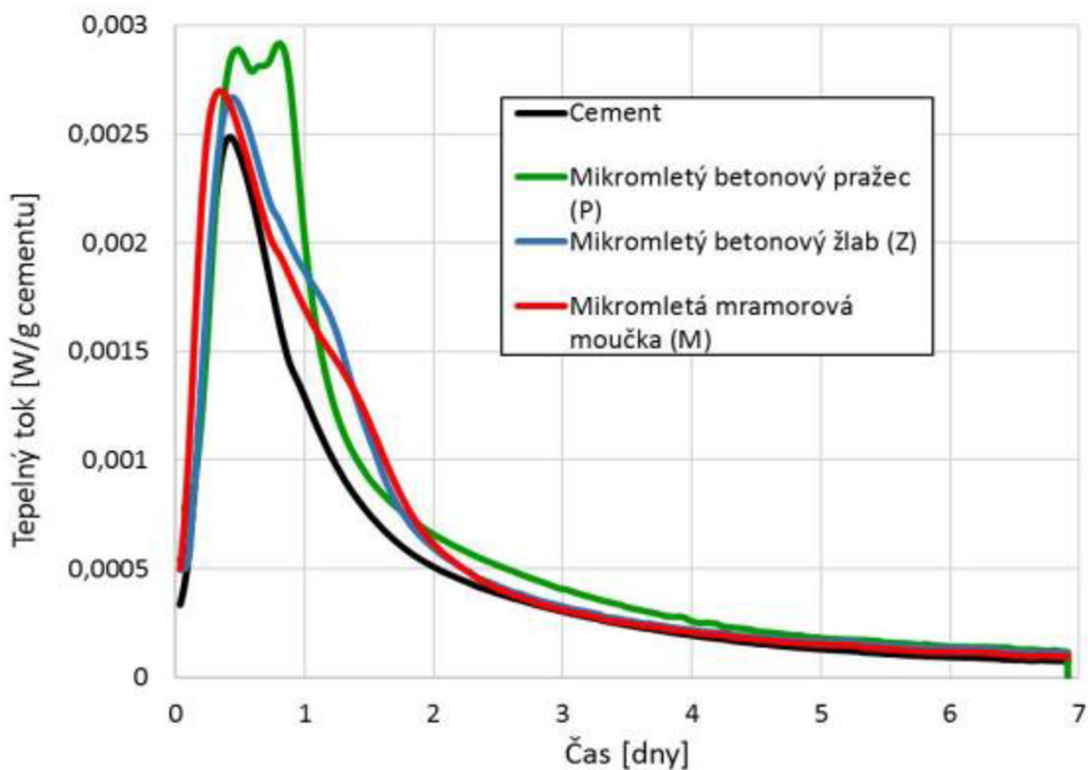
Z grafu laserové granulometrie je vidět, že se autorům podařilo vzorky mikromletého recyklátu namlet tak, že mají srovnatelnou nebo menší velikost zrn než použitý referenční cement. Usoudili pak, že je možné že u původního betonu došlo k rozdrčení cementových zrn, a tedy k odhalení nezhydratovaného jádra. Navíc může mikromletý beton /zejména původní plnivo/ a mramorová moučka fungovat jako mikroplnivo. Nejjemněji byla namleta mramorová moučka (M) a poté betonový žlab (Z). Betonový pražec (P) je namlet podobně jako použitý cement /42,5 R/.

Složení receptur je uvedeno v tabulce č. 3:

| Označení receptury | Složení | | | | Vodní součinitel [-] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Konzis. rozlivem [mm] |
|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------|--|-----------------------|
| | Cement Radotín CEM I 42,5 R [g] | Mikromletý betonový pražec [g] | Mikromletý betonový žlab [g] | Mikromletá mramorová moučka [g] | | | |
| CEM (ref.) | 3000 | 0 | 0 | 0 | 0,35 | 2085 ± 18 | 179 |
| P (pražec) | 1500 | 1500 | 0 | 0 | 0,42 | 1957 ± 3 | 180 |
| Z (žlab) | 1500 | 0 | 1500 | 0 | 0,42 | 1840 ± 8 | 177 |
| M (mramor. kal) | 1500 | 0 | 0 | 1500 | 0,31 | 1760 ± 8 | 180 |

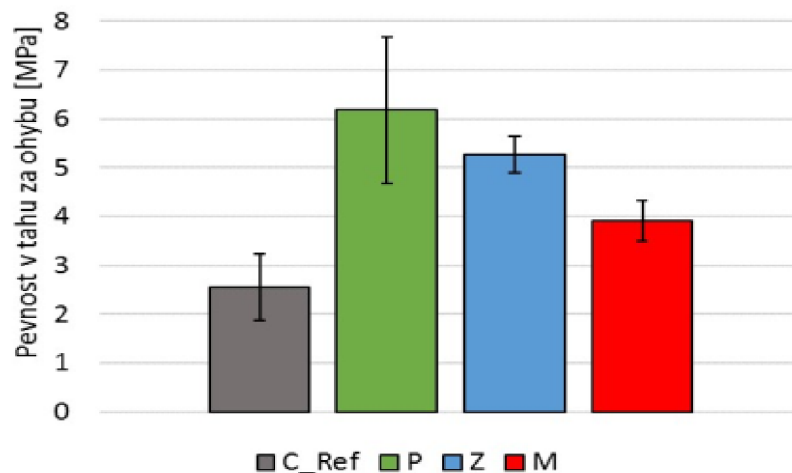
Tabulka 3: receptury v experimentu I [18]

Byla vyrobena tělesa - trámečky 4 - 4 -16 - šest pro recepturu, porovnány pevnosti ve stáří 28 dní, sada šesti trámečků. Sledován byl i vývin hydratačního tepla po dobu sedmi dní (viz. následující obrázek).



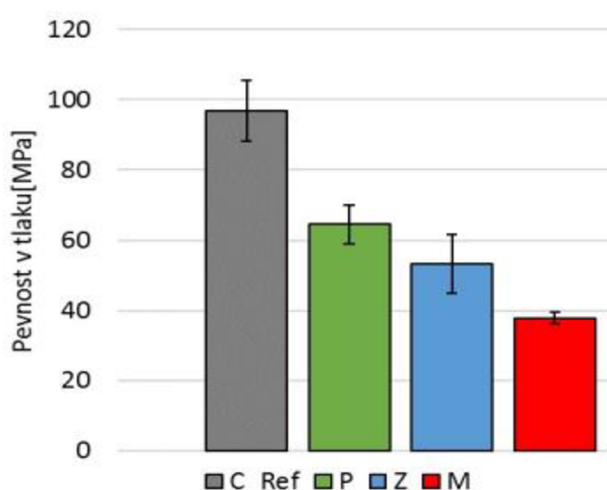
Obrázek 14: Graf tepelného toku v experimentu I [18]

Největšího vývinu tepla dosáhla směs betonového pražce, dále inertní moučka se žlabem. Vývin tepla z referenční směsi (pouze cement) byly o něco nižší. Tým pak odvodil, že směs s pomletým pražcem bude mít nejpříznivější vliv na mechanické vlastnosti.



Obrázek 15: Graf pevností v tahu za ohybu v experimentu I [18]

U pevností v tahu za ohybu je vidět, že u receptur C (ref.) a P (pražec) byly výsledky odchýleny od průměru o více než 0,5, resp. o 1 MPa. Z grafu lze také vyčíst zřejmý kladný vliv na zvýšení pevnosti v tahu za ohybu. V případě vzorků P byla pevnost v tahu za ohybu zvýšena téměř na 250 %. A u vzorků M o 50 % oproti směsi referenční.



Obrázek 16: Graf pevností v tlaku v experimentu I [18]

Pevnost v tlaku je snížena u vzorku P na 70 % a u vzorků M na 40 %. Připomeňme, že bylo použito náhrady 50 % hm. Autoři uvádí, že vyšších pevností v tlaku by bylo možná dosaženo, kdyby byl použit menší množství mikromletého betonu a mramorové moučky v rozmezí od 20 do 30 % hm. Také diskutují, že by bylo vhodné upravit

vodní součinitele pomocí plastifikátorů nebo superplastifikátorů.

Závěr:

Na základě uvedených poznatků lze konstatovat, že použití mletí pomocí vysokorychlostního mlýna má přínos na jemnost mouček. Kladné jsou přínosy na pevnosti v tahu za ohybu, stejně jako se ukázalo v mé praktické práci. Pevnosti v tlaku při použití železničního pražce byly nad mé očekávání. I při 50% náhradě

pojiva bylo dosaženo pevnosti více než 50% tedy index účinnosti přes 1,00/. V mém experimentu jsem dosáhl indexu účinnosti maximálně 74 %, při náhradě 25 % cementu.

7.2 Vliv jemnosti recyklované betonové moučky - Experiment II

Vliv jemnosti recyklované betonové moučky na vývin hydratačního tepla a vliv jejího množství na mechanicko-fyzikální vlastnosti cementové pasty

Jaroslav TOPIČ, Zdeněk PROŠEK, Josef FLÁDR, Pavel TESÁREK [40]

Experimenty provedené v této diplomové práci lze porovnat s experimenty citovanými v kap. 7.2., kde byla také sledována jemnost mletí a byl použit CEM I 42,5, ale recyklovaná betonová moučka byla namleta na vibračním mlýně.

V experimentu [40] byl použit cement CEM I 42,5 R, cementárna Radotín. Recyklovaná betonová moučka (dále RCP) byla namleta na vysokorychlostním mlýnu stejně jako v předchozím experimentu popsáném v kap. 7.1. Byl pomlet beton z konstrukčních vrstev dálnice D1, úseku 9 /pozn. Loket (66. km) - Hořice (75. km).

V mé praktické části DP byla použita drť z úseku 22: Velká Bíteš (162. km) - Devět křížů (168. km).

Beton byl pomlet na jemnosti uvedené v tabulce na další straně:

| | CEM | RCP I | RCP II | RCP III | RCP IV |
|--|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| Měrný povrch [cm ² /cm ³] <i>uvedený v experimentu</i> | 11 749 | 12 350 | 21 837 | 20 768 | 31 056 |
| můj odhad OH | 3150 | 2300 | 2300 | 2300 | 2300 |
| můj přepočet jednotky [m ² /kg] | 373,0 | 537,0 | 949,4 | 903,0 | 1350,3 |
| zaokrouhлено [m ² /kg] | 370 | 540 | 950 | 900 | 1350 |

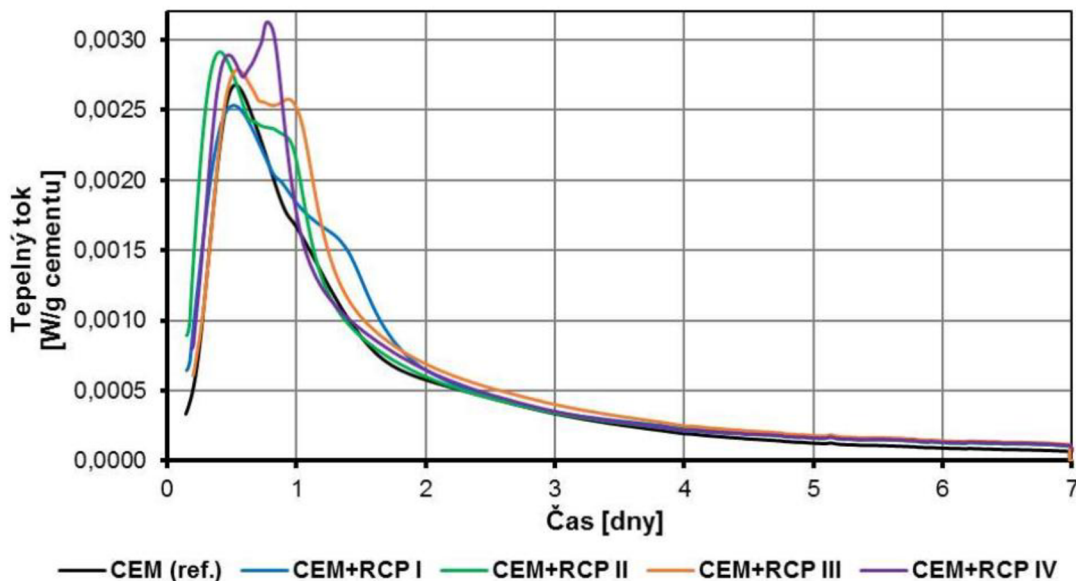
Tabulka 4: Parametry namletého betonu v experimentu II [40]+doplněno

V první fázi tým zkoušel reaktivitu v závislosti na jemnosti mletí. Zkoušeno bylo na vzorcích vyrobených s poměrem cement : recyklát 50:50; se shodným vodním součinitelem 0,45. Reaktivita se sledovala na základě vývinu hydratačního tepla, měřilo se v kalorimetru TAM Air po dobu 7 dní. Z výsledků kalorimetrického měření je u většiny vzorků /ve srovnání s referenčním cementem/ zřejmý nárůst vývinu hydratačního tepla. Tyto výsledky byly přepočteny na 1 g cementu.

Směsi do 48 hod. vykazují vyšší vývin hydratačního tepla, po 48 hod do konce měření (7 dní) vykazují srovnatelný vývin hydratačního tepla ve srovnání s referenční směsí z cementu. Směs CEM+RCP I vykazuje vlastnosti podobné referenčnímu cementu.

| | CEM (ref.) | CEM+R CP I | CEM+R CP II | CEM+R CP III | CEM+R CP IV |
|--|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Celkové hydratační teplo [W.s/g cementu] | 352 | 365 | 367 | 386 | 373 |

Tabulka 5: Celkové hydratační teplo v závislosti na použité jemnosti mletí recyklátu [40]



Obrázek 17: Graf vývinu hydratačního tepla v experimentu II [40]

Dále autoři popisují celkové teplo – uvádí, že bylo u všech záměsí vyšší než u referenční. Hodnoty celkového tepla směsí CEM+RCP I a CEM+RCP II vykazují rozdíl téměř zanedbatelný.

Jemnost mletí má následující vliv: vyšší jemnost zajišťuje vyšší vývin hydratačního tepla, asi o 10 %. Autoři uvádí, že dojde k odhalení nezhydratovaných zrn, která následně reagují, také že dojde ke vzniku nukleační plochy. Zde pak autoři píšou, že k dalšímu testování použijí RCP IV /rozpor s první kapitolou/. U této příměsi je zřejmý vyšší nárůst vývinu hydratačního tepla v oblastech, kdy u běžného portl. cementu reaguje C_3S a C_3A .

Výše uvedený postup, kde autoři použili stejný vodní součinitel, se mi jeví jako nevhodný, protože vodní součinitel nerespektuje velikost měrného povrchu, pro povrch RCP I je jiná potřeba záměsové vody než pro nejjemnější směs RCP IV. Při postupu, kdy je stejný vodní součinitel, je jiná konzistence směsi. Pokud jsou vzorky dokonale zhutněny, výsledný materiál má vyšší pevnosti, tedy tímto postupem jsou výsledky obtížně porovnatelné.

Vyšší teplo si vysvětlují také zapojením do procesu hydratace, jak je dále patrné z grafů pevností.

Větší měrný povrch:

- 1) větší počet narušených nezhydratovaných zrn
- 2) větší nukleační plocha
- 3) větší potřeba záměsové vody na ovlhčení povrchu > riziko ztráty pevností kvůli nadměrné pórovitosti.

Následně byla na základě reaktivity z předchozího testování vybrána varianta RCP IV (měrný povrch 31 056 cm²/cm³).

Byla vyrobena tělesa - trámečky 4-4-16 dle receptury viz. následující tabulka.

| Směs | Cement (CEM I 42,5 R) [g] | RCP [g] | voda/směs Poměr | Zkouška zpracovatelnosti – rozliv [mm] |
|--------------------------|---------------------------|---------|-----------------|--|
| CEM (ref.) | 1000 | - | 0,350 | 130 a 132 |
| RCP IV 5 (5 hm. % RCP) | 950 | 50 | 0,354 | 131 a 134 |
| RCP IV 10 (10 hm. % RCP) | 900 | 100 | 0,355 | 130 a 135 |
| RCP IV 15 (15 hm. % RCP) | 850 | 150 | 0,358 | 135 a 133 |
| RCP IV 20 (20 hm. % RCP) | 800 | 200 | 0,361 | 132 a 132 |
| RCP IV 25 (25 hm. % RCP) | 750 | 250 | 0,365 | 133 a 134 |

Tabulka 6: Receptura směsí v druhé části experimentu II [40]

U dvou vzorků byl stanoven měrný povrch pomocí permeabilní metody > výsledky v m²/g, u zbylých vzorků pomocí laserové difrakce > výsledky v cm²/cm³.

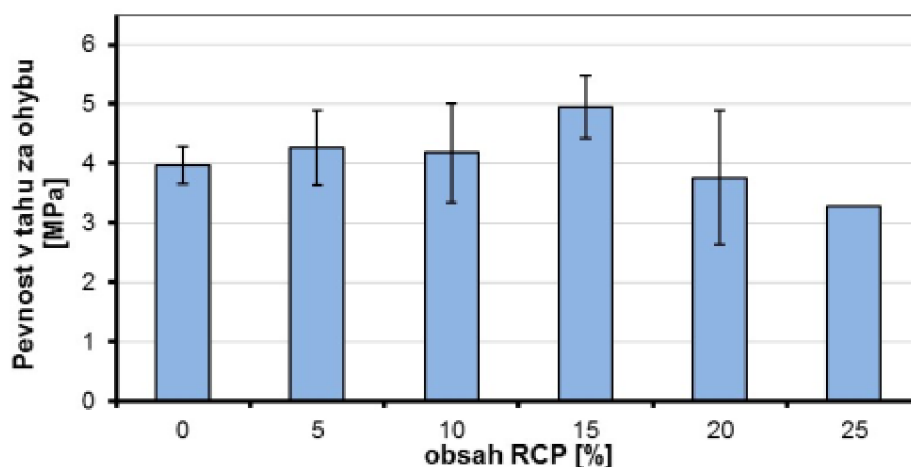
Proto dále v experimentech v diplomové práci budou hodnoty měrných povrchů také přepočítány na tuto odlišnou jednotku, než jakou udává měření Blainovou metodou.

Byl sledován dynamický modul pružnosti – byl zjištěn pokles modulu pružnosti o 35 % u všech receptur s přidavkem recyklátu (oproti referenční receptuře CEM). Dále byla sledována objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a v tlaku po 28 dnech.

| Vzorek | CEM (ref.) | CEM + 5 % RCP IV | CEM + 10 % RCP IV | CEM + 15 % RCP IV | CEM + 20 % RCP IV | CEM + 25 % RCP IV |
|--|------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Objemová hmotnost [kg/m ³] | 2050 ± 5 | 1910 ± 20 | 1890 ± 2 | 1840 ± 15 | 1840 ± 5 | 1800 ± 10 |

Tabulka 7: Tabulka hodnot objemových hmotností v experimentu II [40]

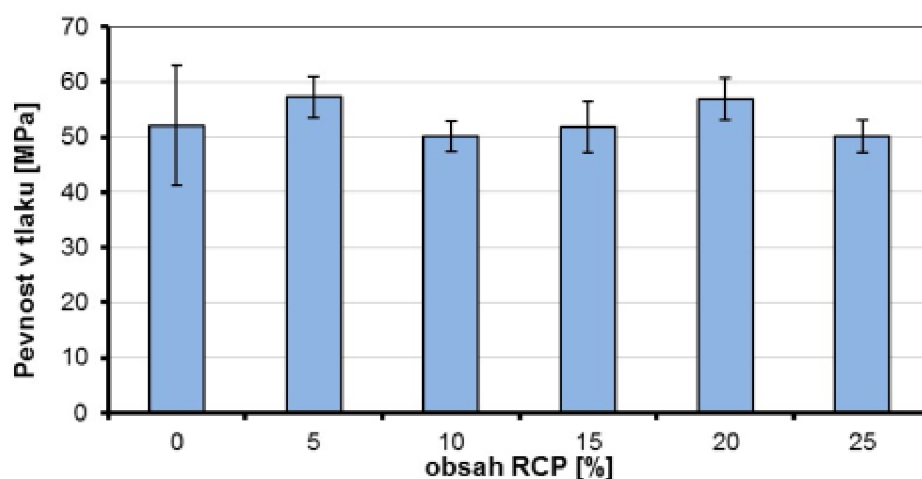
Objemová hmotnost vzorků se snižuje úměrně, jak se zvyšuje dávka recyklátu, klesne až na hodnotu 1800 kg/m³.



Obrázek 18: Vliv množství RCP IV na pevnost v tahu za ohybu [40]

Pevnosti v tahu za ohybu mají rostoucí charakter, až do náhrady 15 %, kde hodnoty pevností klesají. Stále jsou srovnatelné s pevností referenční záměsi. Náhrada cementu 15 % vykazuje přírůstek pevnosti v tahu za ohybu ze 4 na 5 MPa.

Další graf ukazuje vliv množství RCP IV na pevnosti v tlaku.



Obrázek 19: Vliv množství RCP na pevnost v tlaku. [40]

Pevnosti v tlaku dosahovaly hodnot více než 50 MPa. Při náhradě 5 % rostly, při dávce 10 % a 15 % se blížily referenčnímu vzorku. Dále je zajímavé, že při dávce 20 % pevnost znovu vzrostla.

Závěr

V závěru článku autoři porovnávají výsledky práce s experimenty ostatních autorů. Uvádí, že tento experiment je s nimi v souladu:

Kim a kolektiv omezují použití do 15 hm. % při návrhu cementových malt, při překročení dojde k výraznému poklesu hodnot pevnosti v tlaku.

Autoři Shui a kol také podobné výsledky.

Lidmila a Šeps využívají velmi jemnou frakci ze starých železničních pražců. V práci ukázali, že díky pomletí lze dosáhnout reaktivních vlastností betonového recyklátu způsobených pravděpodobně odhalením nezhydratovaných zrn, množství RPC doporučují v obdobných mezích /pozn. do 15 %.

Liu a kol. se ve své práci věnuje zkoumání pucolánových vlastností hybridní moučky složené z betonového a cihelného recyklátu, který přispívá na vlastnosti. Nejvíce se však na pucolánové aktivitě podílejí cihelná zrna, uvádí Liu. Na závěr shrnuje, že při vhodném poměru cihelné a betonové fáze a při vhodném dávkování (do 30 hm. %) je možné využít tento hybridní prach jako náhradu cementu v betonu.

Dále autoři článku doplňují k citacím uvedeným v časopisu Waste Forum: „Srovnání vybraných prací je spíše orientační, protože každý materiál RPC je odlišný a v citovaných pracích byly použity materiály s většími zrny, resp. jinou křivkou zrnitosti.“ [40]

8 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI

8.1 Reologie

Pod pojmem reologie se skrývá věda zabývající se popisem toků a deformací látek.

Reologie = Rheos & Logos

rheos – tok, proud

logos – učení

[41]

Reologie popisuje, jak se látka chová pod napětím. Látkou jsou myšleny nejen kapaliny, ale také plyny i pevné látky.

Ideální pevné látky se deformují elasticky (vratně); po odstranění napětí tedy vymizí všechny deformace způsobené tímto napětím. Ideální tekutiny /plyny a kapaliny/ se deformují viskózně (nevratně); dochází u nich k toku. Energie potřebná k deformaci se rozptýlí do této tekutiny ve formě tepla > nemůže být získána zpět pouhým odebráním/odstraněním přetvárného (deformačního) napětí. [42]

Běžně se ale na světě vyskytují látky, které se nemohou ztotožnit s těmito ideálními skupinami látek. Například u pevných látek deformací nastávají i nevratné změny (například dochází vlivem dostatečně velké síly k toku této látky). Pouze několik málo tekutin /technického i praktického významu/ se blíží vlastnostem ideální tekutině. Většina však vykazuje reologické chování, které leží někde mezi tekutinami a pevnými látkami. V různém rozsahu vykazují jak elastické, tak i viskózní vlastnosti; proto je nazýváme látkami viskoelastickými. Pevné látky uvažujeme, že jsou namáhány napětími tahovými či smykovými. Kdežto tekutiny lze namáhat pouze napětím smykovým.

Toto roztrídění reologického chování materiálů, které je spojeno s jejich odezvou na napětí, je nutné rozšířit i o funkci času. [43]

8.1.1 Viskozita

Základní veličinou popisující tokové chování látek je viskozita. Ta určuje míru vnitřního odporu vůči vnějšímu zatížení - neboli odpor proti toku. Dle způsobu měření se rozlišuje mezi dynamickou a kinematickou viskozitou. [44]

Viskozita popisující fyzikální vlastnosti kapaliny odolávající smykovému působení je funkcí (minimálně) šesti nezávislých parametrech [43] Jsou to:

1. fyzikálně-chemická struktura,
2. teplota,
3. tlak,
4. smyková rychlost,
5. čas,
6. elektrické pole.
7. Jsou zde i další činitele ovlivňující viskozitu (například velikost částic ve směsi).

8.1.1.1 Dynamická viskozita

Dynamická viskozita udává poměr mezi smykovým napětím /jinak i tečné napětí/ a změnou rychlosti smykové deformace. V závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami proudící kapaliny. Pro chování ideální kapaliny platí vztah:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} [Pa \cdot s]$$

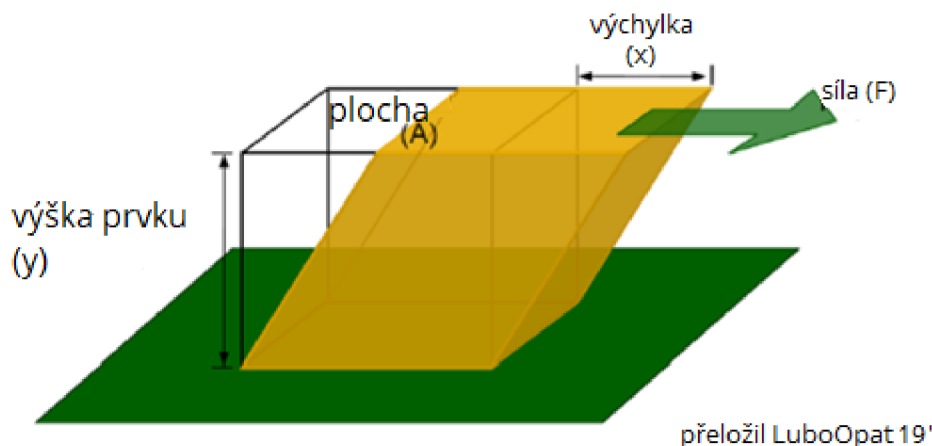
kde: η ... dynamická viskozita [Pa·s],

τ ... smykové napětí [Pa]

$\dot{\gamma}$... je smyková rychlost v [s^{-1} resp. 1/s]

Rovnice 15: Rovnice dynamické viskozity [43] [44]

8.1.1.2 Tečné napětí - odvození rovnice



Obrázek 20: Obrázek pro odvození rovnice tečného napětí [41]

$$\tau_{xy} = \frac{F_x}{A} = \eta \cdot \dot{\gamma} = \eta \cdot \frac{du_x}{dy}$$

kde: η ... dynamická viskozita [Pa·s] dříve v Poise [P] / 1 Pa·s = 10 P/,

τ ... smykové napětí [Pa]

$\dot{\gamma}$... je smyková rychlost v [s⁻¹ resp. 1/s]

u_x ... rychlost deformace ve směru působení síly.

Rovnice 16: Rovnice tečného napětí [41]

8.1.1.3 Kinematická viskozita

Při testování Newtonské kapaliny pomocí kapilárních viskozimetrů působí tíhová síla, ta pohání kapalným vzorkem skrz kapiláru.

Hustota vzorku je tedy dalším parametrem /pozn. tíhové zrychlení berme jako konstantní/. Kinematickou viskozitu lze pak popsat následujícím vztahem [43]:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

kde: ν ... kinematická viskozita [m²/s]

η ... dynamická viskozita [Pa·s]

ρ ... objemová hmotnost kapaliny v [kg/m³]

Rovnice 17: Vztah pro kinematickou viskozitu [43]

S výhodou však se používá násobných jednotek cm²/s nebo mm²/s, které odpovídají užívaným jednotkám St (Stokes), respektive cSt.

8.1.2 Newtonovy tekutiny

Chování ideální tekutiny popsal Isaac Newton /*1643 †1727/ vztahem [43] (také je v kapitole 8.1.1.2.)

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

kde: τ ...smykové napětí [Pa]

η ... dynamická viskozita [Pa·s],

$\dot{\gamma}$... je smyková rychlost v [s⁻¹ resp. 1/s]

Rovnice 18: Popis Newtonova chování tekutin [43]

Pro příklad lze uvést kapaliny: voda, benzen.

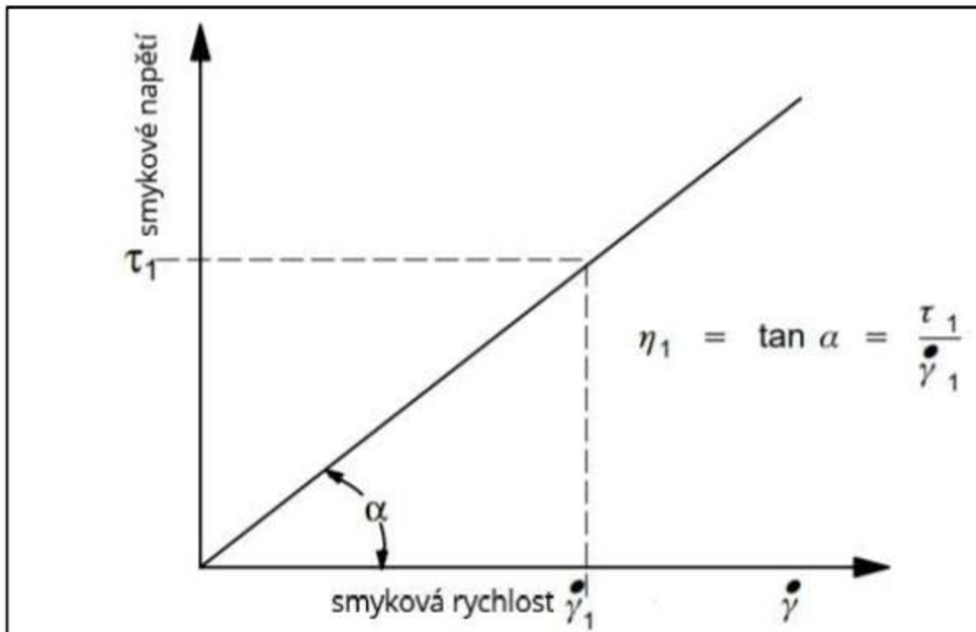
Závislost smykového napětí na smykové rychlosti popisuje toková křivka.

8.1.3 Toková křivka

Toková křivka pro ideální tekutinu je přímka začínající v počátku a roste pod úhlem α . Tuto hodnotu lze definovat jako $\tan \alpha$ /tangens úhlu α /, rovná se pak dynamické viskozitě.

Smykové napětí /pro ideální tekutiny/ je přímo úměrné smykové rychlosti.

Viskozita není ovlivněna změnou smykové rychlosti a je konstantní. Všechny kapaliny, pro které je toto tvrzení pravdivé označujeme jako Newtonské kapaliny [10]. Toková křivka Newtonských kapalin je

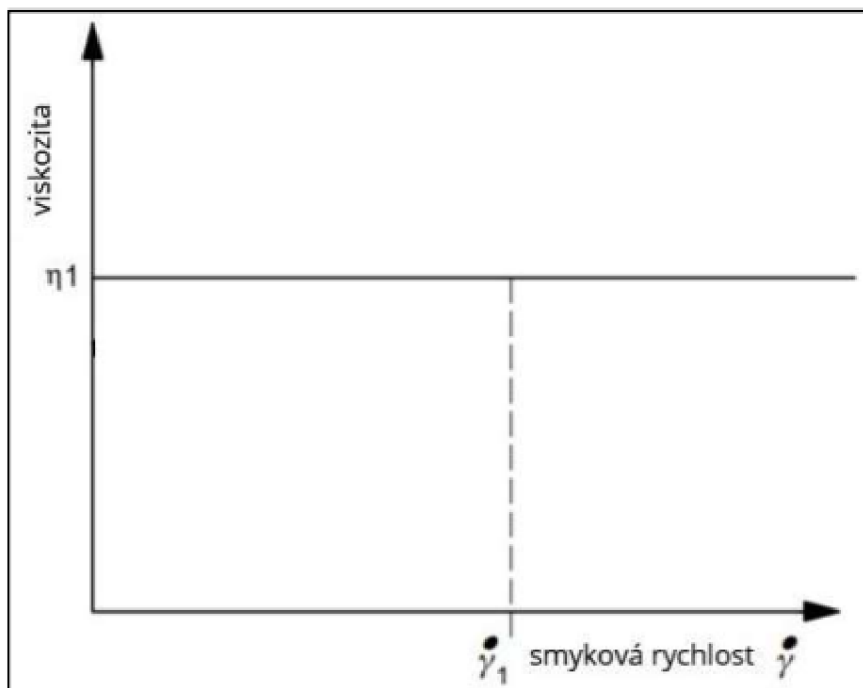


Obrázek 21: Toková křivka Newtonské kapaliny (tekutiny) [43]

uvedena na obrázku 21:

Dále se uvádí i viskózní křivka, zobrazující vztah viskozity a smykové rychlosti [43]

Polydisperzní systémy s relativně vysokou viskozitou se však ve svých tokových



Obrázek 22: Viskózní křivka Newtonovi ideální kapaliny (tekutiny) [43]

vlastnostech většinou nepodřizují jednoduchému Newtonovu zákonu. Tedy, chovají se jako *nenevtonské tekutiny*.

8.1.3.1 Ne-Newtonovy tekutiny

Všechny další kapaliny, u kterých neplatí Newtonův zákon viskozity se označují jako Nenevtonské. Nenevtonské kapaliny se dělí na [43] [45] [46]:

- Pseudoplastické,
- dilatantní,
- plastické,
- tixotropní,
- reopektické.
- Závislost napětí na rychlostech smykové deformace tedy není lineární a obvykle se aproximují/vyjadřují za pomoci některého z vztahů:

| Název modelu | Rovnice |
|------------------|-------------------------------------|
| Newton | $\tau = \eta \dot{\gamma}$ |
| Bingham | $\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$ |
| Herschel-Bulkley | $\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$ |

Tabulka 8: Některé reologické modely pro popis chování nenevtonských tekutin [46]

kde: η ... dynamická viskozita [Pa·s]

τ ... smykové napětí [Pa]

τ_0 ... prahové smykové napětí (mez toku) [Pa]

K ... koeficient úměrnosti (konzistence) [-] - jenž koreluje s plastickou viskozitou. U Binghamova modelu a pro systémy kde $n \rightarrow 1$

je roven viskozitě.

8.1.3.2 Rozdělení a popis ne-Newtonových tekutin

Pseudoplastické tekutiny jsou *řídnoucí tekutiny*, což znamená, že jejich zdánlivá viskozita při rostoucím gradientu rychlosti začne klesat. Mezi pseudoplastické tekutiny patří např. suspenze nesouměrných částic, některé koloidní roztoky, taveniny a roztoky polymerů, barvy, latexu apod.

S rostoucím rychlostním gradientem se částice či molekuly začnou orientovat ve směru pohybu tekutiny. Předpokládá se, že tato orientace je okamžitá již při působení malých smykových napětí. Pokud změna struktury nastane až po určité době, pak takové tekutiny nazýváme **tixotropní**.

Dilatantní tekutiny jsou *houstnoucí tekutiny*, což znamená, že jejich zdánlivá viskozita při rostoucím gradientu rychlosti začne růst. Mezi dilatantní tekutiny patří např. rozpouštědla barev, škrobový maz, některé polymerní roztoky nebo med.

Při malých rychlostních gradientech tekutina působí jako mazivo mezi částicemi. Avšak při vyšších rychlostních gradientech se částice začnou uspořádávat do vrstev a suspenze se mírně roztáhne (dilatuje).

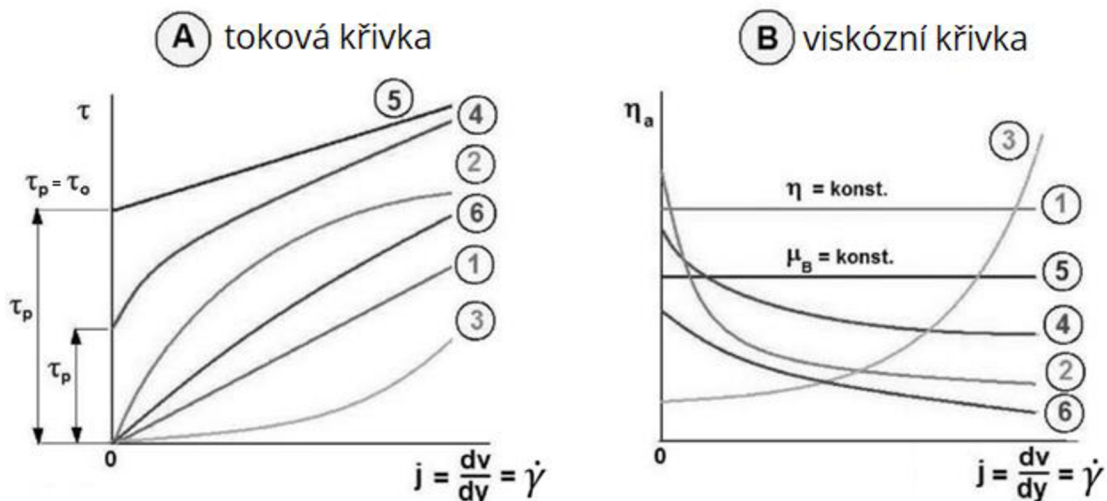
- **Pseudoplastické a dilatantní** – viskozita je závislá na smykové rychlosti
- **Binghamské** – vykazují mez toku
- Tixotropní a reopektické.

V důsledku toho vzroste mezerovitost mezi částicemi a tím i smykové napětí. Běžněji se však setkáváme s **reopektickou tekutinou**, kde dilataci suspenze pozorujeme s určitým zpožděním (tento jev nazýváme reopexie) /opačný jev k tixotropii/.

Binghamské tekutiny jsou ideálně plastické tekutiny. U těchto tekutin dochází k toku až po překročení počátečního smykového napětí též nazývané dynamická mez toku τ_0 . Po dosažení tohoto napětí se původně stabilní struktura tekutiny rozpadne a začne se chovat newtonovsky.

Mezi Binghamské tekutiny patří např. koncentrované kašovitě a zrnité suspenze, průmyslové a odpadní kaly, gely, cementová pasta apod. [47] [43]

8.1.3.3 Ukázky reogramů výše popsaných systémů



Obrázek 23:

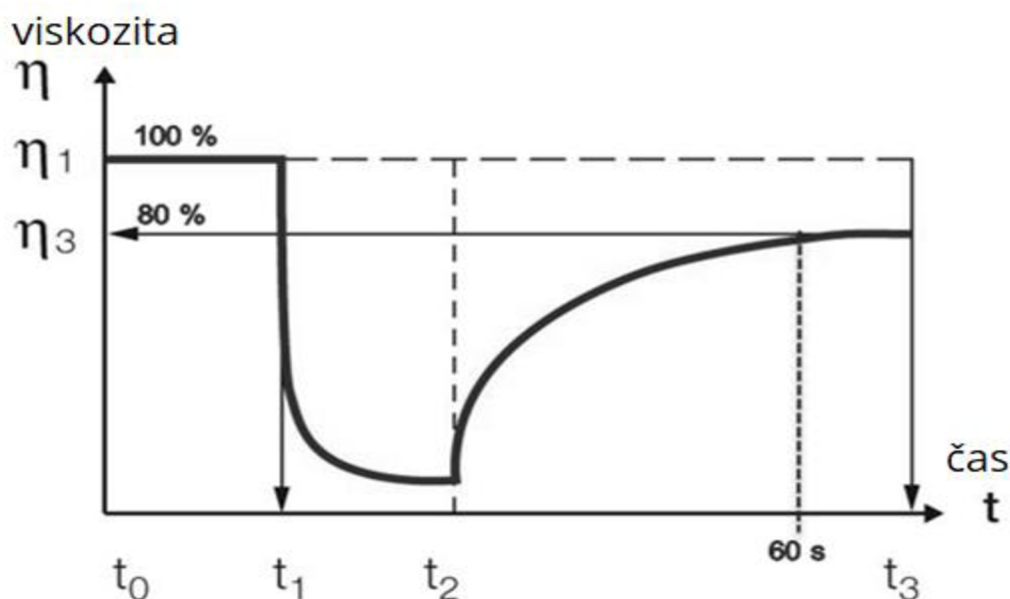
Ukázky A) reologických křivek a B) závislosti zdánlivých viskozit tekutin na smykové rychlosti.

Tekutina: 1) newtonská, 2) pseudoplastická, 3) dilatantní, 4) skutečná plastická,

5) Binghamova – ideálně plastická, 6) Eyringův model [60]

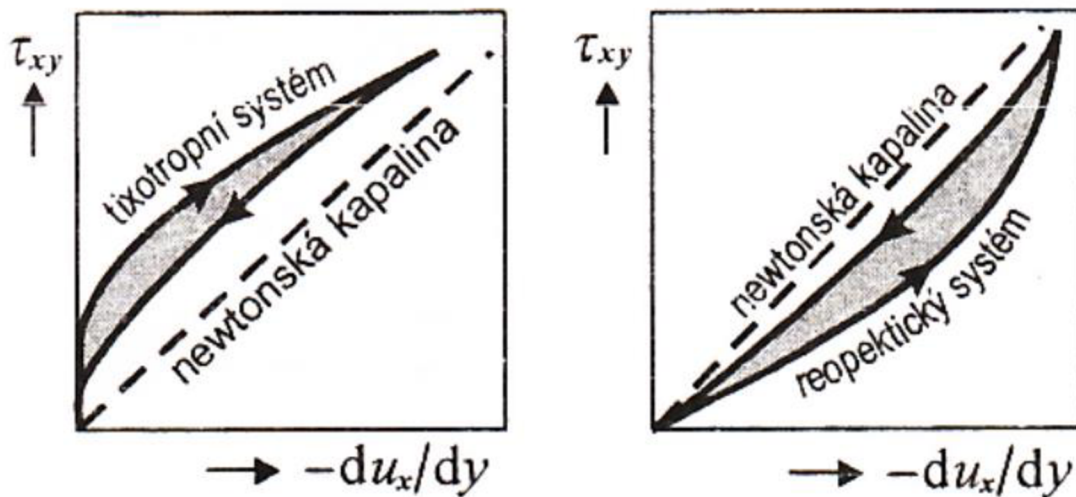
Tokové křivky a závislosti zdánlivých viskozit na gradientu smykové rychlosti některých ne-Newtonských tekutin jsou zobrazeny obrázku. [46], [47]

Rychlost deformace nemusí ale záviset pouze na napětí, ale také na době, po kterou napětí působí.



Obrázek 24: Analýza návratu původní viskozity v čase - tixotropní chování [61]

Pokud se rychlost deformace s dobou působení stálého napětí zvětšuje, pak hovoří se o **tixotropní látce**. Jestliže se s dobou působení napětí rychlost deformace zmenšuje, hovoří se o **reopexní látce**. Je to obsah plochy tzv. Hysterezní smyčky, která se u obou systémů objevuje. Ukazuje obrázek 25.



Obrázek 25: Tixotropní a reopexní hysterezní tokové křivky [41]

8.2 Faktory ovlivňující reologii

Reologie je ovlivňována všemi složkami, které obsahuje. Podstatně dále pak podmínkami výroby. [48] Faktory včetně vlivu množství záměsové vody, vlastností a množství cementu, vlastností a podíl jemných a hrubých kameniv, typ a množství minerálních a chemických příměsí budou diskutovány v těchto odstavcích.

8.2.1 Obsah vody

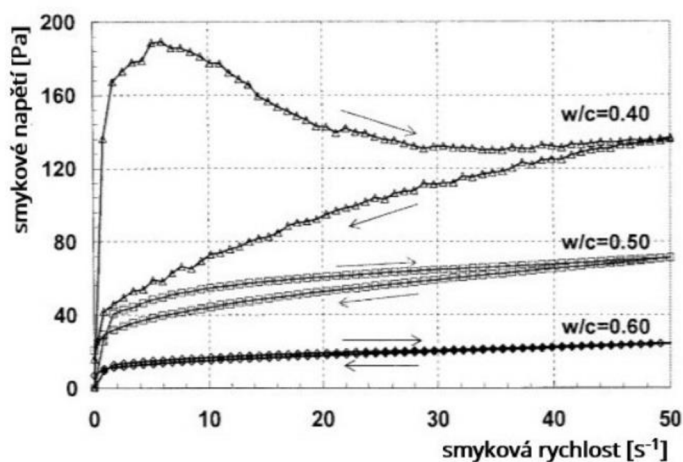
Obsah vody je nejdůležitějším faktorem, který řídí reologii betonu.

Voda plní dvě funkce:

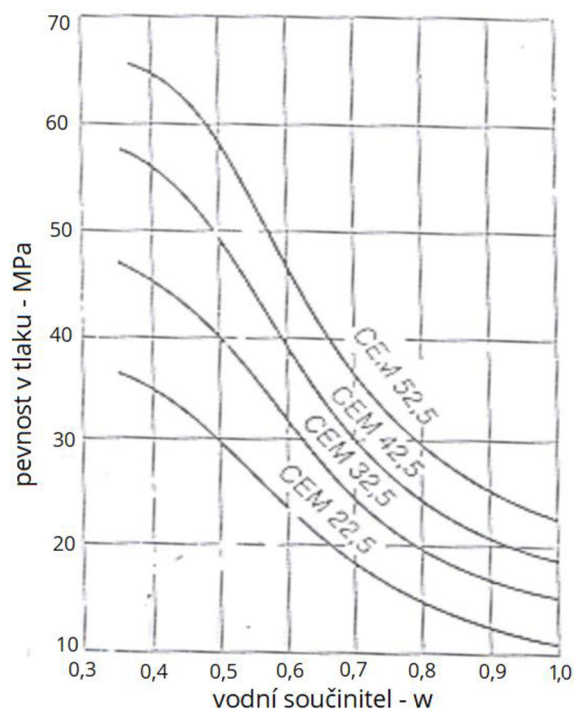
- hydratační (podmiňuje hydrataci cementu) - k hydrataci 100 kg cementu je třeba „pouze cca“ 25 kg vody.
- reologickou (umožňuje vytvoření čerstvého betonu), tzn. umožní, aby šel beton zamíchat a uložit na místo v konstrukci /tekuté většinou čerpáním/.

Zvýšení obsahu vody při současném zachování proporcí ostatních složek snižuje mez kluzu a viskozitu betonu, zlepšuje tedy zpracovatelnost. $W > 0,3$ prodlouží dobu tuhnutí [17]

Zvýšený přídavek však může vést k segregaci a krvácení [48] Zvýšený vodní součinitel po zatvrdnutí vede ke snížení pevností [49]. A to výrazně, viz graf závislosti pevnosti na vodním



Obrázek 26: Vliv vodního součinitele na reologii cementové pasty [48]



Obrázek 27: Vliv vodního součinitele na reologii cementové pasty [17]

součiniteli a použitím cementu. (obr. 27) * [17]* Ale snížení vodního součinitele vede k zvýšení meze toku a viskozity (viz obrázek 26). [48]

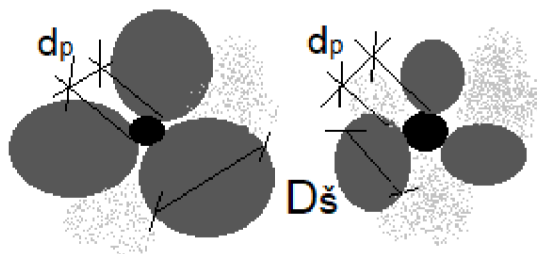
8.2.2 Vlastnosti a obsah cementu

Fyzikální a chemické vlastnosti cementů korelují s reologickými vlastnostmi cementových past. Vom Berg [r. 1979] studoval vliv měrného povrchu (SSA) a koncentrace pevných látek na tokové chování cementových past. Zjistil, že mez toku a plastická viskozita cementové pasty se zvyšovala se zvyšující se jemností cementu nebo koncentrací pevných částic (částic cementu v pastě), což odráží dominanci rozhraní cement-voda v tomto systému. Jemnost cementových částic řídí rovnováhu přitažlivých a odpudivých sil mezi cementovými částicemi, což má výrazný dopad na tokové vlastnosti betonu. [48]

8.2.3 Kamenivo

Velikost částic kameniva ovlivňuje potřebu vody pro danou konzistenci. Velmi jemné písky budou vyžadovat více vody pro danou konzistenci, na druhé straně budou vyrábět hutný a nezpracovatelný beton ve srovnání s hrubšími křivkami se stejným obsahem vody.

Záleží také na velikosti největších zrn malty = drobného kameniva / D_p písku/ k nejmenším zrnům štěrku d_{ξ} . Jsou-li totiž



Obrázek 28: Zvětšení mezer mezi zrny štěrku [50]

zrna písku poměrně velká, nastane při míšení složek a při zpracování betonové

směsi kromě nakypření směsi /zvětšení mezer štěrku/ i rozmíšení malty – větší zrna písku se totiž zadrhnou mezi zrny štěrku, vsouvají se mezi ně a zvětšují objem štěrku. Ten se sice vyplní maltou, ale jen obtížně. A to obtížněji, je-li povrch zrn drsný. viz má BP [50]

8.2.3.1 Tvar zrn:

Obecně platí, že čím jsou částice téměř kulovité, tím bude výsledný beton zpracovatelnější. Tvar a struktura agregovaných částic může také ovlivnit reologii. Zrnění a poměr jemnozrnných příměsí také poskytne vliv na reologii.



Obrázek 29: Tvary jsou ve směru hodinových ručiček zleva shora:

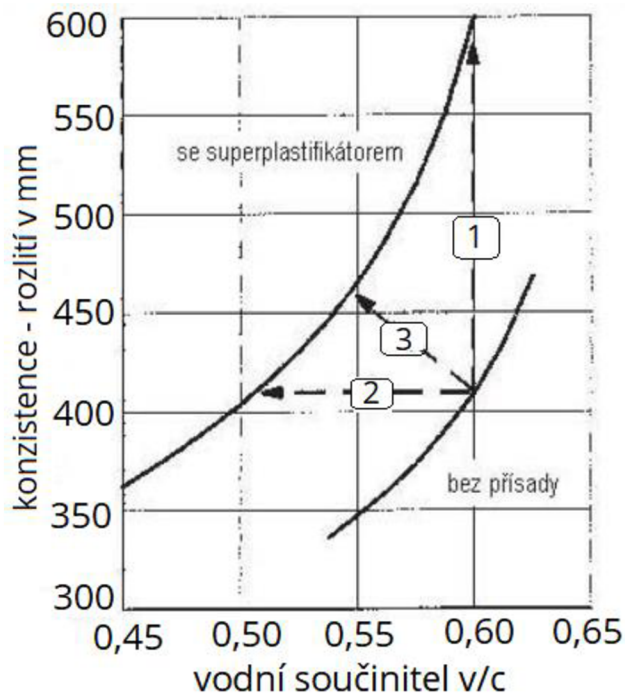
Zaoblené, nepravidelné, úhlové, vložkané, protáhlé, vložkané + protáhlé. [62]

8.2.4 Vliv plastifikačních přísad

Vliv PP je trojího typu:

- 1/ ztekucení směsi
- 2/ redukce vody s totožnou konzistencí
- 3/ kombinace výše zmíněného [17]

Plastifikační přísady jako *ligninsulfonany*, *sulfonované naftalen-formaldehydy* nebo *sulfonované melamin-formaldehydy* se adsorbují na povrchu cementových zrn pomocí jejich sulfonátových skupin. Jejich deflokulační (odpužující/ ztekucující) efekt je vyvolán **elektrostatickým odpuzováním** díky negativnímu povrchovému náboji a fyzické



Obrázek 30: Vliv plastifikátoru na vodní součinitel nebo na konzistenci [17]

velikosti vrstvy adsorbátu na cementových zrnech zabraňující tomu, aby se částice přiblížily k sobě. V porovnání s referenčními cementovými pastami bez superplastifikační přísady tento efekt způsobuje snížení meze toku a viskozity [17]

- (r. 2000) Perret a spol. na základě testování různých kombinací cementů a superplastifikačních přísad stanovili proměnlivé reologické vlastnosti.
- (r. 2000) Cry a spol. došli k závěru, že dávka superplastifikační přísady (dále jako SPP) zvyšuje tixotropii.
- (r. 2001) Ferraris a spol. dospěli k závěru, že opožděný přídavek SPP vede k lepší rozptýlenosti cementu.
- (r. 2004) Golaszewski a Szwabowski stanovili, že SP může výrazně redukovat hodnotu smykového napětí a zvyšovat viskozitu cementové pasty.
- (r. 2004) Chia a Zhang - Naopak došli k tomu, že PP & SPP snižuje hodnotu smykového napětí, ale na viskozitu nemá významný vliv. [48]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

9 CÍL PRÁCE

Cílem práce bylo připravit z betonových recyklátů z dálnice D1 a z výroby Spiroll panelů mechanickým mletím jemný prach s měrným povrchem v rozmezí 200 až 600 m²/kg. Cílem bylo stanovení indexu aktivity a sledování vlivu přídatku jemného prachu různých jemností na vodonáročnost směsí a zjištění indexu účinnosti na cementových maltách a na betonech a ověření pevností v různých časových intervalech. Byla navržena receptura betonu C25/30 (konzistence S3) s recyklátem.

10 METODIKA A POSTUP PRÁCE

Byly zkoumány indexy účinnosti u třech recyklátů ze zdrojů Avion, D1, Prefa.

Příprava recyklátů probíhala shodně dle postupu uvedeném dále v kapitole 13.1 na prášek s D_{\max} 0,5 mm s následným mletím ve vibračním mlýně.

U různě pomletých vzorků byl stanoven měrný povrch pomocí permeabilní metody Blaine. Pro toto stanovení byly změřeny měrné hmotnosti. Dle vedoucího práce ale bylo počítáno s hmotností 2300 kg/m³. Přepočteno na jednotu cm²/cm³. Následně byly vyrobeny trámečky 4-4-16 z normového písku a vody. Do některých směsí použita plastifikační přísada. Voda byla dávkována na shodné konzistence sledované rozlivem na střešacím stolku.

Testováním ztvrdlé malty byly zjišťovány hodnoty objemové hmotnosti, pevností v tahu za ohybu, v tlaku a nasákavosti úlomků.

V další etapě byly vyrobeny betony s recyklátem v dávce 25 % náhrady množství cementu. Byla stanovena objemová hmotnost betonu, pevnost v tlaku, hloubka průsaku tlakovou vodou. Po ověření vlastností byla teoreticky navržena receptura betonu C 25/30 konzistence S3.

11 POSTUP ZKOUŠEK PROVEDENÝCH V EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Vyráběny byly tři typy těles:

1/ trámečky 4-4-16 [cm]

2/ krychle 10-10-10 [cm]

3/ krychle 15-15-15 [cm] - naplněná do poloviny - tedy 15-15-7,5 na zkoušku

hloubky průsaku tlakovou vodou.

11.1 Statistický náhled na hodnocení výsledků

Kdy vyšetřovanou materiálovou vlastností X je například pevnost betonu v tlaku f_c . Má se stanovit její charakteristická hodnota definovaná jako 5% kvantil. Uvažuje se, že základní soubor má normální rozdělení. Vztahy uvedené v příloze „D“ ČSN EN 1990 a také z EN 13791 vycházejí z předpokladu, že vyšetřovaná veličina má normální nebo log-normální rozdělení. Přijetí log-normálního rozdělení, má tu výhodu, že na rozdíl od normálního rozdělení se vyloučí výskyt záporných hodnot. Dále se předpokládá, že neexistuje apriorní znalost průměru pevnosti f_c . Průměr se stanoví z výsledků zkoušek podle vztahu:

$$f_{m(n),is} = \frac{1}{n} \sum_n f_{is,i}$$

kde: $f_{m(n),is}$... výběrový průměr odhadnutý z výsledků zkoušek,

$f_{is,i}$... sumace se provádí přes výsledky všech n zkoušek.

Rovnice 19: Zjištění aritmetického průměru hodnot vlastnosti [50]

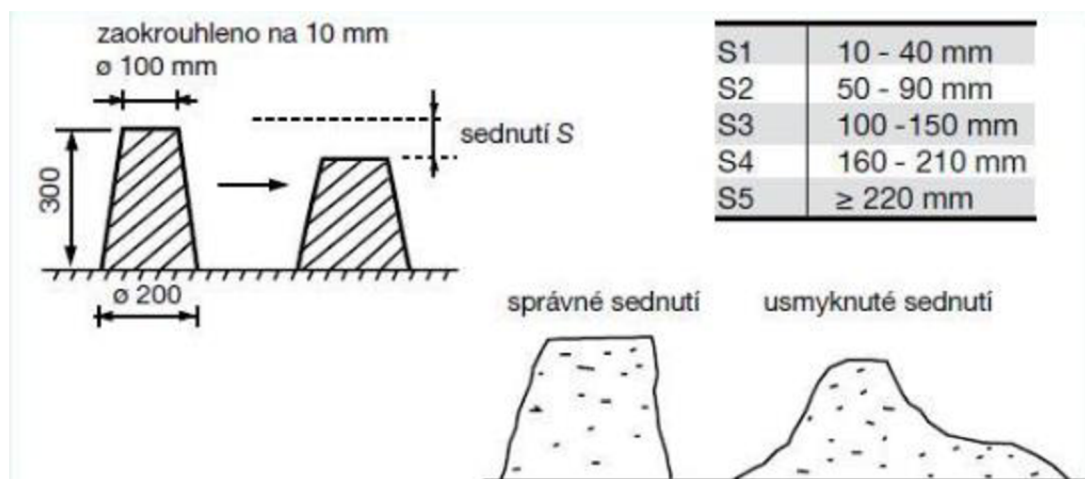
11.2 Zkouška sednutí kužele

Konzistence jako uznávaný pojem při hodnocení zpracovatelnosti betonu se určuje nejčastěji zkouškou sednutí kužele (pro transportbetony). Konzistence je podmíněna schopností odolávat přetvoření v důsledku vnitřního napětí

vyvolaného změnou vnějších sil. Popis konzistence dodávaného betonu je třeba uvést v projektové dokumentaci.

zkoušení čerstvého betonu - zkouška sednutí

je uvedeno v normě ČSN EN 12 350-2 [51]. Zkouška se stala nejpoužívanější,



Obrázek s tabulkou 313: Zkouška sednutí kužele [63]

jelikož jde o metodu velmi jednoduchou. Úkolem je změřit pokles betonového vzorku po odstranění Abransova kužele. Abransův kužel je komolý kužel, kde těleso v něm vyrobené má proporce dle obrázku (obr. 33). Plní se třemi vrstvami s hutněním 25 vpichy ocelovou tyčí.

Pro platnost zkoušky je třeba, aby betonové těleso zůstalo neporušené a symetrické. Pakliže by se nám beton usmýkl, je třeba zkoušku opakovat. Sednutí se uvádí s přesností na 10 mm [17]

11.3 Objemová hmotnost

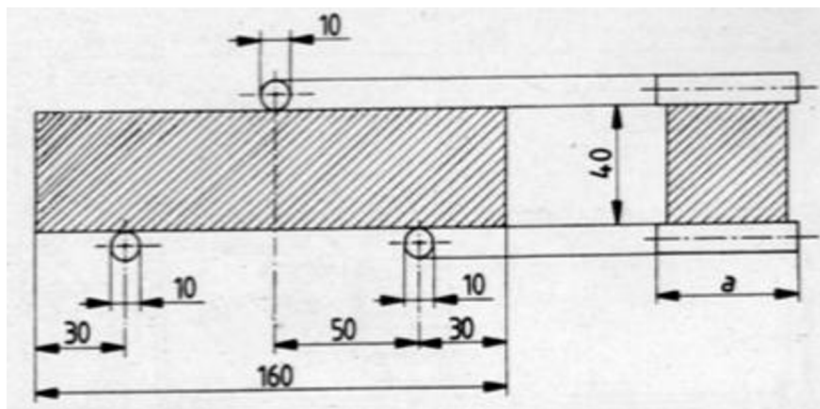
Ze změřených rozměrů a zjištěné hmotnosti byla dle vzorce:

$$\text{Objemová Hmotnost} = \frac{M}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Rovnice 20: Vzorec pro výpočet objemové hmotnosti. [52]

vypočítána objemová hmotnost, zprůměrované hodnoty byly zaokrouhleny dle požadavku normy.

11.4 Pevnost v tahu za ohybu trámečky 4-4-16



Obrázek 32: Provádění zkoušky v tahu za ohybu na trámečkách [54]

Pevnost v tahu za ohybu byla zjišťována na lisu v lisovně ÚTHD dle normy ČSN EN 196-1. Normová tělesa pro zkoušku byly trámečky s normovými

rozměry 40x40x160 mm (s rozměry podpor „l“ =

100 mm). Tělesa byla změřena na setiny milimetru. Pro stanovení OH i zvážena na gramy /viz zkouška objemové hmotnosti/. Zkušební přípravek umístěný do lisu zajišťuje, že trámeček je zatěžován trojbodovým ohybem, s délkou (spodních) podpor 100 mm. Také zajistí, že břity jsou kolmé a pružně usazené vzhledem k povrchu tělesa. Vzorek vložen kolmo na směr hutnění a to tak, že jeho podélná osa je k válcovým podpěrám kolmá. *8* Zatěžování je plynulé do porušení, které je očekáváno jako přelomení v polovině vzorku. Je následně odečtena síla „F“ v kN, kterou byl zatížen vzorek při zlomu. Výsledná hodnota pevnosti v tahu za ohybu R_f se získá jako aritmetický průměr třech hodnot stanovených na třech zkušebních trámečkách.

$$R_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}]$$

F ... zatížení vyvolané lisem potřebné pro zlomení trámeček [N]

b ... šířka průřezu trámečku [mm]

h ... výška lámaného průřezu [mm]

l ... rozpětí podpor trámečku [mm]

Rovnice 21: Rovnice pro výpočet pevnosti v tahu za ohybu na trámečkách. [53]

Zlomky jsou dále použity pro stanovení pevnosti v tlaku.

11.5 Pevnost v tlaku

Byla zjišťována na lisech v lisovně ÚTHD.

11.5.1 Trámečky 4-4-16

Zjištění pevnosti v tlaku na trámečcích 4-4-16 [cm] bylo prováděno na zlomcích ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Pro trámečky 40x40x160 je určen přípravek se zatěžovací plochou 40x40 mm. Tento přípravek také zajistí kloubové uložení dosedající plošky. Vzorek vložen kolmo na směr hutnění je zatěžován plynule svislou silou. Je zjištěna maximální síla „F“ v kN při porušení. [54]

$$R_c = \frac{F}{S} \quad [\text{MPa}]$$

kde: F ... zatížení vyvolané lisem potřebné pro destrukci trámečků [N]

S ... tlačná plocha - zde 1600 [mm²]

Rovnice 22: Rovnice pro výpočet pevnosti v tlaku. [54] [53]

Porušení je očekáváno ve tvaru přesýpacích hodin, jak ukazuje fotka (obr. 33) z prováděné zkoušky:

Část trámečku, která je mimo plošky, buď odpadne nebo odstřelí pryč.

Ze změřených sil byl stanoven průměr a následně vypočtena pevnost daného trámečku. Pevnosti jednotlivých trámečků jsou mezi sebou zprůměrovány a dají pevnost záměsi v daném stáří.



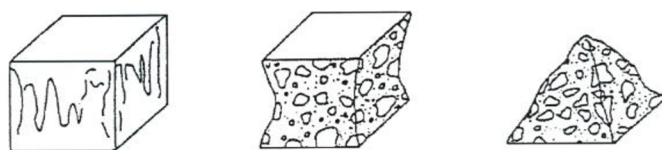
Obrázek 33: Očekávané porušení ve tvaru přesýpacích hodin.

11.5.2 Krychle 10-10-10



Obrázek 34: Příprava před zkouškou pevnosti v tlaku

Byly lisovány v lisu s digitálním odečtem síly v lisovně ÚTHD. Kde byla zaznamenána maximální síla, když přístroj detekoval porušení. Vyhovující porušení ukazuje obrázek .



Obrázek 35: Vyhovující způsoby porušení krychle [64]

Z rozměrů vypočtená pevnost dané krychle. Tyto pevnosti zprůměrovány.

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

kde f_c ... pevnost v tlaku [MPa]

F ... maximální zatížení při porušení vzorku [N]

A_c ... průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení [mm²]

Rovnice 23: Rovnice pro výpočet pevnosti v tlaku betonu [53]

11.6 Index účinnosti

Záměrem v experimentální části je příprava malt nebo betonů, v jejichž matici je provedena náhrada 25 % pojiva za příměs - typu I. nebo II.

Tedy je vyrobena směs **referenční** bez náhrady pojiva za příměs, jež odpovídá vlastnostmi 100 %. A směsi s **25% náhradou**, u nich se pak získané vlastnosti v čase zkoušení dosadí do vzorce pro výpočet IU v %: [53]

$$IU_t = \frac{R_{t,příměs}}{R_{t,referenční}} \cdot 100 = [\%]$$

kde: IU ... Index účinnosti [%]

t ... stáří vzorku - 14, 28, 60 dní

R_{příměs} ... sledovaná vlastnost u vzorku s 25% náhradou

R_{referenční} ... sledovaná vlastnost u vzorku se 100 % pojiva

Rovnice 24: Rovnice pro výpočet indexu účinnosti (IU) [53]

11.7 Nasákavost do ustálené hmotnosti

Pro zjištění kapilární pórovitosti, jež byla ve vzorcích z důvodu nadbytku záměsové vody, byla provedena zkouška krátkodobé nasákavosti. Vzorek byl sušen inimálně 24 hodin v sušárně při teplotě 105±3 °C. Následně byly vzorky zváženy (m_s) a ponořeny na minimálně 24 hodin do vody. Mokrý byly vyjmuty, povrchově osušeny vlhkou tkaninou a zváženy (m_w).

Nasákavost se pak stanoví podle vzorce:

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100$$

kde: NV ... nasákavost vzorku [%]

m_n nebo také m_w ... hmotnost nasáklého vzorku [g]

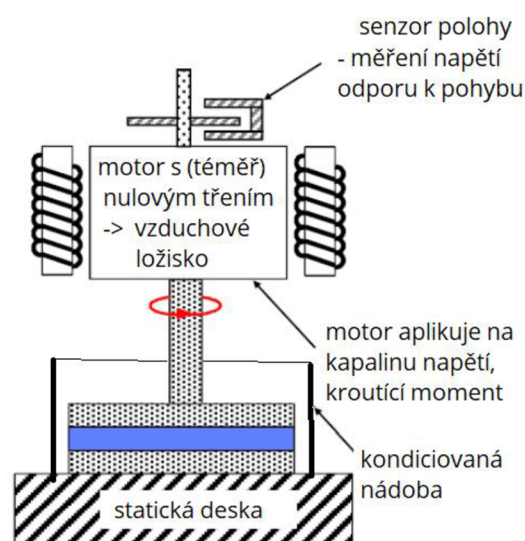
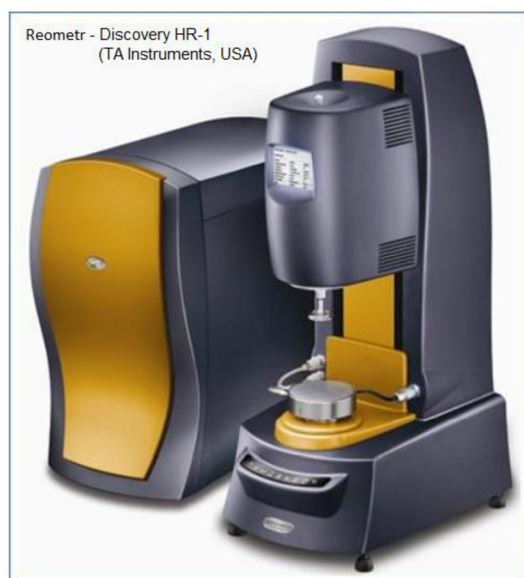
m_s ... hmotnost vysušeného vzorku [g]

Rovnice 25: Rovnice pro výpočet nasákavosti vzorku [53]

Ještě podotknu, že ke zkoušce byly vybírán vždy ten úlomek trámečku ze série, kde trámeček měl nejnižší hmotnost. Bylo to myšleno jako, že bude mít po výpočtu i nejnižší OH = více pórů = větší nasákavost.

Na konci práce na DP byly vzorky opět vysušeny a ponořeny do vody. A zjištěna nasákavost do ustálené hmotnosti. Obě jsou uvedené v tabulce v kapitole 14.3.6. Nasákavost na úlomcích trámečků.

11.8 Reologie cementových past



přeložil LuboOpat 19'

Obrázek 36: Reometr Discovery HR-1 [46]

Reologie byla sledována na Ústavu chemie VUT FAST v Brně na reometru Discovery HR-1 fy TA Instrument.

11.9 Rentgenová difrakční analýza

Rentgenová difrakční analýza byla provedena na centru AdMaS, na přístroji fy. Malvern Panalytical, Empyrean.

Při dopadu Rentgenova záření o definované vlnové délce (měděná anoda) na krystalickou látku dochází k rozptylu (difrakci) záření na atomech tvořících krystalickou látku. Atomy toto záření odrazí na rovinách krystalické mřížky s různou intenzitou. Aby docházelo k rozptylu paprsků musí být splněny jisté náležitosti mezi dopadajícím rentgenovým zářením a orientací struktury krystalů. Tyto podmínky jsou popsány pomocí Braggovy rovnice. [55]

11.9.1 Braggův zákon

Braggův zákon je základní rovnicí pro rentgenovou difrakci a vypadá následovně:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

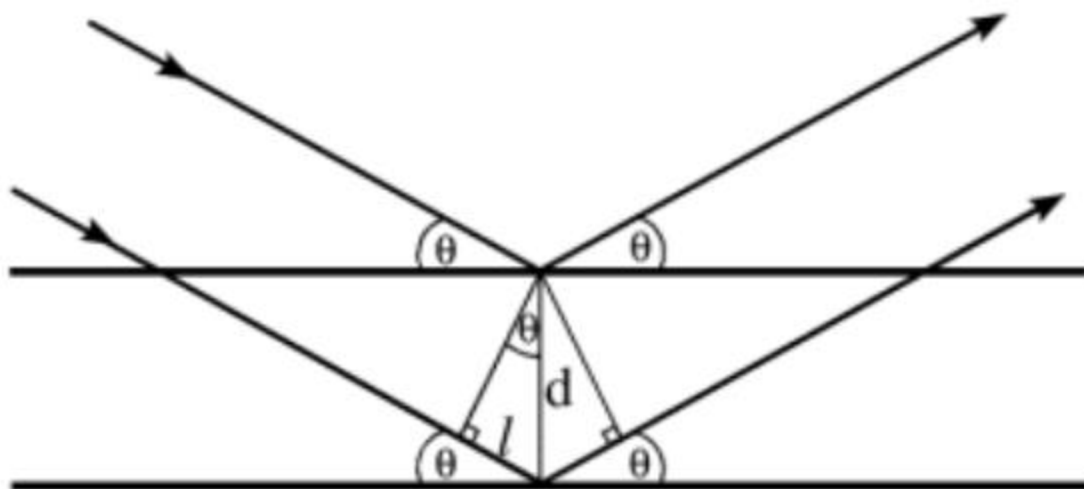
Kde: λ ... vlnová délka dopadajícího záření

d ... mezimřížková vzdálenost

θ ... difrakční úhel dopadajícího záření vůči vzorku

n ... násobek vlnové délky (celé číslo)

Rovnice 26: Rovnice Braggova zákona [55]



Obrázek 37: Znáznornění Braggova zákona [55]

12 POUŽITÉ SUROVINY

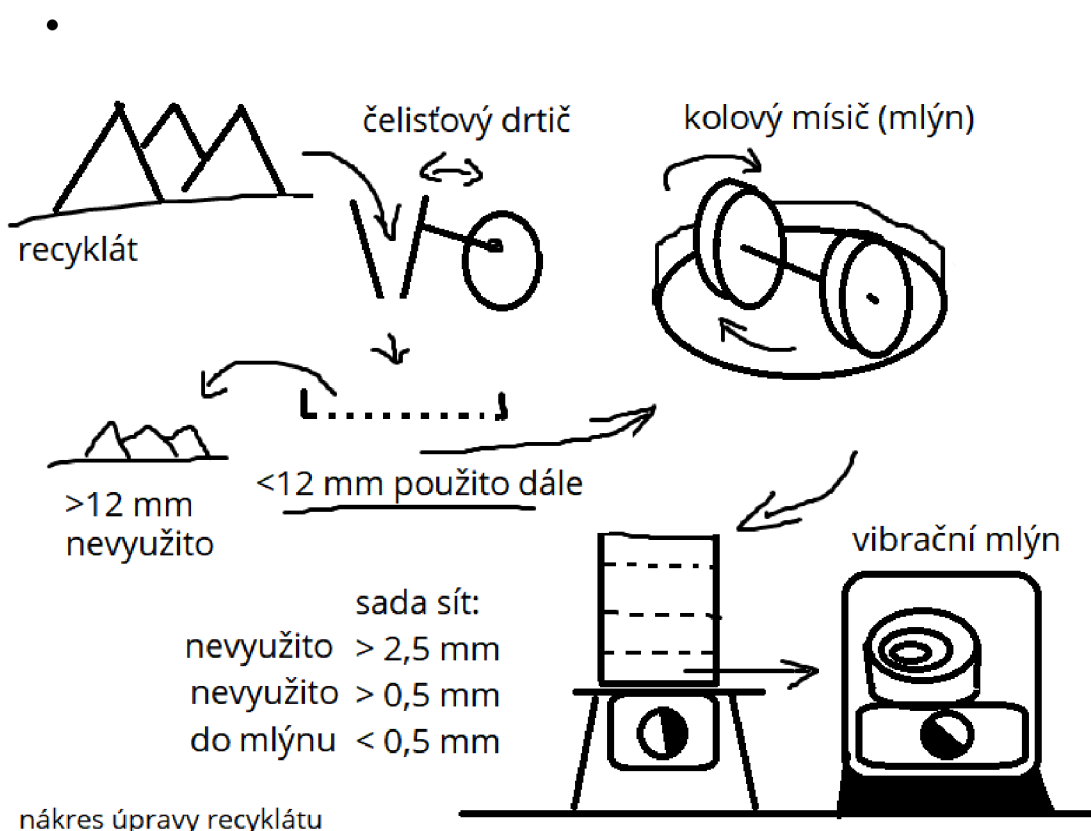
- betonový recyklát z rekonstrukce (demolice) CB krytu dálnice D1 - úsek Devět křížů - Velká Bíteš,
- betonový recyklát z fy Prefa Brno, závod Kuřim,
- betonový recyklát z demolice obchodního domu Avion v Brně,
- cement CEM I 42,5 R - fy Českomoravský cement, závod Mokrá,
- normový písek - fy Filtrační Písky, Chlum - Doksy
- kamenivo 8/16 Olbramovice, fy Českomoravský štěrk,
- drobné těžené kamenivo Žabčice, fy Písek Žabčice,
- voda - vodovodní řad Brno - Vírská přehrada
- plastifikační přísada Muraplast FK 19, fy MC Bauchemie.

13 POUŽITÉ RECYKLÁTY A JEJICH VLASTNOSTI

13.1 Úprava recyklátů před mletím

Po vysušení v laboratoři byl vzorek podrcen na čelistovém drtiči, kde byly vzorky upraveny na maximální velikost cca 20 mm. Následně prosety přes síto s oky 12 mm. Podsítný propad byl zjemněn na kolovém mísiči, jež se používá na homogenizaci cihlářských hlín.

Z takto zdrobněného vzorku odseparovány částice větší než 0,5 mm. Nadsítné nebylo dále využito. Podsítné bylo pro získání jemného prachu mleto ve **vibračním mlýně** v laboratoři při ÚTHD.



Obrázek 38: Nákres postupu při úpravě recyklátu - vlastní nákres

13.2 Mletí ve vibračním mlýně

Bylo prováděno podle postupů definovaných v následující kapitole - délka mletí a poté prosetí přes síto. Po porovnání indexů účinností, kterých jsem dosáhl a kterých dosáhli autoři komentovaných článků, bylo stanoveno, že tento typ mlýnu není nejvhodnější pro mechanickou aktivaci mletím.

13.3 Recyklát z bourané Dálnice D1

Pro experimentální část byl využit recyklát z bouraného úseku dálnice D1 - 9 Křížů - Velká Bíteš (demolice cca květen 2016 [web ŘSD]. Byl připraven na dvoře ÚTHD, v sudu. Jelikož do sudu pronikal déšť, musel být recyklát vysušen. Poté byl upraven pro experiment dle nákresu výše. Pro stanovení měrné hmotnosti byl navážen pomletý vzorek <math><0,250\text{ mm}</math> a pomocí pyknometrů stanovena měrná hmotnost (MH). Viz tabulka 9. Po konzultaci bylo dále počítáno s hmotností 2,300 g/cm³ MH je potřeba pro přípravu lůžka na stanovení jemnosti mletí Bleinovou metodou. Jemnosti získané různým mletím a následným prosetím přes různá síta je uvedeno v tabulce:

| popis směsi | použité síto | čas mletí | Měrná Hmotnost vzorku | | čas [s] průchodu | Měrný povrch S_p | | |
|-------------------------------|-------------------|-----------|-----------------------|---------------|---------------------|--------------------|------------|----------------------------------|
| | | | zjištěná MH | MH ve výpočtu | | vypočt. | zaokr. | cm ² /cm ³ |
| D 29 | 250 μm | bez mletí | | 2,300 | 27 | 291 | 290 | 12 093 |
| D 37 | 160 μm | bez mletí | | 2,300 | 43 | 368 | 370 | 15 430 |
| D 62 | 125 μm | 25 s | | 2,300 | 97 | 552 | 550 | 22 936 |
| D 80 | 64 μm | 90 s | 2,398 | 2,300 | 239,8 | 868 | 870 | 36 280 |
| D 80 Krychle = směs | 90 μm | 90 s | | 2,300 | 121 | 617 | 615 | 25 646 |
| <i>další vzorky nepoužité</i> | | | | | | | | |
| D 30s <125 | 125 μm | 30 s | | 2,300 | 121,2 | 617 | 620 | 26 957 |
| D 20s <125 | 125 μm | 20 s | | 2,300 | 105,5 | 576 | 580 | 25 217 |
| D (80) I *RTG | 90 μm | 90 s | | 2,300 | 124 | 624 | 620 | 26 957 |
| D (80) II | 90 μm | 90 s | | 2,300 | 118 | 609 | 610 | 26 522 |
| D 62 kontrol. | 125 μm | 25 s | | 2,300 | 121,5 | 618 | 620 | 26 957 |

Tabulka 9: měrné hmotnosti a měrné povrchy recyklátu z Dálnice D1

- Byly tedy definovány postupy pro získání jemností:
- 290 m²/kg - bez mletí prosetí přes síto 250 μm,
- 370 m²/kg - bez mletí proseto přes síto 160 μm,
- 620 m²/kg - mletí 25 s a následné prosetí přes 125 μm,
- 870 m²/kg - mletí 90 s s prosetím přes síto 64 μm
- (poté modifikováno na síto 90 μm - důvodem byla menší časová náročnost prosévání velkého množství).

13.4 Recyklát z bourané části Shopping Parku Avion Brno

Při demolici ŽB skeletu (v dubnu 2019) obchodního domu Avion v Brně byl (v červenci 2019) na skládce recyklátu odebrán vzorek. Důvodem pro výběr tohoto recyklátu byla domněnka, že recyklát z dálnice D1 je kompletně zhydratován, protože byl vystaven povětrnostním vlivům, včetně chemických rozmrazovacích látek. Původní konstrukce skeletu byla z větší části schována v interiéru = v suchu, kde byla běžná relativní vlhkost do 50 %.



Obrázek 39: Pohled na staveniště po demolici části skeletu



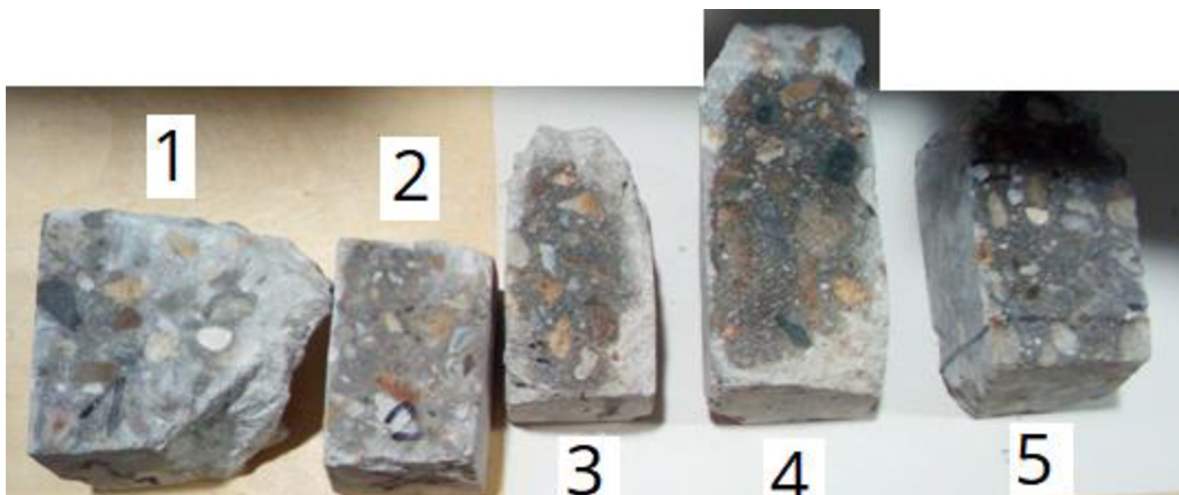
Obrázek 40: Na haldě byly k dispozici 3 typy betonů:

1/ drátko-beton - zřejmě původní průmyslová podlaha - /ten dále použit nebyl/;

2/ beton s těžným hrubým kamenivem;

3/ beton kde bylo hrubé kamenivo (zřejmě těžné) předrcené. V spodní části byly i hroudy zemin - na obrázku hnědé - vlevo

Z odebrané drti byly vyříznuty zkušební krychličky (viz fotografie (obr.40), které byly podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku. Hodnoty získaných pevností jsou uvedené v tabulce. Po redukci odlehlých sil byla vypočtena pevnost v tlaku.



Obrázek 41: Fotografie vyříznutých zkušebních těles

| Avion pevnost v tlaku [MPa] | | | | | |
|--|-------------|-----|----|-----|-------|
| vzorky v přípravku o základně 40x40 mm | | | | | |
| číslo vzorku | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Síla při porušení [kN] | 92 | 102 | 64 | 36 | 74 |
| redukce odlehých sil | 92 | max | 64 | min | 74 |
| pevnost | 57,5 | | 40 | | 46,25 |
| průměrná pevnost | 47,9 | | | | |

Tabulka 10: Pevnosti zkušebních těles z recyklátu Avion

Dále byl recyklát upraven mletím, jak je na schématu v kapitole 13.1.

Byla změřena měrná hmotnost, měrný povrch, viz tabulka 10.

| popis směsi | použité síto | čas mletí | Měrná Hmotnost vzorku | | čas [s] průchodu | Měrný povrch S_p | | |
|-----------------------------|-------------------|-----------|-----------------------|---------------|---------------------|--------------------|------------|---------------------------|
| | | | zjištěná MH | MH ve výpočtu | | vypočt. | zaokr. | cm^2/cm^3 |
| Avi 66 | 125 μm | 30 s | 2,448 | 2,300 | 157,5 | 704 | 700 | 30 435 |
| Avi 66 - skutečná MH | | | | 2,448 | 157,5 | 661 | 660 | 26 961 |

Tabulka 11: Tabulka měrné hmotnosti a měrného povrchu recyklátu Avion

13.5 Recyklát dodaný firmou Prefa Kuřim

V říjnu 2019 byl dodán recyklát z firmy Prefa Brno, pobočka Kuřim. Dle provedeného RTG (kapitola 13.6.) jde zřejmě o beton, který byl skladovaný venku, vystavený povětrnosti. Recyklát byl vysušen v laboratorním prostředí, následně byl upraven dle nákresu v kapitole 13.1.

Z prosívky byly namlety dvě jemnosti:

- postupem (37) /tedy: bez mletí <160 μm / označený jako P37 o $\text{MP} = 385 \text{ m}^2/\text{kg}$.
- postupem (62) /tedy: 25s mletí, <125 μm / označený jako P62 o $\text{MP} = 600 \text{ m}^2/\text{kg}$.

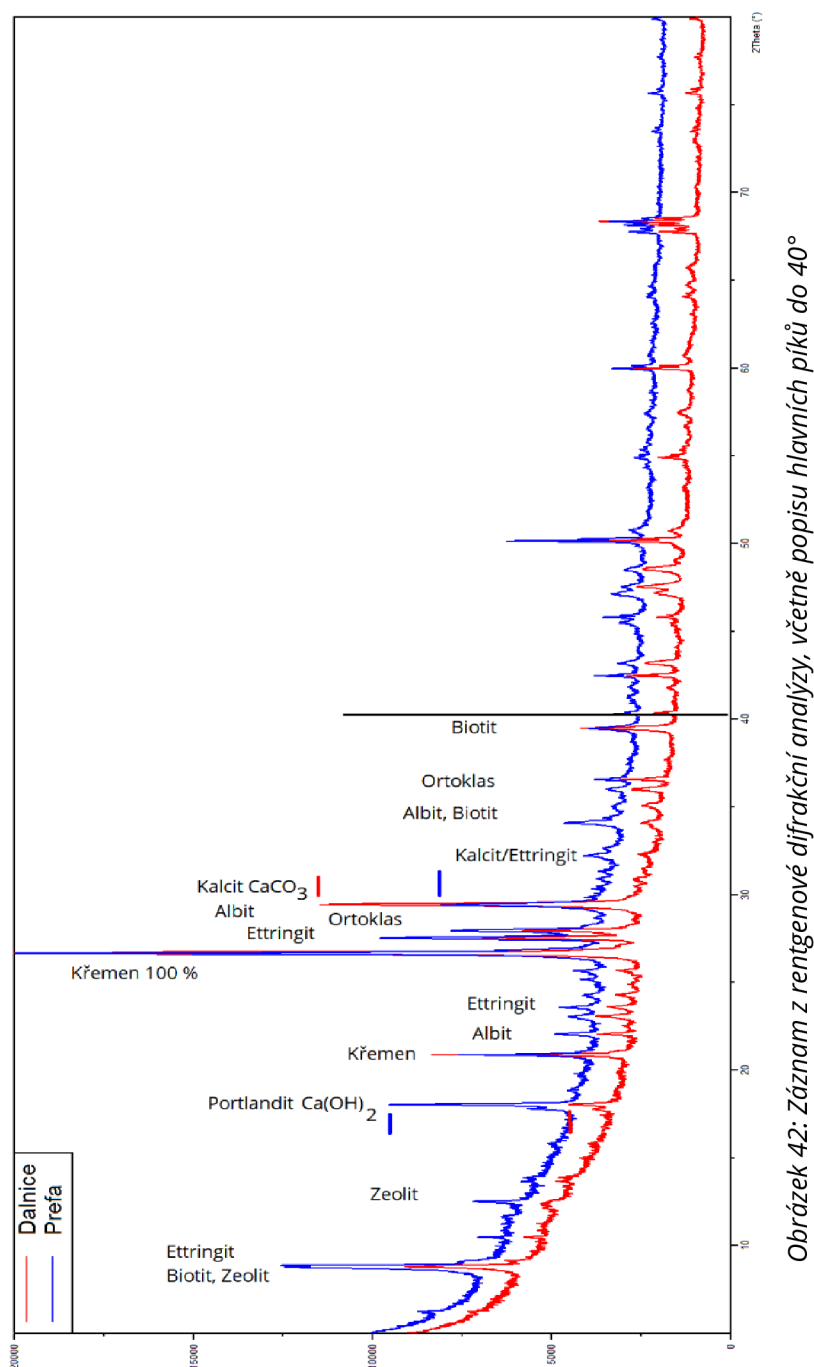
Ze vzorku P62 byla provedena analýza RTG difrakční analýzy.

| popis směsi | použité síto | čas mletí | Měrná Hmotnost vzorku | | čas [s] průchodu | Měrný povrch S_p | | |
|--------------------|-------------------|-----------|-----------------------|---------------|---------------------|--------------------|------------|---------------------------|
| | | | zjištěná MH | MH ve výpočtu | | vypočt. | zaokr. | cm^2/cm^3 |
| P (37) | 160 μm | bez mletí | | 2,300 | 47 | 384 | 385 | 16 176 |
| P (62) *RTG | 125 μm | 25 s | 2,380 | 2,300 | 113 | 596 | 600 | 25 210 |

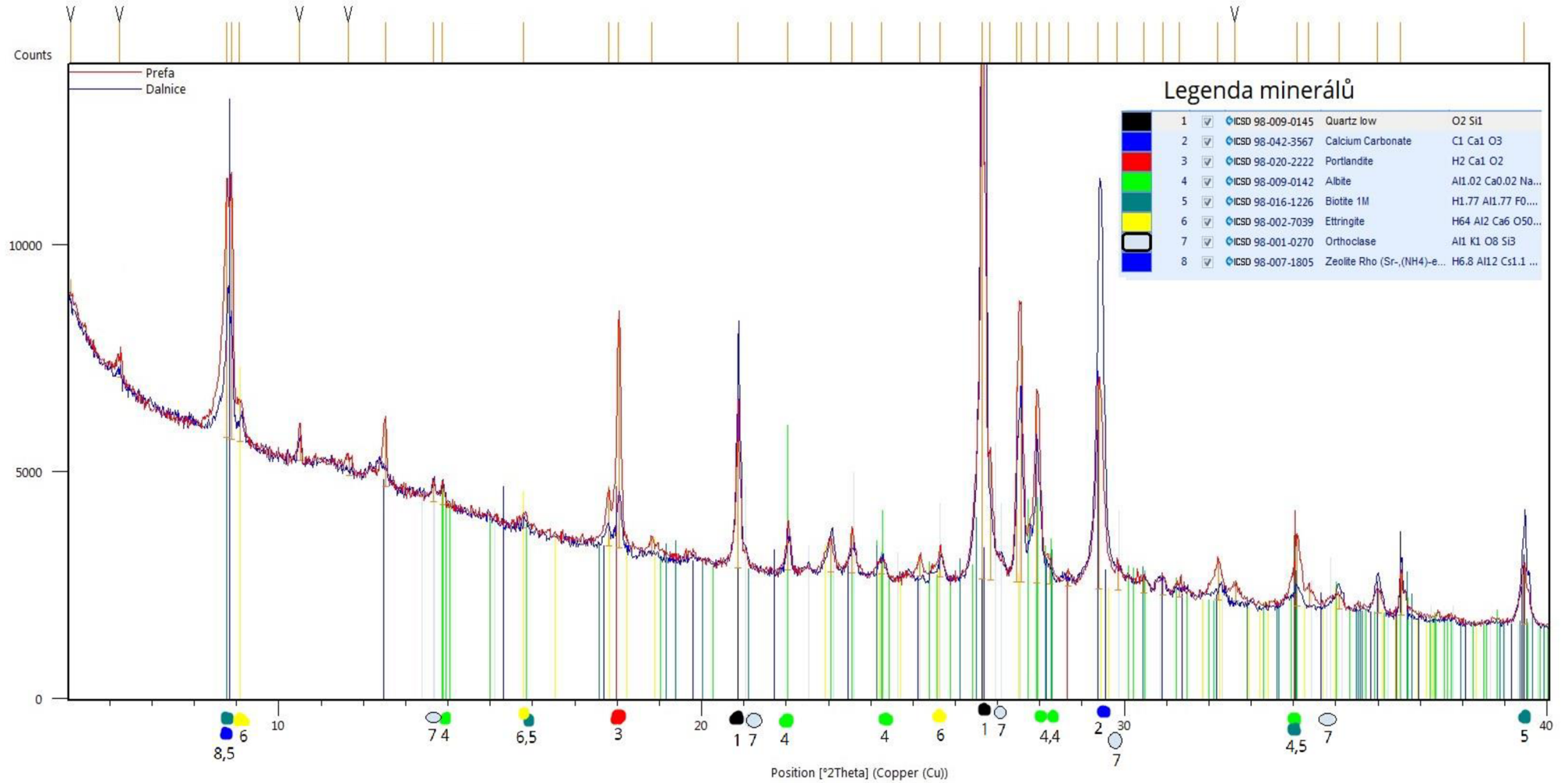
13.6 RTG analýza namletých recyklátů

Pro RTG analýzy byly zvoleny nejjemnější vzorky prachů z dálnice D1 a z Prefy Kuřim. RTG snímek je přiložen zde, vyhodnocený pak na dalším listu.

Důvodem provedení této analýzy bylo ověření, zda jsou v jemně pomletém prachu z matrice betonu (kamenivo bylo vyseparováno před mletím) přítomny nezhydratované částice.



Obrázek 42: Záznam z rentgenové difrakční analýzy, včetně popisu hlavních píků do 40°



Obrázek 43: Záznam z rentgenové difrakční analýzy, včetně vyhodnocení hlavních píků.

Vykreslené diagramy vzorků z dálnice D1 a Prefa Kuřim se v pozici píků zcela shodují. Liší se intenzitou pozadí při záznamu.

13.6.1 Obsah minerálů

Na rtg záznamech se **neobjevily slínkové minerály**. V případě přítomnosti slínkových minerálů by byly zaznamenány píky na hlavních pozicích:

- C_3S - Allit - 32°
- C_3A - Tri_kalcium Aluminát - $33,2^\circ$ (kubický)
- C_2S - Belit - 32°
- C_4AF - Brown_millerit - $12,2^\circ; 33,1^\circ$

Na snímcích se ale **objevily píky**:

- Portlanditu $Ca(OH)_2$ - $18,1^\circ$
- Kalcitu $CaCO_3$ - $29,4^\circ$...viz. 13.6.2.
- Ettringit $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32 \cdot H_2O$ - na pozici 9° (100 %), $15,8^\circ$ -
- není jasné, zda jde o primární nebo o sekundární Ettringit.

Další přítomné píky:

- **Křemen** - z kameniva
- **Albit** - z kameniva
- **Biotit** - z kameniva
- **Ortoklas** (draselný živec) -
původ v kamenivu
- Zřejmě se zde objevil také **Zeolit** -
pokud byl použit nepraný písek,
nebo došlo ke znečištění hlínou při
manipulaci s recyklátem.

13.6.2 Změna Portlanditu na Kalcit

Probíhá dle rovnice: $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

Rovnice 27: Rovnice chemické reakce Portlanditu

Zde chci poukázat na fakt, který odlišuje vzorky z Dálnice a z Prefy.

U vzorku Dálnice D1 pík odpovídající Portlanditu je méně intenzivní než pík Portlanditu u vzorku z Prefy. A zároveň pík Kalcitu ve vzorku Dálnice D1 je více intenzivní než u vzorku z Prefy.

Vysvětlení je dle mého názoru, i názoru pana doktora Gazdiče právě v proběhlé chemické reakci, kde u vzorku dálnice přešlo více minerálu Portlanditu (například karbonatů) na formu Kalcitu, dle výše zmíněné rovnice. Důvodem je stáří vzorku a jeho skladování v exteriéru na povětrnosti.

14 TESTOVÁNÍ CEMENTOVÝCH MALT S NAMLETÝMI RECYKLÁTY

14.1 Příprava cementových malt

Postup míchání:

1. navážení surovin
2. homogenizace recyklátu s cementem nasucho
3. umístění do normové míchačky
4. vlití ½ vody = počátek měření času
5. zapnutí cyklu
6. vsypání písku
7. vlití plastifikační přísady + zbytek vody
8. dokončení cyklu
9. vyčkání 15 minut pro stanovení konzistence
10. plnění do formy.

Směsi míchané v první etapě byly připraveny bez použití plastifikační přísady.

Ve druhé etapě byly směsi připravené s 0,7 % plastifikační přísady z hmotnosti směsi recyklátu a cementu. Došlo také ke změně způsobu míchání – bez vysokootáčkové části cyklu.

Všechny směsi byly míchané na co nejbližší rozliv na střešacím stolku.

Byla použita přísada **Hybridní plastifikační přísada Muraplast FK 19** (MC Bauchemie) se ztekucujícím a dispergačním účinkem. Jedná se o směs polykarboxylátu a naftalenu

| Vlastnost dle katalogového listu | Hodnota |
|----------------------------------|---|
| redukce vody | ≥ 12 % (tab. 11.1); ≥ 5 % (tab. 2) |
| Měrná hmotnost | 1140 kg/m ³ |
| Obsah chloridů | < 0,1 % |
| Obsah alkálií | < 3,0 % |
| doporučené dávkování | 2 - 20 g / kg cementu (pozn. 0,2-2,0 %) |
| typ dle KL | retardér / superplastifikátor dle EN 934-2: T 11.1/11.2 (plastifikátor do betonu dle EN 934-2: T 2) |
| hodnota pH (20 °C) | 7 |

Tabulka 12: Vlastnosti superplastifikační přísady Muraplast FK 19 [56]

14.2 Receptury cementových malt a vlastnosti v čerstvém stavu

Je mícháno 11 směsí dle receptur zobrazených v následujících kapitolách.

Předpoklad byl, že čím je větší jemnost moučky, tím bude větší potřeba záměsové vody, to se ne ve všech případech nepotvrdilo.

14.2.1 Receptury REF PN a D80

| 26.04.19 | D80 (bez PP) | REF PN | jedn. |
|--------------------------------|--------------|--------|-------|
| dálnice 870 m ² /kg | 112,5 | 0 | g |
| cement | 337,5 | 450 | g |
| voda | 225 | 225 | g |
| plastif. přísada | 0 | 0 | g |
| písek normový | 1350 | 1350 | g |
| rozliv 7,5 minut | 160 | 157 | mm |
| rozliv 15 minut | 150 | 164 | mm |

Tabulka 13: Receptury REF PN a D80

Receptura referenční byla náchylná na odlučování vody, toto u směsi s recyklátem nebylo pozorováno. Konzistence 7,5 minuty byla téměř stejná. Konzistence 15 minut odhalila, že recyklát by potřeboval na

stejný rozliv více vody. Ta nebyla přidána. Pro IU jsou tyto dvě receptury porovnané mezi sebou

14.2.2 Receptury Avion 66 a REF PŽ

| 12.07.19 | AVI 66 | REF PŽ | jedn. |
|------------------------------|----------|--------|-------|
| Avion 660 m ² /kg | 112,5 | 0 | g |
| cement | 337,5 | 450 | g |
| voda | 225 | 225 | g |
| plastif. přísada | 0 | 0 | g |
| písek normový | 1350 | 0 | g |
| písek Žabčice | 0 | 1350 | g |
| rozliv 7,5 minut | 145 | 155 | mm |
| rozliv 15 minut | neměřeno | 165 | mm |

Tabulka 14: Receptury AVI 66 a REF PŽ

Receptura referenční byla mírně (méně než předchozí reference) náchylná na odlučování vody, toto nebylo pozorováno u směsi s recyklátem. Písek byl brán z povrchu = suchý. Konzistence 7,5 minuty odhalila, že recyklát by potřeboval na stejný rozliv více vody. Ta nebyla přidána.

Pro IU je receptura Avion 66 porovnána s recepturou REF PN.

14.2.3 Receptury REFplast, Dálnice D1 - D29, D37, D62

| 16, 17, 18.10.19 | REF plast | D29 | D37 | D62 | jedn. |
|--------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| cement | 450 | 337,5 | 337,5 | 337,5 | g |
| dálnice 290 m ² /kg | 0 | 112,5 | 0 | 0 | g |
| dálnice 370 m ² /kg | 0 | 0 | 112,5 | 0 | g |
| dálnice 620 m ² /kg | 0 | 0 | 0,0 | 112,5 | g |
| voda průměrně | 189,0 | 219,6 | 217,1 | 213,1 | g |
| plastif. přísada | 3,15 | 3,15 | 3,15 | 3,15 | g |
| písek normový | 1350 | 1350 | 1350 | 1350 | g |
| \bar{X} rozliv 7,5 minut | 144 | 146 | 148 | 157 | mm |
| \bar{X} rozliv 15 minut | 144 | 140 | 141 | 142 | mm |
| rozdíl konzistence | 0,5 | -5,8 | -6,5 | -14,8 | mm |

Tabulka 15: Receptury REFplast, D29, D37, D62

Odlučování vody u směsi referenční bylo téměř nevýrazné - zafungoval plastifikátor.

Spotřeba vody jde proti očekávaným zvyklostem (větší měrný povrch = více vody); ale je zde efekt rychlejší odebrání vody ze směsi, čímž padá konzistence - rozlivem. Ten byl u referenční směsi (s rozdílem 7,5 minut) téměř totožný, u D29 hodnota rozlivu poklesla o 5,8 mm; u D37 o 6,5 mm a u směsi D62 poklesl rozliv o 14,8 mm. Pro IU jsou tyto receptury porovnány s touto REFplast.

Dle hodnot spotřeby vody při totožném počátečním rozlivu lze říci, že tento typ plastifikátoru **není nejvhodnější**. Pokud bychom chtěli zjistit, který by byl vhodný, je třeba provést další zkoumání.

Směsi se lépe hutnily do forem, díky použití plastifikátoru, tedy zapůsobil dle funkce „1“ u obrázku 30. v kap. 8.2.4.

14.2.4 Receptury Prefa - P37 a P62, CEM-25 %

| 4, 5.11.19 | P37 | P62 | cem -25% | jedn. |
|------------------------------|-------|-------|--------------|-------|
| cement | 337,5 | 337,5 | 337,5 | g |
| prefa 385 m ² /kg | 112,5 | 0 | 0 | g |
| prefa 600 m ² /kg | 0 | 112,5 | 0 | g |
| voda průměrně | 222,3 | 212,6 | 197,6 | g |
| plastif. přísada | 3,15 | 3,15 | 2,36 | g |
| písek normový | 1350 | 1350 | 1350 | g |
| \bar{X} rozliv 7,5 minut | 160 | 156 | 157 | mm |
| \bar{X} rozliv 15 minut | 144 | 140 | 141 | mm |
| rozdíl konzistence | -16,0 | -15,8 | -15,7 | mm |

Tabulka 16: Receptury P37, P62, cem-25%

Spotřeba okamžité vody i u těchto záměsí šla proti zvyklostem, s rostoucím měrným povrchem klesala.

Trend ztráty konzistence za čas 7,5 minuty ale byl výrazný: - 16 mm u P37, - 15,8 mm u P62.

Směs „CEM-25 %“ byla namíchána jako zkušební, abych mohl posoudit, zda tak nízké pevnosti (potažmo indexy účinnosti) jsou kvůli „aktivitě recyklátu“ nebo jeho neaktivitě. Pro IU jsou tyto receptury porovnány s recepturou REFplast

14.3 Vlastnosti cementových malt ve ztvrdlém stavu

Vzorky byly po odformování uloženy ve vodním uložení po dobu zrání 14, 28, 60 dní. Před zkouškou vytaženy z uložení a povrchově osušeny.

14.3.1 Objemová hmotnost

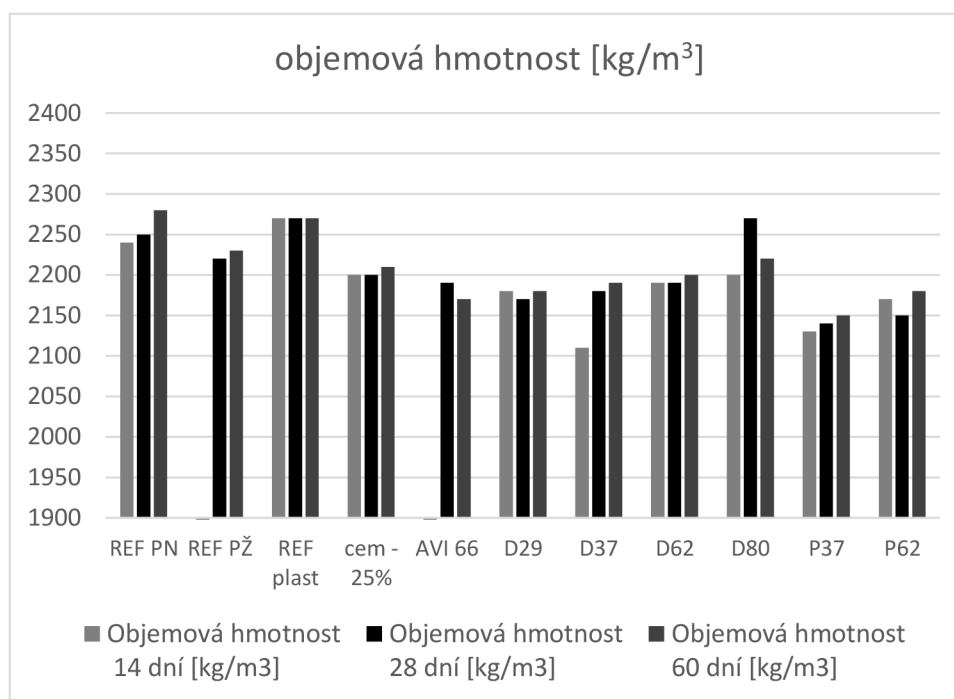
| název | zkratka názvu | Objemová hmotnost 14 dní [kg/m ³] | Objemová hmotnost 28 dní [kg/m ³] | Objemová hmotnost 60 dní [kg/m ³] |
|---|---------------|---|---|---|
| referenční - písek normový | REF PN | 2240 | 2250 | 2280 |
| referenční - písek Žabčice | REF PŽ | - | 2220 | 2230 |
| referenční PN + Plast.Přísada | REF plast | 2270 | 2270 | 2270 |
| cement -25 % (PN) + PP | cem -25% | 2200 | 2200 | 2210 |
| Avion 660 m ² /kg | AVI 66 | - | 2190 | 2170 |
| dálnice 290 m ² /kg | D29 | 2180 | 2170 | 2180 |
| dálnice 370 m ² /kg | D37 | 2110 | 2180 | 2190 |
| dálnice 620 m ² /kg | D62 | 2190 | 2190 | 2200 |
| dálnice 800 m ² /kg (bez PP) | D80 | 2200 | 2270 | 2220 |
| prefa 385 m ² /kg | P37 | 2130 | 2140 | 2150 |
| prefa 600 m ² /kg | P62 | 2170 | 2150 | 2180 |

Tabulka 17: Tabulka objemových hmotností - malty

Objemová hmotnost mírně s časem rostla, díky hydrataci slínkových minerálů.

U některých směsí zůstala nezměněna, vliv uložení ve vodě.

Betony (RFKR, Dkr 62, Dkr 80) měli objemovou hmotnost mírně vyšší, důvodem je použití kameniva o větší OH.

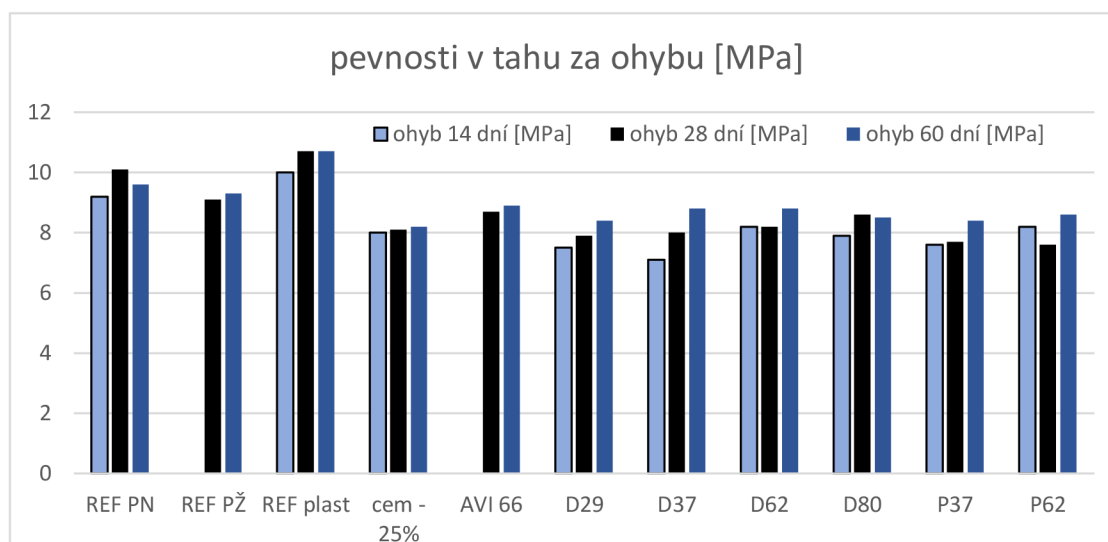


Obrázek 44: Graf objemové hmotnosti - malty

14.3.2 Pevnost v tahu za ohybu - trámečky 4-4-16

| mícháno | název receptury | zkratka názvu | ohyb 14 dní [MPa] | ohyb 28 dní [MPa] | ohyb 60 dní [MPa] |
|----------|---|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 26.04.19 | referenční - písek normový | REF PN | 9,2 | 10,1 | 9,6 |
| 12.07.19 | referenční - písek Žabčice | REF PŽ | - | 9,1 | 9,3 |
| 16.10.19 | referenční PN + Plast.Přísada | REF plast | 10 | 10,7 | 10,7 |
| 5.11.19 | cement -25 % (PN) + PP | cem -25% | 8 | 8,1 | 8,2 |
| 12.07.19 | Avion 660 m ² /kg | AVI 66 | - | 8,7 | 8,9 |
| 17.10.19 | dálnice 290 m ² /kg | D29 | 7,5 | 7,9 | 8,4 |
| 17.10.19 | dálnice 370 m ² /kg | D37 | 7,1 | 8 | 8,8 |
| 18.10.19 | dálnice 620 m ² /kg | D62 | 8,2 | 8,2 | 8,8 |
| 26.04.19 | dálnice 800 m ² /kg (bez PP) | D80 | 7,9 | 8,6 | 8,5 |
| 4.11.19 | prefa 385 m ² /kg | P37 | 7,6 | 7,7 | 8,4 |
| 4.11.19 | prefa 600 m ² /kg | P62 | 8,2 | 7,6 | 8,6 |

Tabulka 18: Tabulka pevností malt v tahu za ohybu



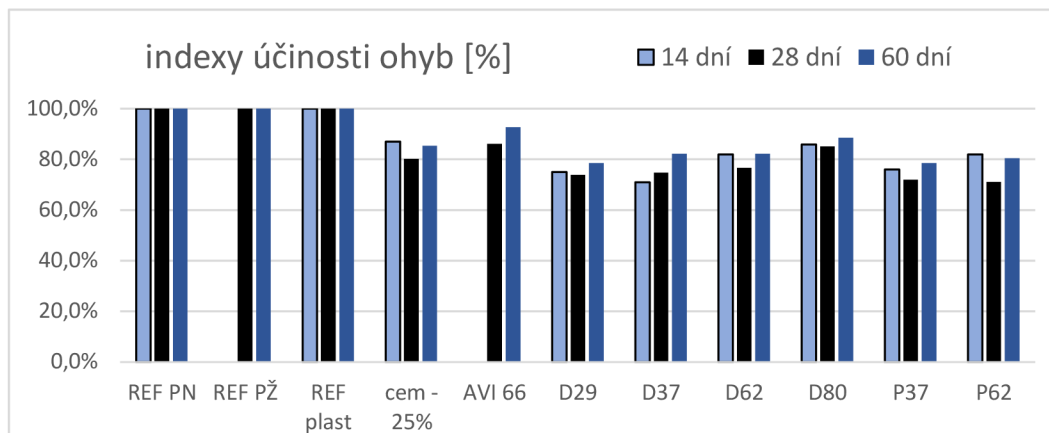
Obrázek 45: Graf pevností v tahu za ohybu - malty

Největší pevnosti v tahu za ohybu dosáhly směsi referenční - REF plast - 10,7 MPa. Ze směsí s recykláty dosáhla pevnosti 8,7 Mpa vzorek Avion 660., následoval vzorek D80 - s pevností 8,6 Mpa v tlaku po 28 dnech. Pevnosti s časem rostly.

14.3.3 Index účinnosti a poměr ohyb/tlak - trámečky

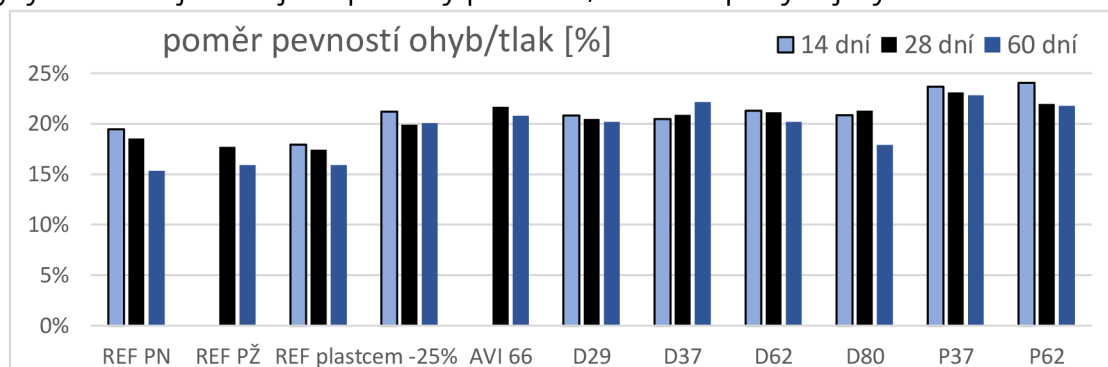
| název | indexy účinnosti | | | poměr ohyb / tlak | | |
|-----------|------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|
| | 14 dní | 28 dní | 60 dní | 14 dní | 28 dní | 60 dní |
| REF PN | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 19% | 19% | 15% |
| REF PŽ | - | 100,0% | 100,0% | - | 18% | 16% |
| REF plast | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 18% | 17% | 16% |
| cem -25% | 87,0% | 80,2% | 85,4% | 21% | 20% | 20% |
| AVI 66 | - | 86,1% | 92,7% | - | 22% | 21% |
| D29 | 75,0% | 73,8% | 78,5% | 21% | 20% | 20% |
| D37 | 71,0% | 74,8% | 82,2% | 20% | 21% | 22% |
| D62 | 82,0% | 76,6% | 82,2% | 21% | 21% | 20% |
| D80 | 85,9% | 85,1% | 88,5% | 21% | 21% | 18% |
| P37 | 76,0% | 72,0% | 78,5% | 24% | 23% | 23% |
| P62 | 82,0% | 71,0% | 80,4% | 24% | 22% | 22% |

Tabulka 19: Tabulka indexů účinnosti v tahu za ohybu - malty



Obrázek 46: Graf indexů účinnosti v tahu za ohybu - malty

Indexy účinnosti pro ohyb jsou výrazně lepší než pro pevnosti v tlaku. Důvodem je vyplnění struktury zrny recyklátu v mezerách mezi zrny cementu. A tedy větší tranzitní zóna, po které se přenesou ohyb. A to i přes větší počet trhlinek od vysychání. Zajímavé jsou poměry pevnosti, které se pohybují výše než 20 %.



Obrázek 47: Graf poměru pevností v ohybu a v tlaku

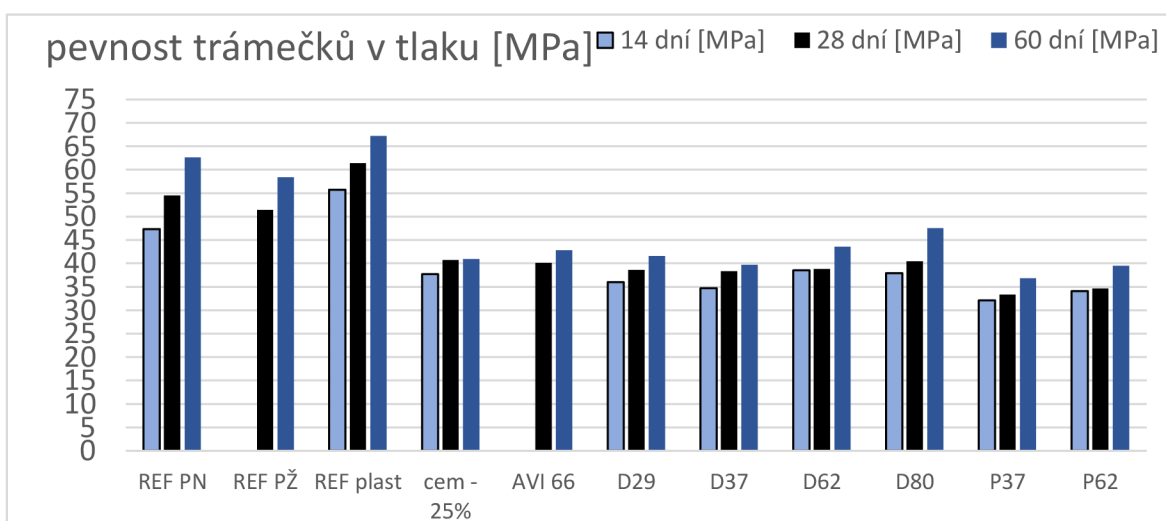
14.3.4 Pevnost v tlaku - trámečky 4-4-16

Pevnost v tlaku referenčních směsí dosáhla největších hodnot, jak bylo očekáváno. Pevnosti s časem rostly, tento trend byl u referenčních směsí výraznější než u směsí s recykláty.

| mícháno | název receptury | zkratka názvu | 14 dní [MPa] | 28 dní [MPa] | 60 dní [MPa] |
|----------|-------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| 26.04.19 | referenční - písek normový | REF PN | 47,3 | 54,5 | 62,6 |
| 12.07.19 | referenční - písek Žabčice | REF PŽ | - | 51,4 | 58,4 |
| 16.10.19 | referenční PN + Plast.Přísada | REF plast | 55,7 | 61,4 | 67,2 |
| 5.11.19 | cement -25 % (PN) + PP | cem -25% | 37,7 | 40,7 | 40,9 |
| 12.07.19 | Avion 660 m2/kg | AVI 66 | - | 40,1 | 42,8 |
| 17.10.19 | dálnice 290 m2/kg | D29 | 36 | 38,6 | 41,6 |
| 17.10.19 | dálnice 370 m2/kg | D37 | 34,7 | 38,3 | 39,7 |
| 18.10.19 | dálnice 620 m2/kg | D62 | 38,5 | 38,8 | 43,6 |
| 26.04.19 | dálnice 800 m2/kg (bez PP) | D80 | 37,9 | 40,4 | 47,5 |
| 4.11.19 | prefa 385 m2/kg | P37 | 32,1 | 33,3 | 36,8 |
| 4.11.19 | prefa 600 m2/kg | P62 | 34,1 | 34,6 | 39,5 |

Tabulka 20: Pevnosti v tlaku - malty

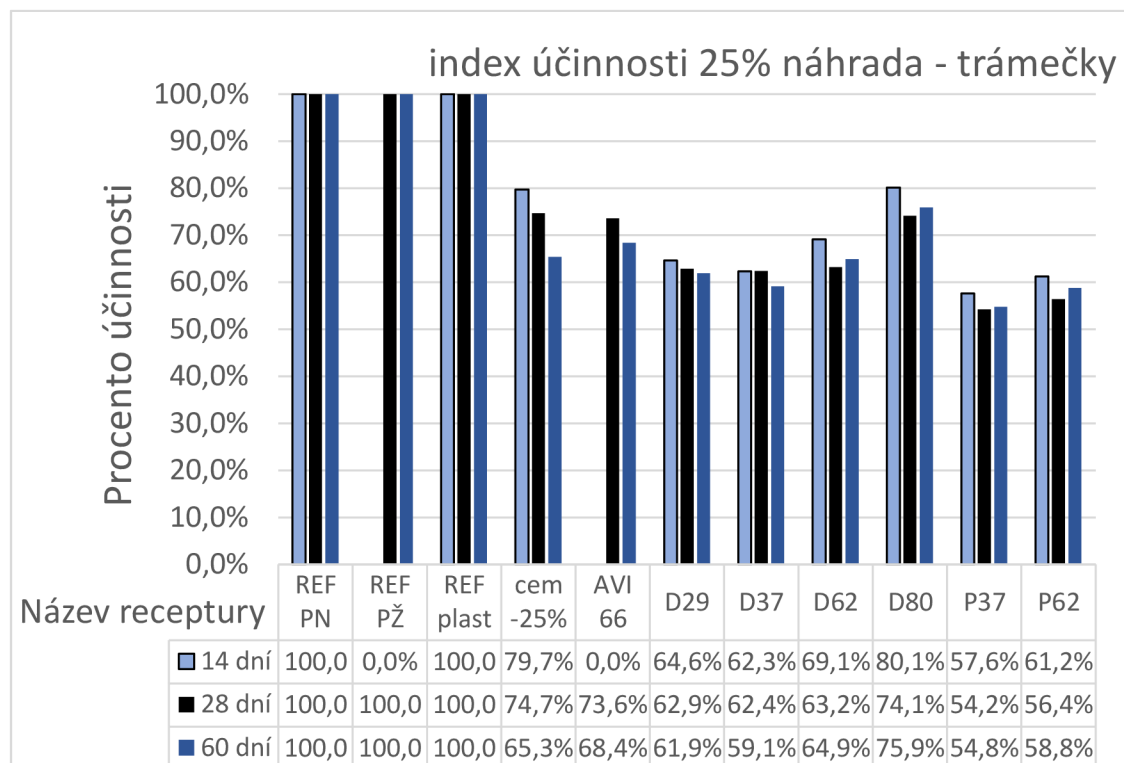
Nejvyšší pevnosti dosáhla referenční směs s plastifikátorem a s normovým pískem /REF plast/ (po 28 dnech to bylo 61,4 MPa). Nejnižší pevnost (po 28 dnech) dosáhla směs P37 - 33,3 MPa. Hodnoty pevností jsou uvedeny v tabulce a zobrazeny v grafu:



Hodnoty pevností u vzorků AVI66 a REF PŽ nejsou uvedeny v tabulce, důvodem je ztráta naměřených hodnot v laboratoři.

14.3.5 Index účinnosti v tlaku – trámečky 4-4-16

Indexy účinnosti odpovídají získaným pevnostem v závislosti na referenční receptuře, se kterou se daná receptura porovnává (viz popis receptur v kapitole 14.2.). Indexy účinnosti jsou uvedeny v tabulce na další straně.



Obrázek 49: Graf s tabulkou hodnot - indexy účinnosti v tlaku - malty

Receptura Avion 660 m²/kg

Tato směs dosáhla účinnosti 73,6 % ve 28 dnech. Tento výsledek může být způsoben čerstvým recyklátem, jak bylo popsáno v popisu recyklátu.

Receptury dálnice D1

Indexy účinnosti nejsou zcela závislé na jemnosti mletí, jsou pro jemnosti 290, 370, 620 téměř totožné (62,9; 62,4; 63,2 [%]). Výjimku tvoří jemnost 800 m²/kg, kde se zvedla účinnost o cca 11 % (na 74,1 %) než předchozí jmenované.

Receptury Prefa dosáhly nejnižších indexů účinnosti - 54,2 a 56,4 % po 28 dnech směsí P37 a P62.

| název směsi | 14 dní | 28 dní | 60 dní |
|----------------|--------|--------|--------|
| REF PN | 100,0% | 100,0% | 100,0% |
| REF PŽ | - | 100,0% | 100,0% |
| REF plast | 100,0% | 100,0% | 100,0% |
| cem -25% | 79,7% | 74,7% | 65,3% |
| AVI 66 | - | 73,6% | 68,4% |
| D29 | 64,6% | 62,9% | 61,9% |
| D37 | 62,3% | 62,4% | 59,1% |
| D62 | 69,1% | 63,2% | 64,9% |
| D80 | 80,1% | 74,1% | 75,9% |
| P37 | 57,6% | 54,2% | 54,8% |
| P62 | 61,2% | 56,4% | 58,8% |
| minimum | | | |
| P37 | 57,6% | 54,2% | 54,8% |
| maximum | | | |
| D80 | 80,1% | 74,1% | 75,9% |
| cem -25% | 79,7% | 74,7% | |

Tabulka 21: Tabulka indexů účinnosti v tlaku -

Indexy účinností v čase jsou méně vypovídající, jelikož nárůst pevností směsí referenčních je větší než nárůst pevností u směsí s recykláty.

Nejnižších indexů v čase dosáhla záměs P37 - (57,6 %-14 dní, 54,2-28 dní, 54,8-60 dní). Je to z důvodu hrubosti recyklátu, který nebyl mletý, ale jen prosetý přes síto 160 μ m. Oproti směsi s Dálnicí 370 m^2/kg je výsledek horší o 4,7 % - 14 dní, 8,1 % - 28 dní; 4,3 % - 60 dní.

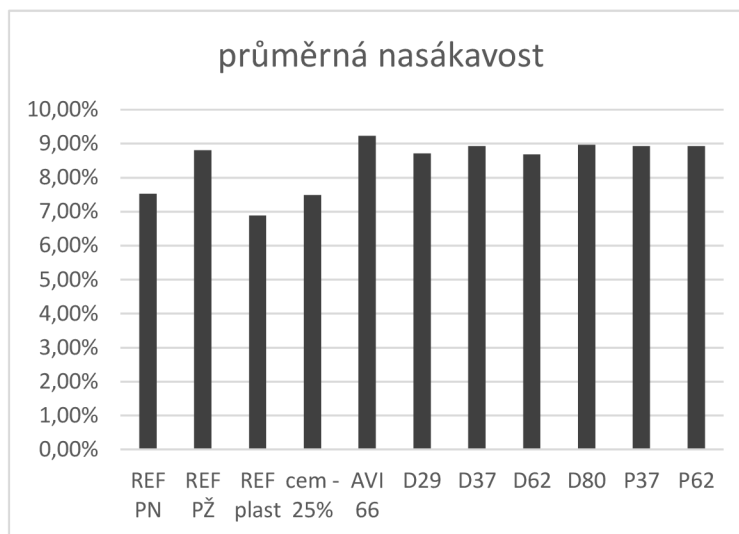
Směs Dálnice 80 - je porovnána s REF PN, protože v ní není použita plastifikační přísada. Je to možný důvod, že dosáhla maximálních indexů účinnosti, jak je uvedeno v tabulce výše.

Záměs, ve které chyběla $\frac{1}{4}$ cementu (cem-25%), má podobně vysoké hodnoty jako směs D80.

Celkově lze konstatovat, že mnou prováděné mletí na vibračním mlýně nezpůsobilo mechanickou aktivaci vstupních recyklátů. Při náhradě $\frac{1}{4}$ pojiva za recyklát se pevnosti degradovali o více než je procent náhrady /IU <75 %./, Pevnosti po 14 dnech jsou v některých případech menší než při odebrání $\frac{1}{4}$ pojiva. Po 28 dnech jsou srovnatelné, po 60 dnech jsou pevnosti s recyklátem mírně vyšší nebo srovnatelné než při vynechání $\frac{1}{4}$ cementu.

14.3.6 Nasákavost na úlomcích trámečků

| název směsi | průměrná nasákavost |
|-------------|---------------------|
| REF PN | 7,53% |
| REF PŽ | 8,81% |
| REF plast | 6,88% |
| cem -25% | 7,49% |
| AVI 66 | 9,22% |
| D29 | 8,72% |
| D37 | 8,93% |
| D62 | 8,68% |
| D80 | 8,97% |
| P37 | 8,92% |
| P62 | 8,93% |



Tabulka 22: tabulka nasákavostí úlomků malt.

Obrázek 50: Graf nasákavosti úlomků - úlomek vybrán s nejnižší hmotností ze sady

Nasákavost vzorků referenčních je nižší než vzorků s jemně mletým recyklátem. Největší nasákavost má vzorek Avion 66 - 9,22 %, nejméně vzorek ze směsi referenční s plastifikátorem - REF plast - 6,88 %. Směs cem-25% má nasákavost nižší než směsi s jemně mletým recyklátem - 7,49 %, ale vyšší než směs REF plast - 6,88 %. Z výše popsaného vyplývá, že náhrada 25 % pojiva způsobila značnou nasákavost.

15 MĚŘENÍ REOMETRIE CEMENTOVÝCH PAST

Na reometru (na Ústavu Chemie FAST VUT v Brně pod vedením doc. Rovnaníka) byly měřeny tokové křivky, sledována byla změna meze toku v čase, v závislosti na jemnosti mletí, a také změna viskozity v čase.

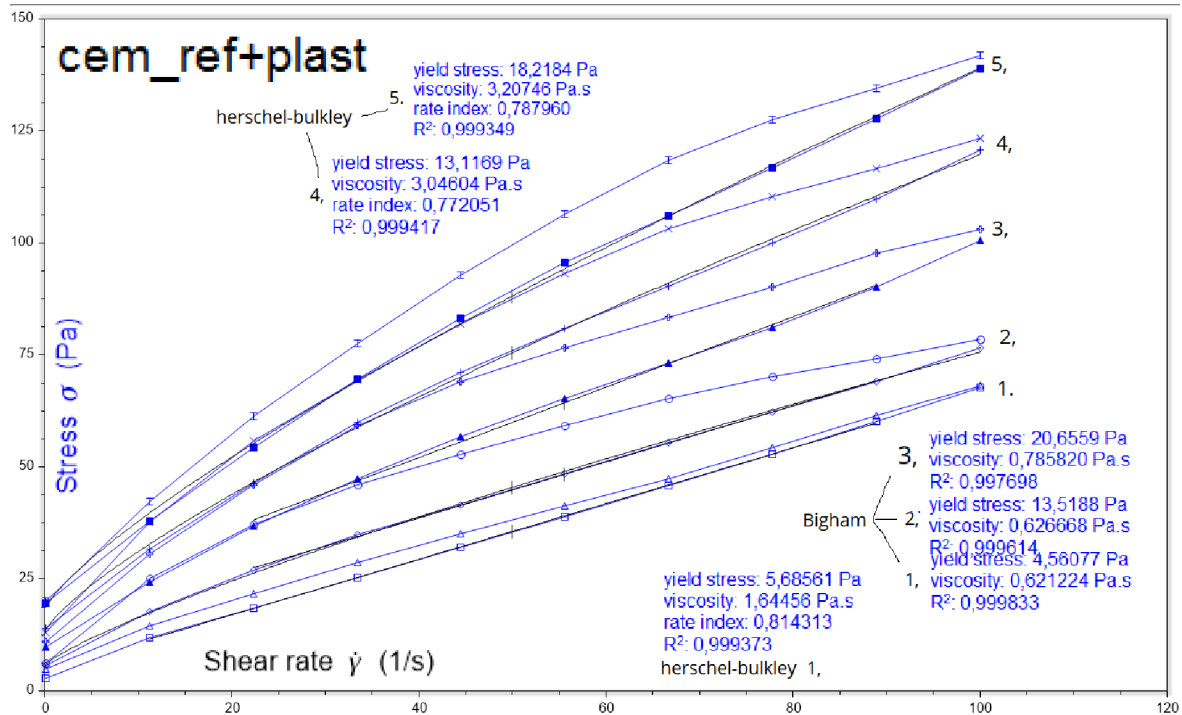
Pro porovnání bylo sledováno sednutí kužílku (9 minut od zamíchání cem+voda), dle normy ASTM. Kužílek byl plněn ve dvou vrstvách, hutněn skleněnou tyčinkou, rozměry kužílku jsou \varnothing_d - 37 mm, \varnothing_h - 19 mm, V - 57 mm.

Stanovení probíhalo na cementové pastě: w = 0,4, 25% náhrada cementu jemně mletými recykláty z dálnice D1.

Byl definován postup měření dle tabulky:

| | | smyková rychlost (shear rate) | | | |
|--------|-----------------------|----------------------------------|---------------|-----------|---------|
| | | teplota při kroku | doba kroku | počáteční | konečná |
| krok 1 | temperace | 25,0 °C | 60 s | | |
| | míchání | | 30 s | 100 1/s | |
| krok 2 | křivka 0,1-100 | 25,0 °C | | 0,1 1/s | 100 1/s |
| | měření na křivce | | 10x á 12 s | | |
| krok 3 | křivka 100 - 0,1 | 25,0 °C | | 100,0 1/s | 0,1 1/s |
| | měření na křivce | | 10x á 12 s | | |
| krok 4 | míchání mezi měřeními | 25,0 °C | 630 s | 10,0 1/s | |
| | znovu krok 1 | | | | |

Tabulka 23: Definice kroků měření reometrických vlastností v čase

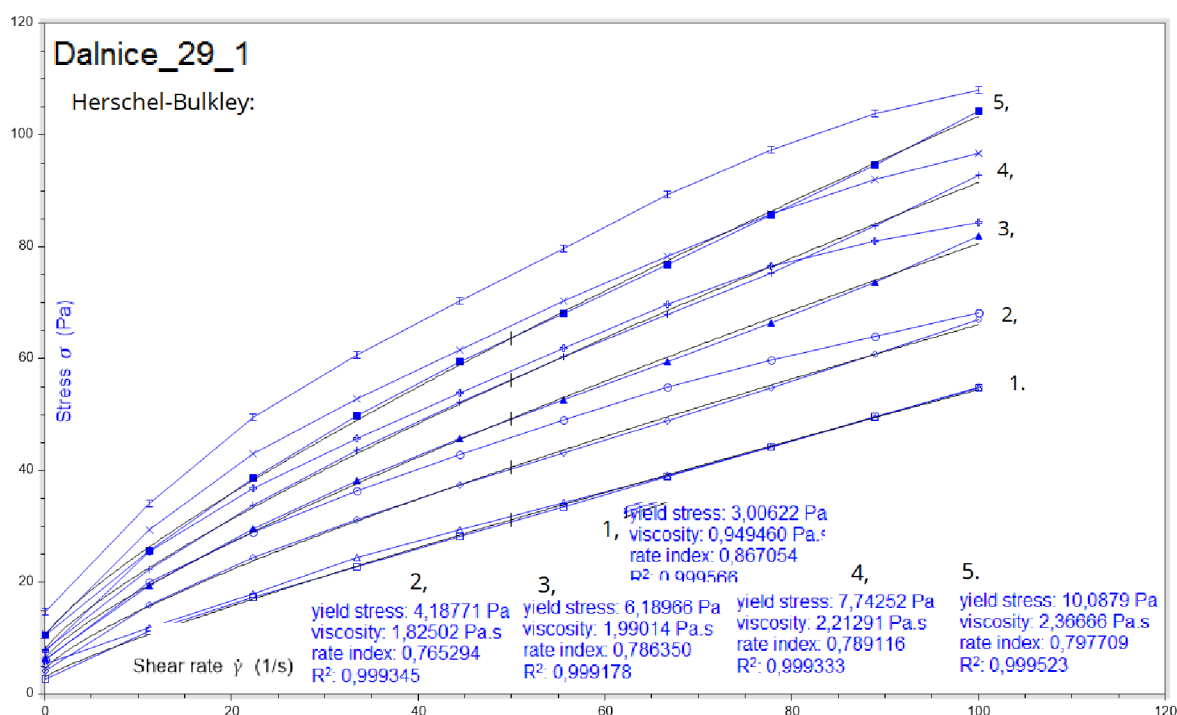


Obrázek 51: Měření reometrických vlastností - cem_ref

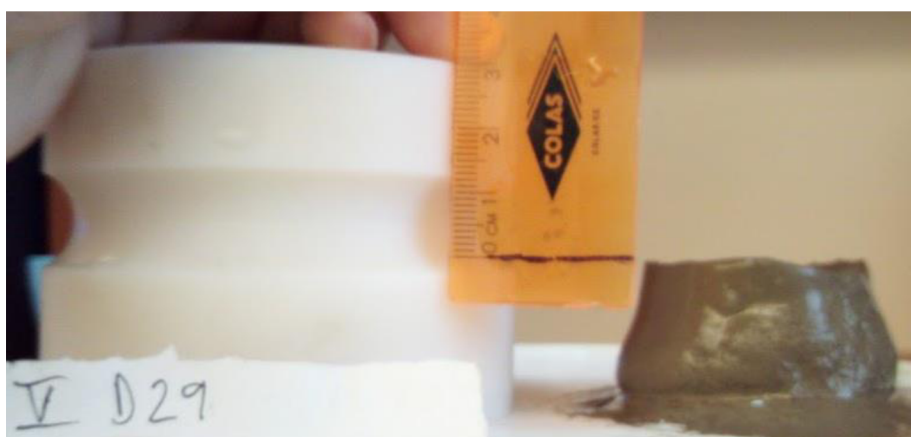


Obrázek 52: Reometrické vlastnosti - sednutí kužílku - cem_ref

Popis výsledku měření: v čase stoupala mez toku z 4,5 na 20 Pa, viskozita z 0,62 na 3,2 Pas. Sednutí kužílku 25 mm.



Obrázek 53: Měření reometrických vlastností - D29

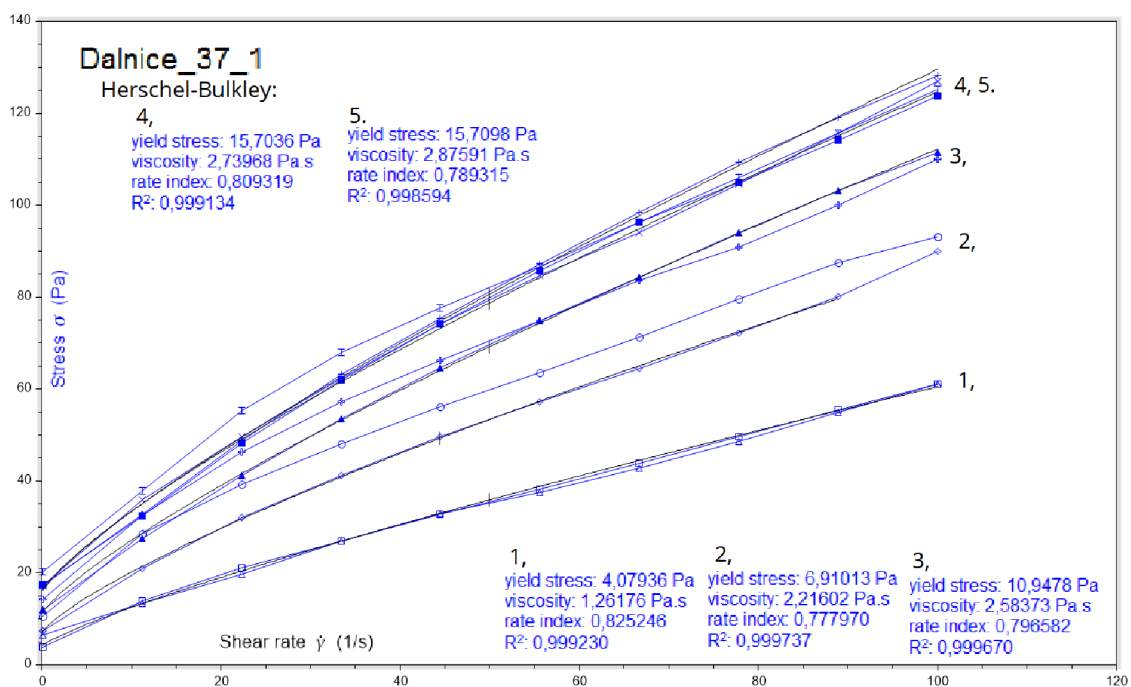


Obrázek 54: Reometrické vlastnosti - sednutí kužílku - D29

D 29: mez toku rostla v čase z 3,0 Pa na 10,1 Pa - tedy málo výrazně.

Příčinou může být nefunkčnost plastifikační přísady na hrubá zrníčka recyklátu, který není mletý. Viskozita rostla z 0,95 na 2,36 Pas.

Sednutí kužílku 9' = 30 mm; Dále se u této směsi jako u jediné daly provést další měření SK v časech: 23:30 = 34 mm; 40' = 30 mm; 70' = 29 mm.



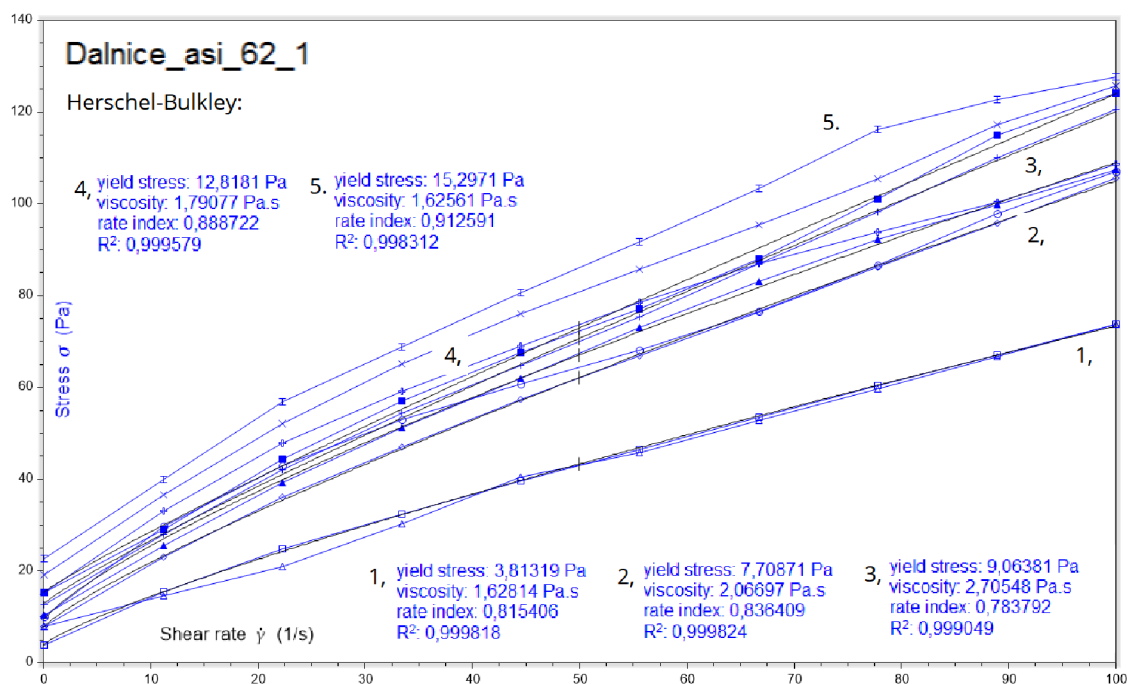
Obrázek 55: Měření reometrických vlastností - D37



Obrázek 56: Reometrické vlastnosti - sednutí kužílku - D37

D37: mez toku rostla s časem z 4,0 na 15,7 Pa, Viskozita 1,26 na 2,8 Pa.S.

Konzistence 9' = 27 mm.



Obrázek 57: Měření reometrických vlastností - D62

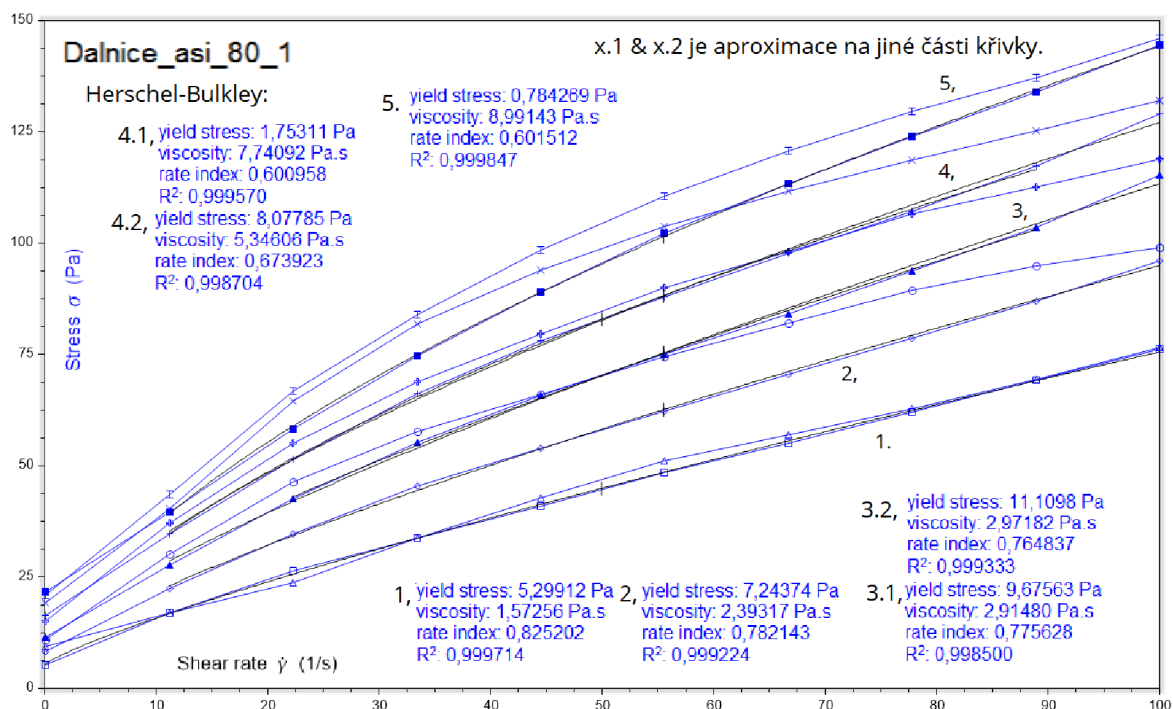


Obrázek 58: Reometrické vlastnosti - sednutí kužílku

D62: (asi protože jsem neměl představu o skut. měrném povrchu)

Mez toku rostla v čase z 3,8 na 15,3 Pa, viskozita z 1,6 Pas přes 2,7 zpět na 1,6 Pas.

Konzistence 9' = 25 mm.



Obrázek 59: Měření reometrických vlastností - D(80)



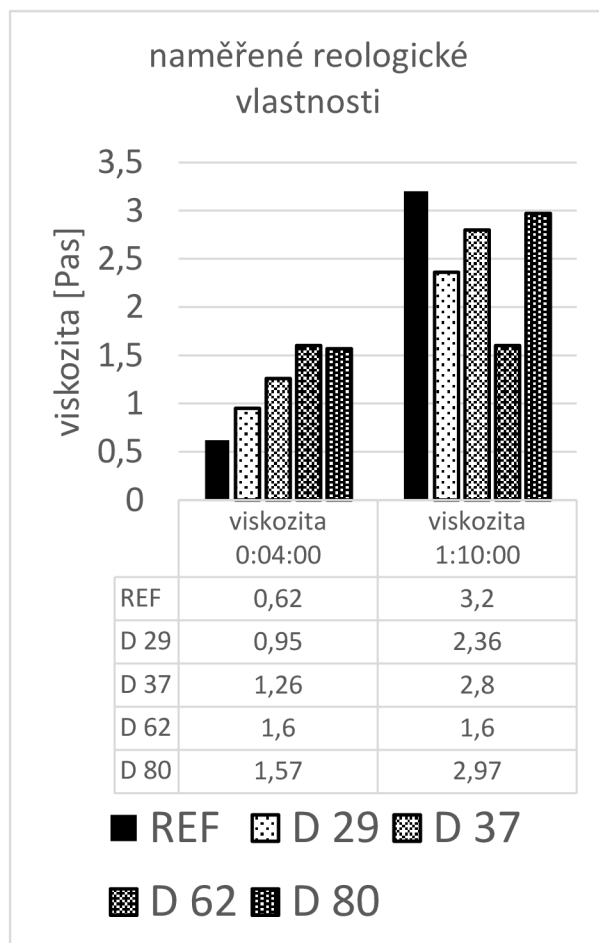
Obrázek 60: Reometrické vlastnosti - sednutí kužílku - D(80)



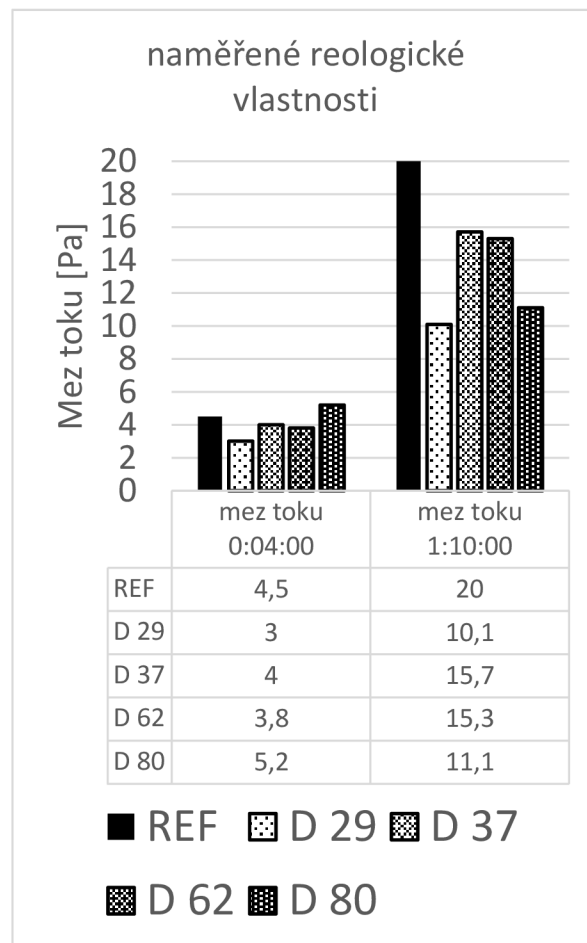
Obrázek 61: Utržení při zkoušce sednutí kužílku v čase 25"

D80: mez toku rostla z 5,2 na 11,1 Pa, viskozita pak 1,57 na 2,97 v čase.

Sednutí kužílku 10' = 21 mm, konzistence 30' = utrhlo se - viz fotka (obr. 60).



Obrázek 63: Graf viskozity cementových past s recykláty



Obrázek 62: Graf meze toku cementových past s recykláty

Viskozita v počátku testu stoupala s jemností mletí, při měření poslední křivky v čase 1 hod 10 min se výsledky vyrovnaly. Meze toku v počátku měření byly srovnatelné, v čase 1 hod 10 min se zvýšila mez toku u cementové referenční směsi. Směs D29 byla značně ztekucená celou dobu měření, Meze toku past D37 a D62 stouply téměř na 16 Pa.

16 TESTOVÁNÍ BETONŮ S NAMLETÝMI RECYKLÁTY

16.1 Příprava betonů

Postup míchání:

1. navážení surovin
2. homogenizace recyklátu s cementem nasucho
3. umístění kameniva do míchačky
4. vlití ½ vody + zamíchání
5. přidání směsi cementu a recyklátu = počátek měření času
6. zapnutí míchání
7. vlití plastifikační přísady + zbytku vody
8. dokončení míchání, úprava konzistence dle SK
9. vyčkání 45 minut pro opětovné stanovení konzistence (SK)
10. plnění do forem.

16.2 Receptury betonů a vlastnosti v čerstvém stavu

16.2.1 Receptura betonů

Je použito cementu CEM I 42,5 R - Mokrý, plastifikační přísada FK 19 (MC Bauchemie) se ztekucujícím a dispergačním účinkem, kamenivo DTK - lokalita Žabčice, HDK - lokalita Olbramovice.

Receptury jsou uvedeny v tabulce na následující straně

| název receptury / složka betonu | | Referenční krychle | Krychle Dálnice D1 550 m ² /kg | Krychle Dálnice D1 615 m ² /kg |
|--|-------|--------------------|---|---|
| zkratka názvu | | RFKR | D kr62 | D kr80 |
| množství | litry | 10,6 | 10,6 | 10,6 |
| receptura na m³ betonu | | | | |
| cement CEM I 42,5 R | kg | 310 | 232,5 | 232,5 |
| rec. Dálnice D1 - (62) | | 0 | 77,5 | 0 |
| rec. Dálnice D1 - (80) | | 0 | 0 | 77,5 |
| voda | kg | 177,9 | 210,4 | 205,2 |
| vodní souč. | [-] | 0,57 | 0,68 | 0,66 |
| Plastif. Příklad (FK 19) | kg | 2,17 | 2,17 | 2,17 |
| DTK Žabčice 0-4 | kg | 1020 | 1020 | 1020 |
| HDK Olbram. 8-16 | kg | 900 | 900 | 900 |

Tabulka 24: Receptury míchaných betonových směsí

16.3 Konzistence sednutím kužele

Byly měřeny konzistence betonů měřené jako sednutí kužele. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 25.

| zkouška konzistence | | Referenční krychle | Krychle Dálnice D1 550 m ² /kg | Krychle Dálnice D1 615 m ² /kg |
|-------------------------|----|--------------------|---|---|
| Sednutí kužele 20 minut | mm | 150 | 160 | 145 |
| Sednutí kužele 45 minut | mm | 120 | 140 | 105 |

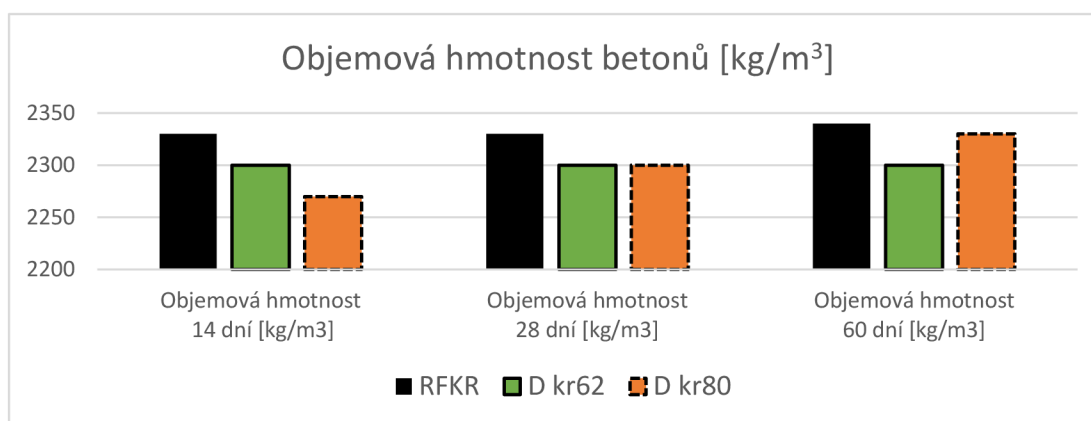
Tabulka 25: Konzistence sledovány sednutím kužele

16.4 Vlastnosti betonů ve ztvrdlém stavu

16.4.1 Objemová hmotnost betonu - krychle 10-10-10

| název směsi betonu | zkratka názvu | Objemová hmotnost 14 dní [kg/m ³] | Objemová hmotnost 28 dní [kg/m ³] | Objemová hmotnost 60 dní [kg/m ³] |
|-------------------------------------|---------------|---|---|---|
| Referenční krychle | RFKR | 2330 | 2330 | 2340 |
| Krychle Dál. 550 m ² /kg | D kr62 | 2300 | 2300 | 2300 |
| Krychle Dál. 615 m ² /kg | D kr80 | 2270 | 2300 | 2330 |

Tabulka 26: Tabulka objemové hmotnosti betony



Obrázek 64: Graf objemové hmotnosti betonů

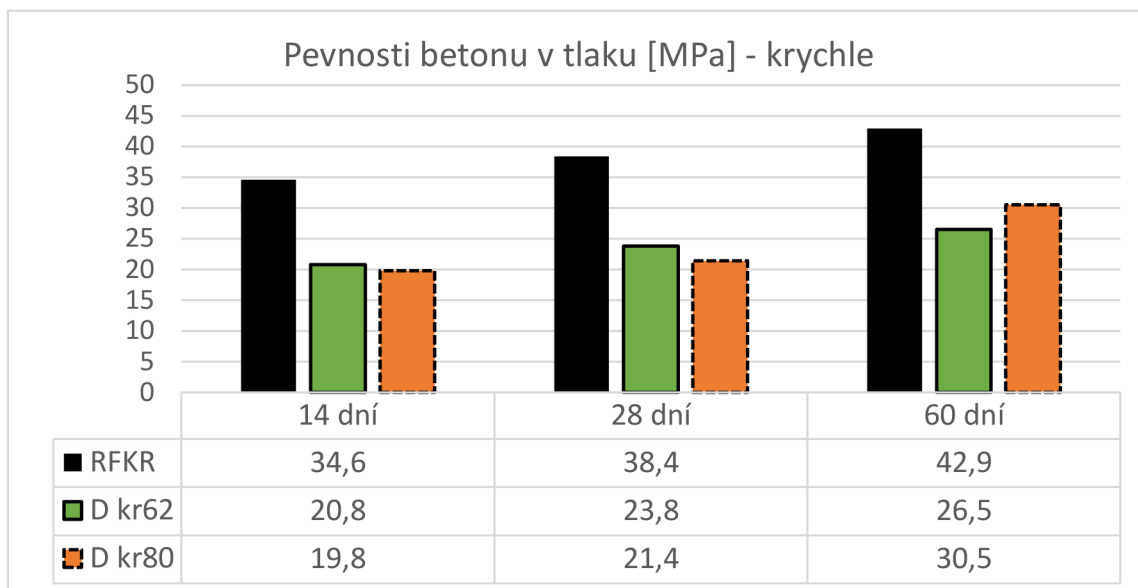
Objemové hmotnosti receptury RFKR a Dkr62 byly stejné v čase, záměs Dkr80 nabývala na objemové hmotnosti.

16.4.2 Pevnost v tlaku - krychle 10-10-10

| mícháno | název receptury | zkratka názvu | 14 dní [MPa] | 28 dní [MPa] | 60 dní [MPa] |
|---------|-------------------------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|
| 4.11.19 | Referenční krychle | RFKR | 34,6 | 38,4 | 42,9 |
| 4.11.19 | Krychle Dál. 550 m ² /kg | D kr62 | 20,8 | 23,8 | 26,5 |
| 4.11.19 | Krychle Dál. 615 m ² /kg | D kr80 | 19,8 | 21,4 | 30,5 |
| | | Indexy účinnosti | 14 dní | 28 dní | 60 dní |
| | | RFKR | 100,0% | 100,0% | 100,0% |
| | | D kr62 | 60,1% | 62,0% | 61,8% |
| | | D kr80 | 57,2% | 55,7% | 71,1% |

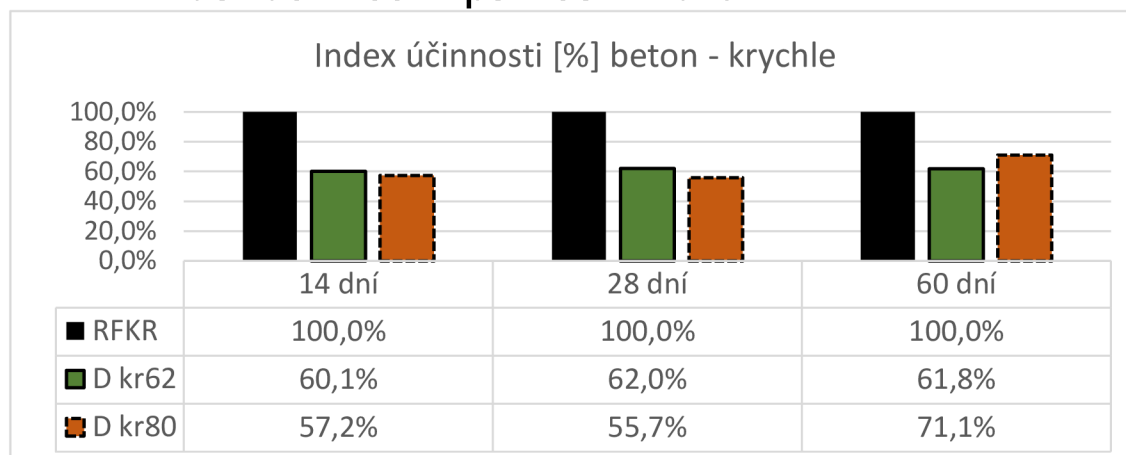
Tabulka 27: Tabulka pevností v tlaku - betony ve stáří 14,28,60 dní

Pevnost v tlaku betonových krychlí je nedostatečná pro zařazení do pevnostní třídy C 25/30. Při náhradě 25 % cementu poklesly pevnosti v tlaku o téměř 40 % pro záměs s recyklátem s měrným povrchem 550 m²/kg a pro záměs s recyklátem s povrchem 615 m²/kg pak poklesly o 43 %. Po dvaceti osmi dnech směs referenční dosáhla pevnosti 38 MPa, s recykláty pouze na 23,8 MPa (Dkr 62) a 21,4 MPa (Dkr 80).



Obrázek 65: Graf a tabulka pevností betonu v tlaku

16.4.3 Index účinnosti - pevnost v tlaku



Obrázek 66: Graf a tabulka indexů účinnosti u pevnosti v tlaku betonů

Indexy účinnosti odpovídají trendu nabytých pevností. Tzn, že pevnosti referenční receptury rostly obdobnou rychlostí jako receptury s recykláty /rozpor s výraznějším nárůstem pevností u trámečků/.

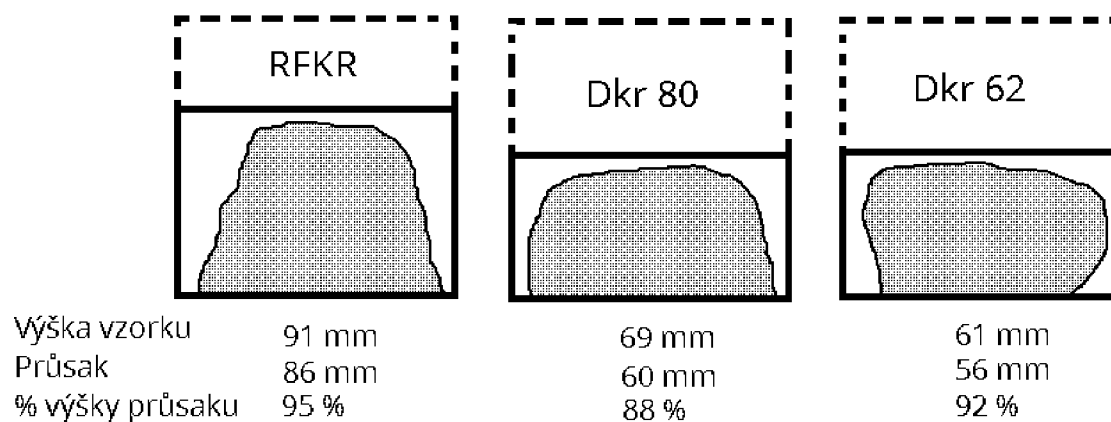
Lze tedy konstatovat, že namíchaná náhrada 25 % je nevhodná.

Ze zkoušek na trámečcích se ale také ukázalo, že vibrační mlýn nedokáže recyklát aktivovat. Je třeba provést další zkoumání s jiným typem mlýnu.

16.4.4 Odolnost vůči průniku takové vody

Pro zkoušku „stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou“, byla vyrobeny tělesa, tyto tělesa byly poloviční krychle 150 mm, viz nákres

Všechny záměsi pronikla voda až cca 7 mm od okraje protější strany, také viz nákres. Průsak do boku nebyl.



Obrázek 67: Nákres výsledku po zkoušce průsaku tlakovou vodou

ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

V souladu se zadáním se tato diplomová práce věnovala úpravě a zpracování drobného betonového recyklátu.

V teoretické části této diplomové práce byla popsána historie a výroba cementu, včetně složení cementu a vlastnosti slínekových minerálů. Byla popsána podstata Newtonských tekutin a ne-Newtonovských tekutin. Sledování těchto parametrů je zkoumáno v experimentální části diplomové práce na cementových pastách.

Pozornost byla věnována popisu procesu mletí. Popis vysoko-energetického mletí zahrnuje teorie mletí (Kickova, Rittigova, zobecněná hypotéza) a teorie mechanické aktivace.

V praktické části diplomové práce byl drobný betonový recyklát upraven ze vstupní hrubé granulometrie postupem zdobňování, s maximální možnou separací obsaženého přírodního kameniva. Je popsán vibrační mlýn použitý pro mletí recyklátů v experimentální části. Na vibračním mlýnu byly mlety podsítné frakce recyklátu na různé jemnosti. Byl stanoven měrný povrch. Z takto připraveného materiálu byly namíchány malty s normovým pískem, cementem a vodou. Bylo nahrazeno 25 % pojiva - cementu CEM I 42,5 R. Byly připraveny varianty s přídavkem plastifikační přísady i bez plastifikační přísady. Zrání probíhalo ve vodním uložení.

Při sledování konzistence malt (jak při míchání, tak v čase 7,5 min od zamíchání) se neprokázala vyšší potřeba záměsové vody pro dosažení stejné konzistence malt v závislosti na jemnosti mletí recyklátu. Ale následně ztráta konzistence v čase (první měření v čase 7,5 min, druhé měření v čase 15 minut) byla i o 10 % menší u malt s jemně mletým recyklátem oproti maltě referenční - měřeno rozlivem na střešacím stolku.

Ztrátu konzistence v čase potvrdily i experimenty měření reometrických vlastností (viskozita a mez toku) na reometru Discovery HR-1. Byly měřeny vlastnosti past s cementem (referenční) a pasty se stejným podílem (náhrada 25 %) recyklátu o různých jemnostech. U sledovaných past stoupala s časem mez toku a viskozita.

Použití recyklátu vyžaduje vyšší dávky záměsové vody, ta není zahrnuta do procesu hydratace a při vysychání způsobuje zvýšenou nasákavost. To se potvrdilo i v experimentech provedených v diplomové práci – nasákavost malt s 25% náhradou cementu recyklátem dosahovala více než 8,5 %.

Dále byly sledovány vlastnosti malt a betonů s recyklátem v ztvrdlém stavu.

Byly vypočteny indexy účinnosti z pevnosti malt v tlaku a v tahu za ohybu. Indexy účinnosti malt stanovené z pevnosti v tlaku dosahovaly hodnot pro recykláty ve stáří 28 dní:

Avion - 74 %,

Dálnice D1 - 62 %, pro

recyklát Prefa - pouze 55 %.

Hodnoty indexů účinnosti vypočtené z pevnosti v tahu za ohybu dosahovaly pro všechny testované matly s recykláty průměrně 73 % po 28 dnech, okolo 82 % po 60 dnech.

V teoretické části diplomové práce v Kapitole 7 jsou citovány výsledky výzkumu, kdy se autorům podařilo pomoci vysokorychlostního mlýnu zaktivovat betonový recyklát tak, že při náhradě části cementu nedošlo k výrazným poklesům pevností. Při vysokorychlostním mletí se patrně autorům podařilo odhalit nezhydratovaná zrníčka původního pojiva. Oproti tomu v diplomové práci byl recyklát namlet na vibračním mlýnu v laboratořích ÚTHD. Mletí recyklátu na vysokorychlostním mlýnu má větší přínos než mletí na vibračním mlýnu. Použití vibračního mlýnu, který mletou surovinu roztírá, není vhodné, surovina se mechanicky nezaktivuje. Příspěvek takto upraveného recyklátu je nedostatečný. V případě náhrady 25 % cementu jemně mletým recyklátem došlo k poklesu pevností o 38 % při použití recyklátu z Dálnice D1, o 26 % při použití recyklátu z bouraného Avion Park a o 45 % při použití recyklátu z Prefa Kuřim. Při sledování vlastností betonů s jemně mletým recyklátem v dávce 25 % došlo k poklesu pevností až o 44 %. Proto pro další testování navrhuji recepturu s nižší náhradou cementu jemně mletým recyklátem – v dávce do 15 % z množství cementu.

Navrhovaná receptura je uvedena v následující tabulce

| | | |
|---|-----------|---------------------|
| název receptury / složka betonu | | Receptura C25/30 S3 |
| zkratka názvu | | C25/30 10 % |
| množství | litry | 1000 |
| receptura na 1m ³ betonu | | |
| cement CEM I 42,5 R | kg | 279 |
| recyklát betonový s měrným povrchem min 600 m²/kg | kg | 31 |
| voda | kg | 200 |
| vodní souč. | [-] | 0,65 |
| ověřená plastif. přís. | % z mc+mr | 1% |
| Drobné těžené kam. 0-4 | kg | 1020 |
| Hrubé drcené kam. 8-16 | kg | 900 |

Tabulka 28: Navržená receptura betonu C25/30 S3

Důležité je dále ověřit efekt mletí na vibračním mlýnu kvůli mechanické aktivaci recyklátu (nebo zda je vhodné pouze mletí na vysokorychlostním mlýnu). Doporučuji použít recyklát s měrným povrchem větším než 600 m²/kg (toho lze dosáhnout i na vibračním mlýnu).

ZÁVĚR

Použití vysokoenergetického mletí je důležité pro úspěšnou mechanickou aktivaci. Je třeba dostat napětí při mletí nad mez křehko-tvárného přechodu.

Pro získání kvalitního recyklátu z demolic objektů musí být s tímto recyklátem pečlivě zacházeno. Musí být minimalizováno znečištění cizorodými částicemi hlíny, asfaltu a ostatními cizorodými částicemi. Je vhodné betonový recyklát po rozdrčení co nejdříve znovu použít, tímto můžeme využít lépe potenciál nezhydratovaných odhalených částí původního pojiva. Při uložení recyklátu na volném prostranství by mohly nezhydratované části podlehnout samovolné hydrataci.

POPIS OBJEKTŮ A POUŽITÉ ZDROJE

17 POUŽITÉ ZKRATKY

(____ r. XXXX) - jméno autora/ů a rok provádění/publikace výzkumu

(pův. ____) - původně - v původním textu

(r. XXXX) - rok uveřejnění/provádění výzkumu

angl. - anglicky

ASR - Alkali-silica reaction - česky alkalicko-křemičitá reakce

cem. - cementový / cementárna

dif. rovnice - diferenciální rovnice

Dmax - velikost maximálního zrna

DTK - drobné těžené kamenivo

Dzb - objemová hmotnost zatvrdlého betonu

HDK - hrubé drcené kamenivo

IU - index účinnosti

m.p. - měrný povrch (anglicky SSA - Specific surface area)

MA - mechanical activation = mechanická aktivace

MH - měrná hmotnost

MchA - mechano-chemická aktivace

MP - měrný povrch, jinak Sp

OH - objemová hmotnost

PE - polyetylen

portl. cem. - portlandský cement

PP - Plastifikační Příklad

> SPP - SuperPlastifikační Příklad

prům. - průměrně

SK - sednutí kužele

tab. - tabulka

ÚTHD - ústav Technologie Hmot a Dílců při Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně

WF - odborný časopis Waste Forum

xx hm. % - xx hmotnostních procent

18 POUŽITÉ JEDNOTKY

cm^2/cm^3 - jednotka měrného povrchu vztažená na objem

kg/m^3 ; t/m^3 g/cm^3 - jednotky objemové hmotnosti

kN - jednotka síly - SI ... 1 kN = 1000 Newtonů

m^2/kg - jednotka měrného povrchu, také jako cm^2/g ,

kde 100 m^2/kg odpovídá 1000 cm^2/g

mm - milimetr

mm^2 - milimetr čtverečný

Pa - pascal - jednotka napětí, tlaku

Pa·s - jednotka dynamické viskozity

s^{-1} - jednotka smykové rychlosti - reciproká sekunda (cyklus)

t - jednotka hmotnosti, v soustavě SI ... 1 Mg (t) = 1000 kg

19 POUŽITÉ ZDROJE

- [1] W. B. L. D. O. G. a. C. Will STEFFEN, „The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. The Anthropocene Review,“ 2014. [Online]. Available: https://openresearchrepository.anu.edu.au/bitstream/1885/66463/8/01_Steffen_GREAT%20A. [Přístup získán 2019].
- [2] P. Aneta, „Diplomová práce - Plevová Aneta,“ 2018. [Online]. Available: <https://vskp.vse.cz/72716>. [Přístup získán 2019].
- [3] Ekolamp.cz, „Brožura cirkulární ekonomiky,“ neznámý rok. [Online]. Available: <https://www.ekolamp.cz/data/web/ekokoutek/cirkularni-ekonomika-a5.pdf>. [Přístup získán 12 2019].
- [4] Č. i. p. normalizaci, „norma ČSN EN 197-1 ed. 2: Cement - část 1: Složení, specifikace a kritéria shody,“ 2012. [Online]. Available: <https://csnonline.agentura-cas.cz/>. [Přístup získán 2019].
- [5] R. BÁRTA, Chemie a technologie cementu. 1. vyd., Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [6] P. Dobrovolný, „MOŽNOSTI REDUKCE EMISÍ CO₂ PRODUKOVANÝCH PŘI VÝROBĚ PORTLANDSKÝCH CEMENTŮ - BP,“ 2013. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11012/29158>. [Přístup získán 2019].
- [7] W. encyklopedie, „Cement,“ Wiki, [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cement>. [Přístup získán 08 2019].
- [8] w. Cemex, „Historie cementu a betonu,“ neznámý. [Online]. Available: <https://www.cemex.cz/historie-cementu-a-betonu>. [Přístup získán 08 2019].
- [9] W. encyklopedie, „Eddystonský maják,“ [Online]. Available: https://cs.wikipedia.org/wiki/Eddystonský_maják#Smeatonův_maják. [Přístup získán 08 2019].
- [10] Č. c. -. web, „Cement - výroba,“ Českomoravský cement, neznámý. [Online]. Available: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/vyroba>. [Přístup získán 07 2019].
- [11] B. R. Magrla, „Modifikace vlastností portlandských cementů orientovaná na snížení emisí CO₂,“ 2013. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=77785. [Přístup získán 10 2019].

- [12] V. Š. b. T. Ostrava, „hlavní kroky technologie výroby cementu,“ neznámý. [Online]. Available: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html#technolcem. [Přístup získán 09 2019].
- [13] p. F. Marcela, *Přednášky Maltoviny II*, VUT FAST, 2013.
- [14] Š. Z., *Maltoviny I*. Skripta VUT v Brně, Brno: PC-DIR, 1993.
- [15] K. Dolejší, „Nový ekologický cement pomůže snížit emise CO₂,“ *Aktuálně.cz*, září 2008. [Online]. Available: <https://magazin.aktualne.cz/novy-ekologicky-cement-pomuze-snitiz-emiseco2/r~i:article:616042/>. [Přístup získán 08 2019].
- [16] W. encyklopedie, „Skleníkové plyny,“ [Online]. Available: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C3%ADkov%C3%A9_plyny. [Přístup získán 08 2019].
- [17] I. R. Hela, *Technologie betonu I - studijní opora - M01*, VUT FAST Brno, 2004.
- [18] J. T. P. T. G. K. Zdeněk PROŠEK, „Stavební systém s vysokým obsahem recyklovaných,“ *Waste Forum 2*, pp. 391-398, 2019.
- [19] w. cement.org, „How Cement is made,“ neznámý. [Online]. Available: <https://www.cement.org/cement-concrete-applications/how-cement-is-made>. [Přístup získán 2019].
- [20] K. H. Г. С. Е. Г. Л. О. К. Найбороденко Ю. С., Влияние механической активации на высокотемпературный и фазообразование низкокалорийных интерметаллических соединений, *Chemistry for suitable development*, 2002.
- [21] P. Baláž, *Mechanochemistry in Nanoscience and Minerals Engineering*, Holandsko, 2008.
- [22] S. E.E., *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископ*, Moskva, 1982.
- [23] B. K. M. R. Schrader und B. Hoffmann, „Änderung der Reaktionsfähigkeit von Festkörpern durch vorhergehende mechanische Bearbeitung,“ 1973.
- [24] E. B. L. J. Snow R.H.Allen T., „Size Reduction and Size Enlargement,“ 08 2009. [Online]. Available: http://chc.edu.vn/forum/uploads/file/2009-08-16_092142_Chap20.pdf.
- [25] K. H. Г. С. Е. Г. Л. О. К. Найбороденко Ю. С., „Vliv mechanické aktivace na vysokou teplotu a fázovou tvorbu nízkokalorických intermetalických sloučenin,“ 2002.
- [26] K. B. M., „Prospektová analýza technologie UDD v oblasti polymerních materiálů, UDD,“ pp. 44-46, 1983.

- [27] T. VIRÁGOVÁ, „Sledování vlivu různých technologií mletí na vlastnosti,“ 2013. [Online]. Available: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/28708>. [Přístup získán 2019].
- [28] M. M. P. a. d. Ing. Zbyněk Prokšan, „Využití vysokorychlostního mletí v odpadovém hospodářství,“ *Odpadové fórum*, p. <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2017/prispevky/135.pdf>, 2017.
- [29] d. I. A. Slíva, „Základy zařízení úpraven - studijní opora,“ 2011. [Online]. Available: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2732-2.pdf>. [Přístup získán 2019].
- [30] K. N. H. Maurice C. Fuerstenau, Principles of mineral processing, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2003.
- [31] M. V. M, Быстрые капли, Moskva: Moskevský dělník, umění, 1968.
- [32] K. G. S., Jemné mletí stavebních materiálů (Тонкое измельчение строительных материалов), Moskva: Science, 1972.
- [33] A. S. Jack Jeswiet, „Energy Consumption in Mining Comminution 140-145,“ 2016. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/82250924.pdf>. [Přístup získán 2019].
- [34] I. O. Kozdas, „Disertační práce VUT - Aktivátory mletí,“ 2013. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69807. [Přístup získán 10 2019].
- [35] S. P. E. G. V.V. Boldyrev, Interrelation between fine grinding and mechanical activation, Novosibirsk: Siberian Branch of RAS, 1996.
- [36] N. -. M. univerzita, „Fraktografie - nauka o lomech,“ 2019. [Online]. Available: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3605&typ=html. [Přístup získán 10 2019].
- [37] B. P. Bílek, „Křehký a tvárný lom - prezentace,“ [Online]. Available: <https://slideplayer.cz/slide/3075432/>. [Přístup získán 2019].
- [38] Z. P. a. kol., „Srovnání vlivu mikromletého betonu a mramorové moučky na mechanické vlastnosti cementových past,“ *Waste Forum 2*, pp. 262-267, 2018.
- [39] Z. P. a. T. P. Jaroslav Topič, „Influence of increasing amount of recycled concrete powder on mechanical properties of cement paste,“ *Materials Science and Engineering*, Volume 236, conference 1.
- [40] Z. P. J. F. P. T. Jaroslav TOPIČ, „Vliv jemnosti recyklované betonové moučky na vývin hydratačního tepla a vliv jejího množství na mechanicko-fyzikální vlastnosti cementové

- pasty," *Waste Forum 2*, pp. 268-274, 2018.
- [41] F. F. V. doc. Pavel Rovnaník, „přednáška CJ059_3.pdf," Brno, 2019.
- [42] P. Banfill, „RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE," 2006. [Online]. Available: <http://www.bsr.org.uk/rheology-reviews/rheologyreviews/fresh-cement-concretebanfill.pdf>. [Přístup získán 11 2019].
- [43] G. SCHRAMM, „A Practical Approach to Rheology and Rheometry," 1998 - 2000. [Online]. Available: <http://docplayer.net/11376032-A-practical-approach-to-rheology-and-rheometry.html>. [Přístup získán 11 2019].
- [44] U. o. U. T. Bati, „Reologie," neznámý. [Online]. Available: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf. [Přístup získán 11 2019].
- [45] S. L. a. X. JI, *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: Principles, Techniques and Applications*, New York: William Andrew pub., 1999.
- [46] d. P. Rovnaník, *Reologie návod do cvičení.pdf*, Brno: ÚCH FAST VUT, 2019.
- [47] B. L. Opat, *protokol do cvičení CJ059 - Vliv plastifikační přísady na reologii cementové pasty*, Brno, 24.10.2019.
- [48] J. H. -. I. S. University, „A study of effects of aggregate on concrete rheology," 2005. [Online]. Available: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2738&context=rtd>. [Přístup získán 11 2019].
- [49] R. Bartulíková, „Vliv provzdušnění a ošetřování na vývoj modulu pružnosti betonu - DP," 2013. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=79003. [Přístup získán 11 2019].
- [50] B. L. Opat, „Optimalizace skladby kameniva s max. zrnem 22 mm pro transportbetony," 05 2018. [Online]. Available: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/84668>.
- [51] <https://csnonline.agentura-cas.cz/>, „ČSN EN 12350-2. Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím," 2009. [Online]. Available: <https://csnonline.agentura-cas.cz/>.
- [52] W. encyklopedie, „Hustota," neznámý. [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hustota#Vzorec>. [Přístup získán 12 2019].
- [53] Ú. F. VUT, „návod do cvičení BJ056 - Vybrané statě z technologie stavebních hmot," 2018. [Online]. Available: <http://thd.fce.vutbr.cz/bakalar>. [Přístup získán 2018].

- [54] V. T. Ostrava, „Metody zkoušení cementu,“ [Online]. Available: <http://fast10.vsb.cz/206/Laborator/Downloads/Stav/Cviceni/Cvi11/stanovenipevnosticementu.pdf>. [Přístup získán 12 2019].
- [55] M. K. - BP, „Analýza procesu mletí slínekových minerálů,“ 2017. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=154742. [Přístup získán 12 2019].
- [56] M. Bauchemie, „technický list FK 19,“ [Online]. Available: https://www.mcbauchemie.com/assets/downloads/products/en/technical_datasheet/Muraplast%20FK%2019.pdf.
- [57] W. W. Guowei MaLi, *A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing*, researchgate.net, 2017.
- [58] W. encyklopedie, „Koule - povrch,“ neznámý. [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Koule#Povrch>. [Přístup získán 09 2019].
- [59] W. f. Lavaris.cz, „úvodní slide stránky firmy lavaris.cz,“ 2019. [Online]. Available: lavaris.cz.
- [60] J. J. - V. T. Ostrava, *Viskozita tekutin a její měření*, Ostrava, 2010.
- [61] neznámý, „Basics of thixotropy,“ neznámý. [Online]. Available: <https://wiki.anton-paar.com/de-de/die-grundlagen-von-thixotropie/>. [Přístup získán 11 2019].
- [62] M. A. a. S. Mindess, *Aggregates in Concrete*, New York: Taylor & Francis, 2005.
- [63] n. autor, „Sednutí kužele - obrázek,“ [Online]. Available: http://www.absbilina.cz/upload/246-1293024842_j550u2qk0Y.upl-sednuti_kuzele.jpg.
- [64] S. OPAVA, „Zkoušení ztvrdlého betonu v tlaku,“ [Online]. Available: http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/stavebni_laborator/cviceni/31_zkouseni_ztvrdleho_betonu_v_tlaku.pdf. [Přístup získán 12 2019].

20 OBRÁZKY A TABULKY

20.1 Obrázky

| | |
|---|--------|
| Obrázek 1: Znázornění rozdílů mezi lineární a cirkulární ekonomikou [3] | - 11 - |
| Obrázek 2: Schéma výroby cementu v cementárně, Českomoravský cement [10] | - 15 - |
| Obrázek 3: Oblasti velikosti částic a jejich měrný povrch [57] | - 22 - |
| Obrázek 4: Základní mechanizmy mletí [29] | - 24 - |
| Obrázek 5: Účinnost mletí vápence na době mletí [22] | - 26 - |
| Obrázek 6: Naznačení lomových rovin na krychli | - 27 - |
| Obrázek 7: Zobecněná relaxační křivka mechanicky aktivované látky (Lyachov 1993) [22] .. | - 32 - |
| Obrázek 8: Vývojový diagram změn relaxačních procesů (Boldryev r. 1986) [22]..... | - 33 - |
| Obrázek 9: Vady vzniklé mechanickou aktivací pevných látek [22] | - 35 - |
| Obrázek 10: Schéma vzniku křehkého lomu [37] | - 41 - |
| Obrázek 11: Schéma vzniku tvárného lomu [37] | - 41 - |
| Obrázek 12: Vysokorychlostní mlýn S1000 [59] | - 44 - |
| Obrázek 13: Laserová granulometrie v experimentu I [18]..... | - 45 - |
| Obrázek 14: Graf tepelného toku v experimentu I [18] | - 46 - |
| Obrázek 15: Graf pevností v tahu za ohybu v experimentu I [18] | - 47 - |
| Obrázek 16: Graf pevností v tlaku v experimentu I [18] | - 47 - |
| Obrázek 17: Graf vývinu hydratačního tepla v experimentu II [40]..... | - 50 - |
| Obrázek 18: Vliv množství RCP IV na pevnost v tahu za ohybu [40]..... | - 52 - |
| Obrázek 19: Vliv množství RCP na pevnost v tlaku. [40] | - 52 - |
| Obrázek 20: Obrázek pro odvození rovnice tečného napětí [41] | - 56 - |
| Obrázek 21: Toková křivka Newtonské kapaliny(tekutiny) [43] | - 58 - |
| Obrázek 22: Viskózní křivka Newtonovi ideální kapaliny(tekutiny) [43]..... | - 58 - |
| Obrázek 23: Ukázky A) reologických křivek a B) závislostí zdánlivých viskozit tekutin na smykové rychlosti. Tekutina: 1) newtonská, 2) pseudoplastická, 3) dilatantní, 4) skutečná plastická, 5) Binghamova – ideálně plastická, 6) Eyringův model [60] | - 61 - |
| Obrázek 24: Analýza návratu původní viskozity v čase - tixotropní chování [61]..... | - 61 - |
| Obrázek 25: Tixotropní a reopexní hysterezní tokové křivky [41] | - 62 - |
| Obrázek 26: Vliv vodního součinitele na reologii cementové pasty [48] | - 63 - |
| Obrázek 27: Vliv vodního součinitele na reologii cementové pasty [17] | - 63 - |
| Obrázek 28: Zvětšení mezer mezi zrny šterku [50]..... | - 64 - |
| Obrázek 29: Tvary jsou ve směru hodinových ručiček zleva shora: Zaoblené, nepravidelné, úhlové, vločkané, protáhlé, vločkané + protáhlé. [62]..... | - 65 - |

| | |
|---|-------|
| Obrázek 30: Vliv plastifikátoru na vodní součinitel nebo na konzistenci [17] | 65 - |
| Obrázek s tabulkou 313: Zkouška sednutí kužele [63] | 69 - |
| Obrázek 32: Provádění zkoušky v tahu za ohybu na trámečcích [54] | 70 - |
| Obrázek 33: Očekávané porušení ve tvaru přesýpacích hodin. | 71 - |
| Obrázek 34: Příprava před zkouškou pevnosti v tlaku | 72 - |
| Obrázek 35: Vyhovující způsoby porušení krychle [64] | 72 - |
| Obrázek 36: Reometr Discovery HR-1 [46] | 74 - |
| Obrázek 37: Znázornění Braggova zákona [55] | 75 - |
| Obrázek 38: Náskres postupu při úpravě recyklátu - vlastní náskres | 77 - |
| Obrázek 39: Pohled na staveniště po demolici části skeletu | 79 - |
| Obrázek 40: Na haldě byly k dispozici 3 typy betonů: | 80 - |
| Obrázek 41: Fotografie vyříznutých zkušebních těles | 80 - |
| Obrázek 42: Záznam z rentgenové difrakční analýzy, včetně popisu hlavních píků do 40° ... | 82 - |
| Obrázek 43: Záznam z rentgenové difrakční analýzy, včetně vyhodnocení hlavních píků. | 83 - |
| Obrázek 44: Graf objemové hmotnosti - malty | 90 - |
| Obrázek 45: Graf pevností v tahu za ohybu - malty | 91 - |
| Obrázek 46: Graf indexů účinnosti v tahu za ohybu - malty | 92 - |
| Obrázek 47: Graf poměru pevností v ohybu a v tlaku | 92 - |
| Obrázek 48: Graf pevností v tlaku - malty | 93 - |
| Obrázek 49: Graf s tabulkou hodnot - indexy účinnosti v tlaku - malty | 94 - |
| Obrázek 50: Graf nasákavosti úlomků - úlomek vybrán s nejnižší hmotností ze sady | 96 - |
| Obrázek 51: Měření reometrických vlastností - cem_ref | 98 - |
| Obrázek 52: Reometrické vlastnosti - sednutí kužílku - cem_ref | 98 - |
| Obrázek 53: Měření reometrických vlastností - D29 | 99 - |
| Obrázek 54: Reometrické vlastnosti - sednutí kužílku - D29 | 99 - |
| Obrázek 55: Měření reometrických vlastností - D37 | 100 - |
| Obrázek 56: Reometrické vlastnosti - sednutí kužílku - D37 | 100 - |
| Obrázek 57: Měření reometrických vlastností - D62 | 101 - |
| Obrázek 58: Reometrické vlastnosti - sednutí kužílku | 101 - |
| Obrázek 59: Měření reometrických vlastností - D(80) | 102 - |
| Obrázek 60: Reometrické vlastnosti - sednutí kužílku - D(80) | 102 - |
| Obrázek 61: Utržení při zkoušce sednutí kužílku v čase 25" | 102 - |
| Obrázek 62: Graf meze toku cementových past s recykláty | 103 - |
| Obrázek 63: Graf viskozity cementových past s recykláty | 103 - |
| Obrázek 64: Graf objemové hmotnosti betonů | 106 - |

| | |
|---|---------|
| Obrázek 65: Graf a tabulka pevností betonu v tlaku | - 107 - |
| Obrázek 66: Graf a tabulka indexů účinnosti u pevnosti v tlaku betonů | - 108 - |
| Obrázek 67: Nákres výsledku po zkoušce průsaku tlakovou vodou | - 108 - |

20.2 Tabulky

| | |
|---|---------|
| Tabulka 1: Soupis slínekových minerálů a jejich vlastnosti [13]..... | - 16 - |
| Tabulka 2: Povrch koule v závislosti na průměru..... | - 22 - |
| Tabulka 3: receptury v experimentu I [18]..... | - 45 - |
| Tabulka 4: Parametry namletého betonu v experimentu II [40]+doplněno | - 49 - |
| Tabulka 5: Celkové hydratační teplo v závislosti na použité jemnosti mletí recyklátu [40] ... | - 49 - |
| Tabulka 6: Receptura směsí v druhé části experimentu II [40]..... | - 51 - |
| Tabulka 7: Tabulka hodnot objemových hmotností v experimentu II [40] | - 52 - |
| Tabulka 8: Některé reologické modely pro popis chování nenewtonských tekutin [46]..... | - 59 - |
| Tabulka 9: měrné hmotnosti a měrné povrchy recyklátu z Dálnice D1 | - 78 - |
| Tabulka 10: Pevnosti zkušebních těles z recyklátu Avion | - 81 - |
| Tabulka 11: Tabulka měrné hmotnosti a měrného povrchu recyklátu Avion..... | - 81 - |
| Tabulka 12: Vlastnosti superplastifikační přísady Muraplast FK 19 [56]..... | - 87 - |
| Tabulka 13: Receptury REF PN a D80..... | - 87 - |
| Tabulka 14: Receptury AVI 66 a REF PŽ | - 88 - |
| Tabulka 15: Receptury REFplast, D29, D37, D62 | - 88 - |
| Tabulka 16: Receptury P37, P62, cem-25%..... | - 89 - |
| Tabulka 17: Tabulka objemových hmotností - malty..... | - 90 - |
| Tabulka 18: Tabulka pevností malt v tahu za ohybu | - 91 - |
| Tabulka 19: Tabulka indexů účinnosti v tahu za ohybu - malty | - 92 - |
| Tabulka 20: Pevnosti v tlaku - malty | - 93 - |
| Tabulka 21: Tabulka indexů účinnosti v tlaku - malty | - 95 - |
| Tabulka 22: tabulka nasákavostí úlomků malt..... | - 96 - |
| Tabulka 23: Definice kroků měření reometrických vlastností v čase | - 97 - |
| Tabulka 24: Receptury míchaných betonových směsí | - 105 - |
| Tabulka 25: Konzistence sledovány sednutím kužele | - 105 - |
| Tabulka 26: Tabulka objemové hmotnosti betony | - 106 - |
| Tabulka 27: Tabulka pevností v tlaku - betony ve stáří 14,28,60 dní..... | - 106 - |
| Tabulka 28: Navržená receptura betonu C25/30 S3..... | - 111 - |

20.3 Rovnice

| | |
|--|------|
| Rovnice 1: Povrch koule v závislosti na průměru [58] | 22 - |
| Rovnice 2: Obecný vzorec pro práci | 27 - |
| Rovnice 3: Práce na jednotku rozměru původní krychle..... | 28 - |
| Rovnice 4: Rovnice popisující různý stupeň rozpojení..... | 28 - |
| Rovnice 5: Rovnice práce v Kickově hypotéze [29]..... | 29 - |
| Rovnice 6: Charlesova rovnice rozpojování [30]..... | 29 - |
| Rovnice 7: Rovnice popisující mletí v běžné praxi [31] | 29 - |
| Rovnice 8: Rovnice Gibbsovy energie..... | 34 - |
| Rovnice 9: Reakční rovnice vyjádřena Gibbsovou energií [22] | 35 - |
| Rovnice 10: Gibbsova etalpie [22] | 36 - |
| Rovnice 11: Zjednodušená formulace Gibbsovy energie [22] | 36 - |
| Rovnice 12: Povrchová energie při změně povrchu látky | 36 - |
| Rovnice 13: Závislost mletí na napětí při mletí [36] | 39 - |
| Rovnice 14: Rovnice popisující kinetiku aktivace [36] | 40 - |
| Rovnice 15: Rovnice dynamické viskozity [43] [44] | 55 - |
| Rovnice 16: Rovnice tečného napětí [41]..... | 56 - |
| Rovnice 17: Vztah pro kinematickou viskozitu [43]..... | 57 - |
| Rovnice 18: Popis Newtonova chování tekutin [43]..... | 57 - |
| Rovnice 19: Zjištění aritmetického průměru hodnot vlastnosti [50] | 68 - |
| Rovnice 20: Vzorec pro výpočet objemové hmotnosti. [52]..... | 69 - |
| Rovnice 21: Rovnice pro výpočet pevnosti v tahu za ohybu na trámečcích. [53] | 70 - |
| Rovnice 22: Rovnice pro výpočet pevnosti v tlaku. [54] [53]..... | 71 - |
| Rovnice 23: Rovnice pro výpočet pevnosti v tlaku betonu [53]..... | 72 - |
| Rovnice 24: Rovnice pro výpočet indexu účinnosti (IU) [53] | 73 - |
| Rovnice 25: Rovnice pro výpočet nasákavosti vzorku [53]..... | 73 - |
| Rovnice 26: Rovnice Braggova zákona [55] | 75 - |
| Rovnice 27: Rovnice chemické reakce Portlanditu..... | 84 - |