

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
FAKULTA STAVEBNÍ  
Katedra technologie staveb



DIPLOMOVÁ PRÁCE  
FPC betony na bázi upravených  
sulfátovápennatých popílků

**Bc. Zdeněk Možíš**

**2017**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Možíš</u>	Jméno: <u>Zdeněk</u>	Osobní číslo: <u>380355</u>
Zadávající katedra: <u>K122 - katedra technologie staveb</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Příprava, realizace a provoz staveb</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>FPC betony na bázi upravených sulfátovápenatých popílků</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>FPC concrete based on modified calcium sulfate ash</u>	
Pokyny pro vypracování: 1) Rešerše k problematice ternárních pojiv a sulfátovápenatých popílků. 2) Rešerše k odolnosti betonů proti působení mrazu a CHRL. 3) Návrh a příprava ternárního pojiva na bázi sulfátovápenatého popílku. 4) Návrh a příprava FPC betonů s pojivem různých typů na bázi sulfátovápenatého popílku. 5) Mechanické vlastnosti FPC betonů, nasákavost a vlhkost. 6) Odolnost FPC betonů vůči působení CHRL. 7) Vyhodnocení výsledků v porovnání s cementovými betony.	
Seznam doporučené literatury: 1) ČSN 731322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu 2) ČSN 731326 - Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek 3) Vašák, M. - Úprava fyzikálních parametrů popílků ze spalování uhlí - diplomová práce 4) VALENZA, J. John II. a SCHERER, W. George. A review of salt scaling: II. Mechanisms 5) DOHNÁLEK, Jiří. Vliv Mrazuvzdornosti na jeho povrchové úpravy	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Rostislav Šule Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>3.10.2016</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>8.1.2017</u>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

11.10.2016

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne 6.1.2017

.....

Bc. Zdeněk Možíš

## **Poděkování**

Tato práce vznikla za přispění grantu TAČR č. TH02020163 - Vývoj a průmyslová optimalizace výrobních postupů stavebních hmot s využitím vysokého obsahu popílku.

V první řadě bych rád poděkoval panu Ing. Rostislavu Šulcovi, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce, za trpělivost, zodpovězení všech mých dotazů a velmi pozitivní přístup.

Dále děkuji Doc. RNDr. Františku Škvárovi, DrSc. za propůjčení prostor a vybavení laboratoře na VŠCHT a Ing. Pavlu Reitermanovi, Ph.D. za poskytnutí prostor a vybavení laboratoře Experimentálního centra Fakulty stavební na Českém vysokém učení technickém v Praze a pomoc při pevnostních zkouškách. Můj dík patří také Ing. Bc. Adéle Peterové za maximální vstřícnost, dohled a poskytnutí pomůcek.

Mnohokrát děkuji Ing. Zdeňku Kulišovi a Martinu Bartošovi ze Zkušební laboratoře betonu Praha firmy BASF Stavební hmoty Česká republika s.r.o. za provedení zkoušek odolnosti povrchu proti CHRL.

Děkuji též Michalu Himmelovi za pomoc při výrobě vzorků a společnosti ČEZ Energetické produkty s.r.o. za poskytnuté popílky a zařízení pro jejich mechanickou úpravu a provádění zkoušek.

Nakonec a ze všeho nejvíce bych chtěl poděkovat svým rodičům a celé rodině za morální podporu v průběhu celého studia.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá odolností B-FPC betonů. Autor zkoumá vlastnosti betonu, kde je cement, jakožto pojivo, úplně nahrazen směsí různě mletého fluidního a vysokoteplotního popílku se zaměřením na životnost betonů tohoto typu. Úvod práce je věnován problematice nakládání s průmyslovými odpady, důraz je kladen na tuhé produkty spalování, především popílky. Teoretická část obsahuje rešerši základních veličin ovlivňujících životnost betonu, kterými jsou zejména nasákavost, odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám, mrazuvzdornost a karbonatace betonu. Dále základní obecné informace o druzích elektrárenských popílků a jejich vlastnostech. A konec teoretické části je věnován úpravě materiálů mletím. Experimentální část popisuje metodiku úpravy popílků, výroby vzorků, zkoušení vzorků a samotné vyhodnocení výsledků. Závěrem je uvedeno zobecnění získaných poznatků a celkové zhodnocení úspěšnosti práce.

## **Klíčová slova**

- Fluidní popílek
- Nasákavost
- Odolnost
- Mrazuvzdornost
- Chemické rozmrazovací látky
- Karbonatace betonu
- Beton bez cementu
- Mletí

## **Anotation**

This master's thesis deals with resistance of B-FPC concrete. The author examines the properties of concrete, where the cement as a binder, is completely replaced by a mixture of fluidized ash and high temperature fly ash, focusing on the lifetime of this type of concrete. Introduction is devoted to problems of industrial waste management, the emphasis is on solid combustion products, especially ash. The theoretical part contains general information of the fundamental variables affecting the life of the concrete, which are mainly absorbability, resistance to chemical thaw substances, frost resistance and concrete carbonation. Furthermore, basic general information about the types of fly ash and their properties. The end of the theoretical part is devoted to the grinding treatment of the materials. The experimental part describes the methodology of ash treatment, the production of samples, sample testing and their evaluation of results. Finally, it mentioned the generalization of acquired knowledge and overall evaluation of the success of the thesis.

## **Keywords**

- Fluid fly ash
- Absorbability
- Resistance
- freeze-thaw resistance
- Chemical thaw substances
- Concrete carbonation
- Concrete without cement
- Grinding

## Obsah

1	Úvod.....	10
1.1	Cíle práce.....	11
2	Teoretická část .....	12
2.1	Trvanlivost betonů.....	12
2.1.1	Odolnost proti nasáknutí.....	12
2.1.2	Odolnost proti mrazu .....	13
2.1.3	Odolnost proti CHRL .....	15
2.1.4	Karbonatace betonu .....	20
2.2	Ternární pojiva .....	23
2.2.1	Cementy.....	23
2.2.2	Popílký.....	24
2.3	Mletí materiálů .....	26
2.3.1	Kulové mlýny .....	26
2.3.2	Proces mletí v kulovém mlýnu .....	28
3	Experimentální část.....	31
3.1	Vstupní materiály .....	31
3.1.1	Pojivo - Popílký .....	31
3.1.2	Pojivo – SORFIX.....	34
3.1.3	Aktivátor – hydroxid vápenatý .....	37
3.1.4	Přísady .....	37
3.1.5	Plnivo.....	37
3.1.6	Voda.....	39
3.2	Výroba vzorků.....	39
3.2.1	Mletí.....	39
3.2.2	Složení sérií .....	45



3.2.3	Průběh výroby.....	45
3.2.4	Konzistence .....	48
3.3	Postupy měření .....	52
3.3.1	Měření pevnosti .....	52
3.3.2	Měření nasákavosti .....	53
3.3.3	Zkoušky CHRL.....	56
3.3.4	Fenolftaleinové zkoušky.....	57
4	Výsledky a diskuze .....	59
4.1	Pevnost .....	59
	ETH 10 .....	59
4.1.1	Samotná ETH 10 .....	59
4.1.2	ETH 10 + Ca(OH) <sub>2</sub> .....	64
4.1.3	ETH 10 + EPC .....	66
4.1.4	ETH 10 + EPC + Ca(OH) <sub>2</sub> .....	68
4.1.5	SORFIX II - ETH 10 + EPC + Ca(OH) <sub>2</sub> .....	69
4.1.6	Porovnání výsledků ETH 10.....	71
	ETH 20 .....	73
4.1.7	Samotná ETH 20 .....	73
4.1.8	ETH 20 + Ca(OH) <sub>2</sub> .....	75
4.1.9	ETH 20 + EPC .....	77
4.1.10	ETH 20 + EPC + Ca(OH) <sub>2</sub> .....	78
4.1.11	SORFIX I - ETH 20 + EPC + Ca(OH) <sub>2</sub> .....	80
4.1.12	Porovnání výsledků ETH 20.....	82
4.1.13	ETH 10 vs. ETH 20 .....	83
4.2	Nasákavost.....	85
4.2.1	Nasákavost - ETH 10.....	85





4.2.2	Nasákavost - ETH 20.....	87
4.3	CHRL .....	89
4.3.1	CHRL - ETH 10 .....	90
4.3.2	CHRL - ETH 20 .....	94
4.3.3	CHRL - ETH 10 vs. ETH 20 .....	95
4.4	Karbonatace.....	96
4.5	Konzistence .....	99
4.6	Sumarizace výsledků.....	102
4.6.1	Pevnost.....	102
4.6.2	Nasákavost.....	103
4.6.3	CHRL.....	103
4.6.4	Karbonatace .....	104
4.6.5	Konzistence .....	104
5	Závěr .....	105
	Seznam použitých zdrojů .....	107
	Seznam obrázků .....	111
	Seznam grafů.....	112
	Seznam tabulek .....	116

## 1 Úvod

Zvyšující se životní úroveň snad všech zemí světa jde ruku v ruce s rostoucí spotřebou. Rostoucí spotřeba nejen domácností, ale hlavně průmyslových závodů má za následek zvyšující se tvorbu odpadu, kterou je potřeba někde ukládat. Touto situací zapříčiněné rostoucí ceny za ukládání, nedostatek volných ploch a tenčící se zásoby primárních surovin stále více tlačí k opětovnému využívání odpadu při další výrobě.

Jedním z odvětví, které produkuje odpady v obrovských objemech a jejich využitelnost by mohla být velická, je energetický a metalurgický průmysl. Využití materiálů produkovaných těmito průmyslovými odvětvími, jako jsou popílký, strusky nebo energosádrovce, má velký ekologický a často i ekonomický vliv. Pokud propojíme tento fakt s faktem, že beton, kde je pojivem, drahý, energeticky náročný a neekologický cement, je jedním z nejvíce používaných materiálů ve stavebnictví. Tak z těchto faktů vzejde myšlenka úplného nahrazení cementu druhotnými surovinami ze spalování uhlí. Avšak k realizaci této myšlenky povede dlouhá cesta plná zkoušek a získávání empirických zkušeností s materiálem.

Náhražkou současného klasického cementového betonu může být směs betonu označovaná B-FPC, která je pojena pouze popílký, tedy bez přidaného cementu. Tento poměrně mladý druh betonu nevyužívá pouze klasický, alkalicky aktivovaný, vysokoteplotní popílek, ale také popílek fluidní, který je produktem ekologičtějšího spalování uhlí a je sám o sobě reaktivní.

B-FPC betony zatím kvůli legislativě a zkušenostem s nimi zatím neaspírují na nahrazení nosných konstrukčních prvků, ale pouze jako materiál pro výrobu prefabrikovaných silničních panelů pro stabilizaci pojízdných ploch nebo pro lokální zpevnění podloží. Během tímto směrem orientovaných experimentů bylo zjištěno několik problémů, které je před samotným uvedením do praxe nutno vyřešit.

Jedním z těchto problémů je fakt, že vzorky s fluidním popílkem podléhají zvýšené degradaci při vystavení vnějším povětrnostním vlivům. Na základě tohoto zjištění a několika dalších výzkumných prací se pokusím přispět k řešení dané situace.

## 1.1 Cíle práce

- Rešerše problematiky ternárních pojiv a sulfátovápenatých popílků.
- Rešerše odolnosti betonů proti působení mrazu a CHRL.
- Návrh a příprava ternárního pojiva na bázi sulfátovápenatého popílku.
- Návrh a příprava FPC betonů s pojivem různých typů na bázi sulfátovápenatého popílku.
- Zkoušky nasákavosti
- Zkoušky CHRL
- Zkoušky základních fyzikálně-mechanických vlastností
- Vyhodnocení výsledků výzkumu a jejich porovnání s odolností na CHRL cementových betonů

## 2 Teoretická část

Před samotnými zkouškami, měřeními a vyhodnocením je nezbytné nejdříve nastínit problematiku pojiv, trvanlivosti betonů a úpravy mletím.

### 2.1 Trvanlivost betonů

Trvanlivost betonu, nebo jakékoliv jiné stavební hmoty, lze charakterizovat dobou, po kterou je schopen odolávat působení různých vlivů. Může se jednat o působení či mnohdy spolupůsobení vlivů, jako jsou změny teploty, působení slunečního záření, opakované zvlhčování, zmrazování a rozmrazování, a také působení agresivních látek. V praxi je nejčastějším problémem životnosti železobetonové konstrukce koroze výztuže, kterou ovlivňuje propustnost betonu, konkrétně propustnost krycí vrstvy betonu. [1]

Trvanlivostní aspekty, které je vždy potřeba zvážit u FPC betonů a nejen u nich, jsou:

- Nasákavost (propustnost),
- Odolnost proti zmrazování a rozmrazování,
- Chemická odolnost,
- Koroze výztuže,
- Mechanická odolnost (otěr),
- Alkalicko-křemičitá reakce (ASR).

#### 2.1.1 Odolnost proti nasáknutí

Nasákavost má nepříznivý vliv na mrazuvzdornost betonu, voda obsažená v pórech se při teplotách pod nulou mění v led, který se rozpíná a narušuje strukturu betonu. Maximální hodnota nasákavosti je 6% (platí pro stupeň vlivu prostředí XC3) [4]. Z tohoto důvodu můžeme být u velmi nasákových hmot nuceni používat častěji nebo ve větším množství CHRL, což může vést ke tvoření krystalů solí a ke zvýšeným napětím v povrchu tělesa.

Při měření nasákavosti betonu je vzorek zcela ponořen ve vodě a dochází tak k nasycení otevřených pórů betonu všemi směry (zatímco v případě měření sorptivity dochází k nasáknutí vody pouze kapilárními póry proti působení účinků gravitace).

Metodiku měření nasákavosti v současné době ustanovuje norma ČSN EN 13369:2013 - Společná ustanovení pro betonové prefabrikáty - příloha G.

### **Postup zkoušky podle ČSN EN 13369:**

Tělesa se ponoří do nádoby s pitnou vodou o teplotě  $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ . Tělesa musí být od sebe vzdálena nejméně 15 mm a mít nad sebou nejméně 20 mm vody. Nejmenší doba ponoření musí být tři dny, nebo dokud se nedosáhne konstantní hmotnosti M1. Konstantní hmotnost se považuje za dosaženou, když dvě vážení provedená v intervalu 24 hodin vykáží rozdíl hmotnosti tělesa menší než 0,1%. [4]

Před každým vážením se těleso otře vysoušecí kůží nebo houbou, která byla navlhčena a vymačkána k odstranění přebytečné vody. Osušení je správné, když je povrch betonu matný. Potom se zaznamená hmotnost M1 zkušební tělesa. [4]

Následně se zkušební těleso umístí do pece tak, aby byla vzdálenost mezi vzorky alespoň 15 mm. Těleso se suší při teplotě  $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$  do dosažení konstantní hmotnosti. Nejmenší doba sušení musí být tři dny, nebo dokud se nedosáhne konstantní hmotnosti M2. Konstantní hmotnost se považuje za dosaženou, když dvě vážení provedená v intervalu 24 hodin vykáží rozdíl hmotnosti tělesa menší než 0,1%. Pozn.: Do pece se nemají vkládat nová mokrá tělesa, pokud cyklus právě sušených těles dosáhl 48 hodin. [4]

### **2.1.2 Odolnost proti mrazu**

Na trvanlivost stavebních materiálů má rozhodující vliv vlhkost v nich obsažená. Mrazová degradace betonu i všech nejen cementem pojených materiálů je dominantním degradačním procesem, který ve středoevropských podmínkách rozhoduje o trvanlivosti betonových a železobetonových prvků. [5]

Názory na mrazuvzdornost se přes rozsáhlé experimentální práce i teoretické studie stále významně liší. Popsat jednoznačně mechanismus mrazové degradace tedy není prakticky možné. Nejjednodušší představa, že tahová napětí, vyvolávající poškození struktury betonu vznikající v důsledku přechodu vody v led a zvětšení jejího objemu o cca 9%, je velmi nepřesná. Ve skutečnosti je pórový systém betonu mimořádně komplikovaný a je tvořen složitým systémem gelových kapilárních i vzduchových makropórů, které jsou i u vlhkého betonu v exteriéru různým způsobem nasyceny vodou. Při poklesu teploty pak voda v pórech zamrzá při

různých teplotách v závislosti na fyzikálně-chemických parametrech mikrostruktury. Experimentální práce prokázaly, že v některých typech pórů nepřechází voda v led ani při hlubokých záporných teplotách v intervalu  $-30$  až  $-40^{\circ}\text{C}$ . „Převážně se tedy soudí, že poškození je vyvoláno hydraulickým tlakem vody, která je do kapilár vtlačována postupně se tvořícím ledem. V okamžiku, kdy tento hydraulický přetlak překoná tahovou pevnost cementové matrice, dojde k poruchám.“ [5] Nelze však pominout ani teorie, odkazující na rozdílnou teplotní roztažnost kameniva, cementové matrice a ledu. Tyto fyzikálně-chemické procesy jsou výrazně komplikovány a zesilovány přítomností rozmrazovacích prostředků, tedy především chloridu sodného. [5]

Zkoušku mrazuvzdornosti stanovuje norma ČSN 731322 - Stanovení mrazuvzdornosti betonu. **Postup zkoušky podle ČSN 731322:**

Zmrazování a rozmrazování zkušebních těles se koná ve zmrazovacích cyklech, při kterých musí být teplota mrazícího prostředí v rozmezí  $-15^{\circ}\text{C}$  až  $-23^{\circ}\text{C}$ . Jeden zmrazovací cyklus se skládá ze 4 hodin zmrazování a dvou hodin rozmrazování. Při zmrazování se zkušební tělesa ukládají do prostoru, který musí mít předem požadovanou teplotu, při rozmrazování se zkušební tělesa ukládají do vody  $+20^{\circ}\text{C}$  teplé. V mimopracovní době jsou zkušební tělesa uložena v mrazícím prostoru požadované teploty. Vzorky se přeměřují (destruktivní zkouškou v tahu za ohybu nebo nedestruktivní zkouškou) a váží po etapách, přičemž každá etapa má 25 cyklů. [6]

Jako výsledek zkoušky se uvádějí hodnoty pro každou ukončenou etapu a pro celou zkoušku zmrazování:

- a) Zjištěné úbytky hmotnosti zkoušených zmrazovaných trámců v % hmotnosti
- b) Pevnosti betonu v tahu za ohybu a zpravidla i pevnost konců trámců v tlaku, a to jak zmrazovaných tak i porovnávacích
- c) Součinitel mrazuvzdornosti betonu po jednotlivých etapách a po ukončení zkoušky [6]

„Součinitel mrazuvzdornosti je poměr hodnoty aritmetického průměru pevnosti zmrazovaných trámců v tahu za ohybu k hodnotě aritmetického průměru

pevnosti porovnávacích trámů v tahu za ohybu. Beton je mrazuvzdorný na ten počet cyklů, při kterém součinitel mrazuvzdornosti není menší než 75%.“ [6]

### 2.1.3 Odolnost proti CHRL

V chladných podnebních je k úpravě silnic a chodníků obvykle používána sůl. Degradace povrchu betonu vlivem solí, takzvané odlupování, je jedním z hlavních příčin snížené životnosti betonových dopravních konstrukcí. Důsledkem toho byl tento jev podroben rozsáhlému výzkumnému úsilí. Avšak i přes toto úsilí neexistuje jednotné usnesení se na příčině odlupování, takže se i obtížně daří identifikovat prostředek boje proti tomuto typu poškození. [24]

Poškození odlupováním je progresivní a skládá se z postupného odlupování odštěpků nebo vloček materiálu. Je důležité zmínit, že solné odlupování není analogické s poruchou vlivem běžného mrazu, při které dochází ke ztrátě tuhosti a pevnosti. Odlupování nenarušuje mechanickou integritu tělesa jako celku, ale pouze jeho vrchní část, čímž přispívá k rychlejší a větší degradaci ostatními vlivy. [25]

Hlavní rozdílné vlivy vznikající při použití chemických rozmrazovacích látek (CHRL), oproti zmrazovacím cyklům bez CHRL jsou tyto:

- **Teplotní šok**

V přítomnosti solného roztoku, je teplota tání snížena. Proto aplikujeme sůl do ledové vrstvy. Pokud je koncentrace soli dostatečná, klesne bod tání pod teplotu okolí. Teplo, které je nutné k tomuto roztátí, se odebírání z povrchu betonového tělesa. V důsledku toho se bude na povrchu tvořit teplotní spád, což vede k tvorbě rozdílného napětí a tlaku. V tomto případě se těleso deformuje v důsledku tlaku v tenké vrstvě a je zde kruhové napětí na povrchu. [26]

- **Srážení solí**

Když je solný roztok zmrazován, vznikající led neobsahuje žádné rozpuštěné solné ionty v krystalické mřížce. Proto koncentrace soli ve zbývajícím roztoku vzrůstá. Teplota tání roztoku při rovnováze s ledem je při jakékoliv teplotě nižší než teplota tání samotného roztoku. To znamená, že povrch vzorku při zkoušce CHRL je vystaven koncentrovanému roztoku, jehož složení závisí na minimální vyvozené teplotě. Při jakékoli teplotě je objemová rovnováha ledu a roztoku ovlivňována pákovým pravidlem, při potřebné znalosti počáteční koncentrace roztoku. Objem

koncentrovaného roztoku klesá, jako původní koncentrace stoupá. V počáteční fázi při teplotě 20°C je koncentrace roztoku NaCl 3%, jeho koncentrace se při -20°C zvětší na 22% a o objemový podíl roztoku klesne na 5%. [26]

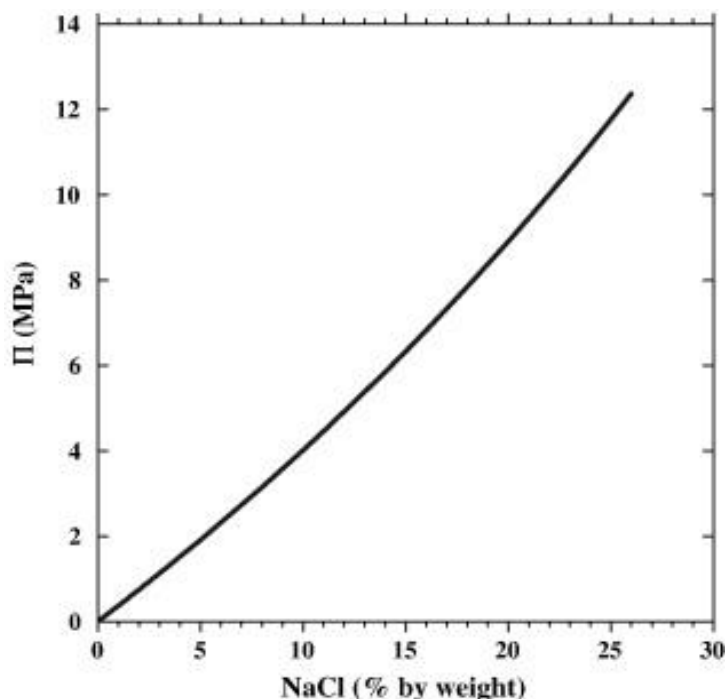
V ideálních podmínkách se koncentrace soli na povrchu rovná koncentraci vnějšího roztoku. Pokud však dojde k vysoušení povrchu, může se zvýšit koncentrace roztoku a dojít ke srážení. Bylo prokázáno, že tyto podmínky mohou vést k destruktivním napětím. Rozsah poškození závisí na rychlosti působení soli a rychlosti, kterou je sůl odváděna z povrchu vysušováním. Vysušování povrchu nezpůsobuje při laboratorních testech degradaci, ale způsobuje degradaci v reálné expozici, kdy ke krystalizaci soli může dojít vlivem vysušování povrchu. [26]

- **Osmotický tlak**

Hloubka, ve které je koncentrace soli v pórové kapalině v rovnováze s koncentrací roztoku v misce je dána vztahem  $x^2 = D \cdot t$ , kde  $x$  je hloubka rovnováhy,  $D$  je difuzní koeficient a  $t$  je čas. Při pokojové teplotě je difuzní koeficient chloridových iontů materiálem na principu cementu od  $10^{-11}$  do  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Za předpokladu, že koeficient difuzního odporu pro sodné ionty je stejný, tak potom se zvyšující se koncentrací soli v pórech roste stupeň nasycení povrchu a zmenšuje se množství ledu vytvořeného v pórech. Když se vytváří led v tomto prostředí, koncentrace soli v roztoku blíže k ledu bude vyšší. Výsledkem tohoto jevu je osmotický tlakový spád. [26]

Koncentrace zbývajícího roztoku roste, když se tvoří led ze solného roztoku. Proto když se tvoří led na povrchu betonu, vznikne zde rozdílná koncentrace mezi místem, kde se led vytvořil a okolními nasycenými póry. Reakcí na toto bude tendence vody proudit ze zóny nízké koncentrace do zóny s vysokou koncentrací. Jak voda difunduje směrem k vyšší koncentraci soli, tlak kapaliny roste. Tento tlak bude roven rozdílu v osmotickém tlaku odpovídajícím těmto dvěma koncentracím, což je tlak, který musí být vyvozen na zónu s vyšší koncentrací, aby nedošlo k difuzi. [26]

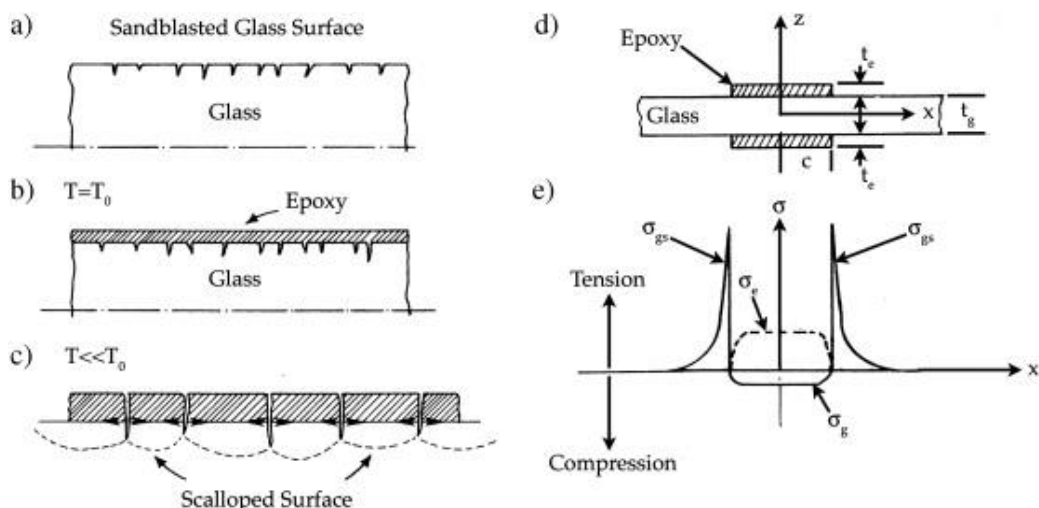




Obr. 2.1 – Závislost osmotického tlaku ve stěně póru na koncentraci roztoku. Pevnost betonu v tahu bude překročena při rozdílu koncentrace v solném roztoku okolo 14% [26]

- Mechanismus Glue-Spall**

Nedávno byl navržen mechanismus Glue-Spall, jako hlavní příčina solné degradace. Glue spalling je technika používaná k dekoraci povrchu skla odlupováním mělkých lasturek. Procedura se sestává z pískovaného povrchu skla, na který se rozprostře vrstva epoxydu při vysoké teplotě, poté se zmenšuje teplota kompozitu. Jakmile je teplota zmenšována, epoxyd má tendenci se smršťovat více než podkladní sklo, které vyvolá v této vrstvě napětí. Díky tomu se epoxyd rozláme do malých ostrůvků. Podél obvodu těchto ostrůvků se vytváří tahové napětí ve skle (Obr. 2.2) Toto napětí vytvoří prasklinky na povrchu skla, které se šíří a jsou zakončeny odlupováním malých skleněných lasturek. Když solný roztok zmrzne na povrchu betonu, vytvoří led a beton dvouvrstvý kompozit. Jakmile je teplota kompozitu snižována pod teplotu tání roztoku, ledová vrstva má tendenci se zmenšovat 5 krát více než podkladní beton. Led hraje roli podobnou epoxydu na betonovém povrchu. [26]



Obr. 2.2 – Mechanismus Glue-Spall [26]

Z těchto diferencujících se vlivů a z mnoha dalších výzkumů bylo sestaveno 8 hlavních bodů charakteristického chování CHRL:

- 1) Vliv CHRL způsobuje postupné odpadávání malých vloček a úlomků
- 2) Nejnepříznivější vliv na vzorek má 3% koncentrace rozpuštěné látky (jakékoliv CHRL)
- 3) K odlupování nedochází, dokud se nedostane CHRL do přímého kontaktu se vzorkem
- 4) Žádné vážné poškození nenastává, pokud je teplota držena nad  $-10^{\circ}\text{C}$ . Velikost poškození roste s klesající teplotou pod  $-10^{\circ}\text{C}$  a s dobou strávenou pod touto hranicí
- 5) Provzdušnění zlepšuje odolnost proti působení CHRL
- 6) Koncentrace roztoku na povrchu vzorku je důležitější než koncentrace roztoku v pórech vzorku
- 7) Citlivost na CHRL nekoresponduje s citlivostí na vnitřní působení mrazu
- 8) Pevnost a kvalita povrchu ovlivňuje schopnost tělesa odolávat vlivům CHRL [26]

Odolnost proti CHRL je jedním z hlavních problémů u silničních konstrukcí z cementových betonů. Jak se ukazuje z jiných výzkumů, odolnost betonu vůči CHRL lze značně zvýšit přidáním popílkové příměsi (do 30%). Avšak tato zvýšená odolnost rapidně klesá u přidaného množství nad 30%. Cementový beton by navíc měl během

působení degradačních vlivů těžit z efektu zarůstajících trhlin, takzvaného self-healing efektu. [26]

Zkoušku CHRL na vozovkách stanovuje ČSN 73 1326 – „Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek“ nebo ČSN EN 1338 – „Betonové dlažební bloky – požadavky a zkušební metody“.

#### **Postup zkoušky dle ČSN 73 1326+Z1 – metoda A:**

Krychle o hraně 150mm se vloží do misky s roztokem chemické rozmrazovací látky předepsané koncentrace (u NaCl to jsou 3%) tak aby byl vzorek ponořen  $5\pm 1$ mm. V klima-komoře se vzorky podrobí střídavému zamrzání a rozmrzání. Cyklus sestává ze zchlazení roztoku na dně misky na teplotu  $-15^{\circ}\text{C}$  a udržování této teploty po dobu 15 minut. Pak následuje ohřev roztoku na teplotu  $20^{\circ}\text{C}$  a opětovné udržování teploty po dobu 15 minut. Tím končí 1 cyklus. Po každém 25. cyklu se roztok slijí a ze vzorku se vodou splaví uvolněné částice, které se následně vysuší do konstantní hmotnosti při teplotě  $105^{\circ}\text{C}$ . Odpady z jednotlivých cyklů se uschovávají. [27]

Odolnost povrchu cementového betonu proti působení vody a CHRL je dána hmotností odpadu na jednotku plochy  $\rho_a$  v  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  a určí se ze vzorce:

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

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

A je velikost zkušební plochy v  $\text{m}^2$ , rozměry se stanoví s přesností měření na 1%. [27]

Zkouška se ukončí buď po dosažení předepsaného počtu cyklů, nebo po dosažení maximální povolené velikosti  $\rho_a$  podle Tab. 2.1 [27]

Stupeň porušení	$\rho_a$ g . m <sup>-2</sup>	Charakter odpadu
1 — nenarušený	do 50	velmi jemné prachovité částice do 1 mm
2 — slabě narušený	do 500	jako u stupně 1, větší množství částic do 1 mm, podíl částic do 2 mm menší než 50 % hmotnosti odpadu
3 — narušený	do 1 000	jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes 500 g . m <sup>-2</sup>
4 — silně narušený	do 3 000	jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes 500 g . m <sup>-2</sup>
5 — rozpadlý	přes 3 000	jako u stupně 4, podíl částic nad 4 mm více jak 20 % hmotnosti odpadu

Tab. 2.1 – Zatřídění povrchů zkušebních ploch [27]

V ČSN 73 1326+Z1 jsou zmíněny ještě zkoušky B a C, které se v podstatě liší jen tím, že je vzorek opatřen vodotěsným “límcem“ a solný roztok, popřípadě solanka samotná, je nanášena na zmrzlou horní plochu vzorku. Zkouška je tak blíže realitě avšak mnohem náročnější.

**Zkouška dle ČSN EN 1338** probíhá velmi podobně jako u ČSN 73 1326+Z1 metodou C. Je zde však uveden požadavek, aby silniční konstrukční prvky po 28 cyklech dosahovaly v průměru odpadu maximálně 1000 g.m<sup>-2</sup> viz. Tab. 2.2.

Tabulka 4.2 – Odolnost proti zmrazovacím cyklům při použití rozmrazovacích solí

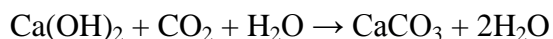
Třída	Označení	Ztráta hmotnosti po zkoušce mrazuvzdornosti kg/m <sup>2</sup>
3	D	≤ 1,0 jako střední hodnota, přičemž žádná jednotlivá hodnota nesmí přestoupit > 1,5

Tab. 2.2 – Požadavek na betonové kce. dle ČSN EN 1338 po 28 cyklech [28]

#### 2.1.4 Karbonatace betonu

Na beton působí celá řada vnějších agresivních činitelů, které způsobují poruchy v konstrukci, karbonatace se řadí mezi vlivy chemické, kdy je konstrukce vystavena plynnému prostředí. Karbonatace je jedním z přirozených procesů "stárnutí" betonů, který je odrazem působení atmosférického oxidu uhličitého. Jeho koncentrace v atmosféře se uvádí průměrně okolo 0,03%. Oxid uhličitý se společně s

vodní párou dostává do betonu obvodových nebo venkovních konstrukcí v plynné formě. Míra jejich pronikání a účinky jsou ovlivňovány druhem hydratačních produktů pojiv, strukturou cementového tmele a povrchovými úpravami betonových konstrukcí. Při styku oxidu uhličitého s cementovým tmelem, který má zásaditý charakter, dojde k neutralizační reakci, kterou nazýváme karbonatací. Proces karbonatace hydroxidu vápenatého lze zjednodušeně popsat rovnicí: [3]



Vlivem karbonatace vznikají v betonu nerozpustné karbonátové novotvary  $\text{CaCO}_3$ , které se usazují v pórech a kapilárách a postupně je vyplňují. Tím je zabráněno novému pronikání oxidu uhličitého. Objemová hmotnost povrchové vrstvy betonu se zvyšuje a mění se mikrostruktura cementového tmele. U hutných betonů se to projeví poklesem propustnosti a stává se tak odolným vůči účinkům karbonatace. Výztuž, vsazená uvnitř těchto betonů, je tedy chráněna proti korozi. U betonů vykazujících značnou pórovitost však tato situace nenastane. Vznikající karbonátové útvary nevyplní póry a kapiláry dostatečně a propustnost pro plyny a páry je tedy vysoká. Karbonatace tak s přibývajícím časem proniká do větších hloubek, až se dostane na úroveň výztuže, která začne korodovat. [3]

Pro posouzení aktuálního stavu karbonatace betonu je důležitá znalost formy vzniklého  $\text{CaCO}_3$  - zda se vyskytuje společně s amorfním silikagelem nebo ve formě jemnozrnných krystalických modifikací uhličitanu vápenatého, popřípadě ve formě krystalů kalcitu a aragonitu. V konečném stadiu karbonatace se ve struktuře cementového tmele vytvoří krystaly aragonitu a kalcitu vzniklé překrystalováním. Ty v pórech a kapilárách vyvozují velké krystalické tlaky, které zapříčiňují korozi výztuže, porušení cementového tmele a v neposlední řadě ztrátu soudržnosti betonu. [2]

#### **Etapy karbonatace:**

- I. etapa karbonatace: V mezizrnném prostoru dochází k přeměně  $\text{Ca(OH)}_2$ , popřípadě jeho roztoku na nerozpustný  $\text{CaCO}_3$ , který postupně zaplňuje póry a kapiláry. V této etapě se vlastnosti betonu zlepšují, a je tedy výhodná.
- II. etapa karbonatace: V této fázi dochází k přeměně ostatních hydratačních složek cementu. Vznikají modifikace  $\text{CaCO}_3$  společně s

amorfním silikagelem nebo jemnozrnné krystalické novotvary  $\text{CaCO}_3$ , zřídka hrubozrnné krystalické novotvary. Vlastnosti betonu v druhém období karbonatace se moc nemění.

- III. etapa karbonatace: Dochází k překrytalizování již vzniklých uhličitanových novotvarů z mezizrnného roztoku. Nově vzniklé útvary ve formě kalcitu a aragonitu jsou oproti dřívějším větší a početnější. Fyzikálně mechanické vlastnosti betonu se během třetího stádia postupně zhoršují a hodnoty pH se snižují.
- IV. etapa karbonatace: Stupeň karbonatace dosahuje téměř ke sto procentům, kdy je cementový tmel téměř v cele své struktuře zasažen krystaly aragonitu a kalcitu. To může vést až ke ztrátě soudržnosti a pevnosti betonu. Hodnota pH je velmi nízká a probíhá výrazná koroze výztuže. [2]

Rychlost karbonatace můžeme ovlivnit při návrhu složení betonové směsi, a to především obsahem CaO v cementu. S větším obsahem CaO roste odolnost betonu vůči vzdušnému oxidu uhličitému.  $\text{Ca(OH)}_2$ , který se vytváří během hydratace cementu v kapilárních pórech vlivem koncentračního spádu, se přesouvá z větší hloubky betonu na jeho povrch, kde reaguje s oxidem uhličitým a vytváří krystalické novotvary  $\text{CaCO}_3$ . To se příznivě projevuje zmenšením kapilár a zpomalením popř. zastavením procesu karbonatace. [30]

Rychlost karbonatace je závislá také na vlhkosti. U proschlého betonu se karbonatace zpomaluje. V prvních dvou etapách karbonatace je určitá vlhkost nutná k proběhnutí chemických reakcí, na výslednou karbonataci však nemá vliv. Ve třetí a čtvrté etapě však zvýšení vlhkosti hraje velkou roli, bez níž by krystaly kalcitu a aragonitu nemohly vzniknout. Velký počet hrubozrnných karbonatických krystalů vzniká při opakovaném provlhčování a následném prosušování betonu. Zvýšené působení  $\text{CO}_2$  přitom není nutné. [30]

Karbonatace betonů, které byly proteplovány během míchání směsi, probíhá taktéž rychleji. Se zvýšením teploty se mění mikrostruktura cementového tmelu, a tedy i jeho vlastnosti. V závislosti na době uložení betonu se zvyšuje plynopropustnost betonu, a to až třikrát více než u betonů neproteplovávaných. [2]

Velkou roli hraje i skutečnost, že koroze výztuže, která nastává již ve druhé etapě karbonatace, probíhá rychleji než při rozrušování cementového tmelu. K překročení únosnosti výztuže, a tedy i konstrukce, by tak mohlo nastat ještě před dosažením čtvrtého stadia karbonatace. [2]

Zkouškou karbonatace se zabývá ČSN EN 13630 – *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení hloubky zasažení karbonatů v zatvrdlém betonu pomocí fenolftaleinové metody.*

### **Postup zkoušky dle ČSN EN 13630:**

Na odebrané vzorky, čerstvě rozstřípnuté podle jejich podélné osy a očištěné nanese se rozprašovačem indikační roztok fenolftaleinu (1g fenolftaleinu rozpuštěný v 70ml ethyl alkoholu a zředěný do 100ml destilovanou vodou). Povrch vzorku navlhčíme tak, aby roztok nestékal. S přesností na mm změříme průměrnou vzdálenost od okraje vzorku k fialovému zabarvení. Pokud se na vzorku vyskytnou ojedinělé kapsy, například v trhlinách, výrazně větší než průměrná vzdálenost, pak tato hodnota nesmí být zahrnuta do výpočtu. Protokol o zkoušce doplníme o informace jako je stáří vzorku, složení, umístění a v ideálním případě opatříme fotografií nebo nákresem. Naměřená hodnota by neměla dosahovat k plánovanému umístění výztuže. Jinými slovy pouze beton, u kterého dojde k fialovému zabarvení, je dostatečně alkalický, aby ocel pasivoval. Tato metoda nedokáže rozlišit, zda je ztráta alkality způsobena karbonatů nebo jinou příčinou, jakou může být například vystavení kyselinám nebo kyselým plynům. [29]

## **2.2 Ternární pojiva**

Pojmem ternární pojivo můžeme označit všechna anorganická pojiva, která mají schopnost samovolného zpevnování alespoň třemi účinnými hydraulickými složkami. Mezi, ve stavebním oboru, nejznámější účinné hydraulické složky patří například sloučeniny  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . V současnosti nejpoužívanějším pojivem ve stavebnictví jsou cementy. [7] [10]

### **2.2.1 Cementy**

Cement je hydraulické pojivo, tedy jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě. Hydraulické

tvrdnutí cementu je důsledkem hydratace vápenatých silikátů (křemičitanů) a aluminátů (hlinitanů). Účinnými hydraulickými složkami cementů jsou tedy sloučeniny CaO s SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, popřípadě jiné sloučeniny podobného typu. Celkový obsah aktivního oxidu vápenatého (CaO) a aktivního oxidu křemičitého (SiO<sub>2</sub>) musí být v cementu nejméně 50 % hmotnosti. [7]

Podle převažující aktivní složky je možno rozdělit cementy do tří skupin:

- Křemičitanové (silikátové) cementy – jejich nejvýznamnějším zástupcem je cement portlandský. Složením příbuzné, avšak způsobem výroby i mechanismem tuhnutí odlišné, jsou cementy z přírodních nebo umělých hydraulických surovin (např. ze strusky).
- Hlinitanové (aluminátové) cementy.
- Jiné (ostatní) cementy – např. železitanové, barnaté apod. (několik málo procent). [7]

ČSN EN 197-1 ed. 2 uvádí pro obecné použití následujících pět skupin cementů podle složení:

- CEM I - portlandský cement
- CEM II - portlandský cement směsný
- CEM III - vysokopecní cement
- CEM IV - pucolánový cement (v současné době se v ČR nevyrábí [8])
- CEM V - směsný cement [9]

### 2.2.2 Popílký

Na základě různých typů topenišť získáváme odlišné typy popílků. Nejrozšířenějším typem jsou popílký vysokoteplotní. Ovšem díky současnému trendu přechodu elektráren na spalování fluidní, získáváme zcela odlišný fluidní popílek. Tyto popílký lze dále dělit na ložové a úletové (filtrové). Ložové zůstávají při spalování na dně kotle a úletové jsou zachyceny v odlučovačích, kam se dostávají společně se spalinami. [11]



### **Vysokoteplotní popílek**

Za vysokoteplotní popílky považujeme popílky pocházející z práškových ohnišť. Tam vznikají za velmi vysokých teplot. Proto popílek obsahuje více než 50 % skelné fáze, která reaguje s  $\text{Ca(OH)}_2$  za vzniku C-S-H gelu. [12]

Popílek se skládá z velice jemných, většinou kulatých nebo kulovitých částic. Jejich velikost bývá zpravidla v rozmezí 0,1 – 0,2 mm. Kulovité částice jsou duté, kdy póry v popílku vznikají při procesu tavení nespalitelných částí a současného vyhořívání organické části. Nežřídko se stává, že na povrchu kulovité popílkové částice je vrstva aluminosilikátového skla obohaceného o Fe. [13]

Vysokoteplotní popílek nemá sám o sobě hydraulické schopnosti. Avšak při přimíchání hydroxidu vápenatého ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) např. jako součást cementu nebo ve formě hašeného vápna, získáváme směs schopnou reagovat a vytvářet stejné produkty jako například při smíchání samotného cementu s vodou. Tento jev je běžně nazýván jako pucolanita. Je určována množstvím oxidu vápenatého, se kterým jsou pucolánově aktivní látky schopné reagovat a také reakční kinetikou této reakce. Pucolánové schopnosti mohou zanikat, pokud je popílek vystaven delší dobu vlhkému prostředí. [7]

### **Fluidní popílek**

Mezi klasickým vysokoteplotním popílkem, který se doposud v betonářské praxi používal, a nově produkovaným popílkem fluidním jsou odlišnosti nejen v chemickém, ale i v mineralogickém složení. Zásadní rozdíly mezi těmito typy jsou zejména ve vyšším podílu oxidu sírového  $\text{SO}_3$  (až 20 hmotnostních %) a volného vysoce reaktivního  $\text{CaO}$  (až 15 hmotnostních %) u popílku z fluidního spalování. Jako další z rozdílných vlastností tohoto popílku je jeho reaktivita. Po pouhém smísení s vodou totiž směs tuhne a tvrdne. To se děje bez přítomnosti jakýchkoliv jiných příměsí a přísad. Tyto pojivové vlastnosti má na svědomí v popílku přítomný anhydrit  $\text{CaSO}_4$  (až 20 hmotnostních %) a volné vápno  $\text{CaO}$ , které je při dané teplotě měkce pálené a tudíž vysoce reaktivní. [7]

Fluidní popílky s výše zmíněnými podstatnými rozdíly od klasického elektrárenského vysokoteplotního popílku nelze hodnotit dle ČSN EN 450-1 (a 450-2), neboť nevyhovují zásadní definici a charakteristice vzniku popílku určeného jako složka betonu a zároveň nesplňují většinu z předepsaných technických kritérií.

Hlavním problémem pro použití fluidního popílku do betonu je jeho relativně vysoký obsah oxidů vápenatého CaO, jenž způsobuje objemové změny čerstvého a tuhnucího betonu. To má za následek vnitřní napětí a rozvoj cementových trhlin v cementovém tmelu a snížení pevnosti ztvrdlého betonu především v tahu za ohybu. Zároveň vysoký obsah SO<sub>3</sub> (síry celkově) v popílku způsobuje korozi ztvrdlého betonu. Díky tomu je v současné době využití fluidního popílku pro výrobu betonu podle ČSN EN 206-1 nepřipustné. [14]

### 2.3 Mletí materiálů

Mletí je definováno v dnes již zrušené normě ČSN 44 7010 jako mechanické rozpojování na zrno převážně menší než 1,25 mm, které se provádí v mlýnech. Jemným mletím se rozumí rozpojování na zrno převážně menší než 0,08 mm. [15]

Účelem mletí je zmenšování rozměru zrn látky a zároveň zvětšování povrchu jednotlivých částic látky. To, jaké bylo dosaženo jemnosti mletí, udává měrný povrch. Při mletí dochází k mechanickému namáhání částic v podobě tlaku, ohybu, stříhu, obrusu a dalších. V místech mechanicky nejslabších vznikají trhlinky, podél nichž se částice rozpadají. Kromě mechanického namáhání probíhá i změna samotné hmoty, což se projevuje změnami krystalické mřížky. [16] [17]

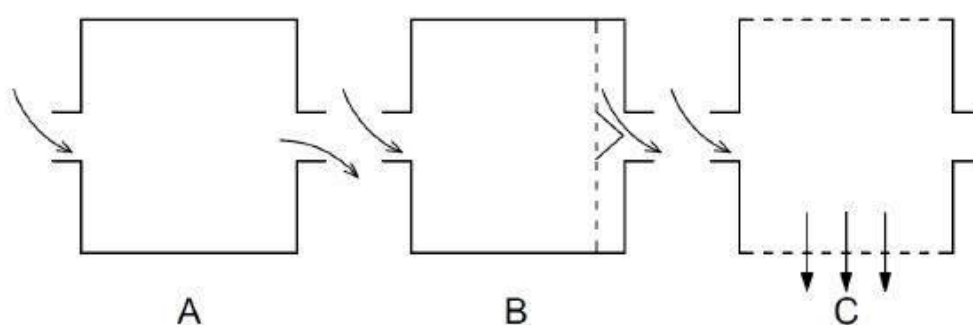
Důležitým fyzikálním parametrem při mletí materiálu je měrný povrch, který udává hrubost zrnitého systému. Měrný povrch hyperbolicky stoupá se zmenšující se velikostí částic. Od určité doby mletí jsou částice již tak jemné, že se dále nezdobňují, nebo může zdobňování materiálu přejít opět k aglomeraci jednotlivých zrn, což vede k poklesu měrného povrchu. [20] [21]

#### 2.3.1 Kulové mlýny

Kulové mlýny patří mezi nejpoužívanější mlýny při zpracování silikátů. Je to vodorovně uložený ocelový válec, který při rotaci rozmělnuje materiál prostřednictvím mlecích těles. Mlecí tělesa, nejčastěji železná, nebo keramická koule, jsou při rotaci vlivem odstředivé síly vynášena vzhůru, odkud při dosažení určité výšky padají na mletý materiál. Dochází tak k rozemílání především nárazem, ale i roztíráním mezi mlecími tělesy. [17] [21]

Rozdělení kulových mlýnů je možné dle různých hledisek:

- Podle tvaru mlecí nádoby dělíme mlýny na bubnové, troubové, trubnaté a kuželové
- Podle mlecího prostředí rozlišujeme mletí za sucha a mletí za mokra.
- Podle povahy provozu na periodické a kontinuální.
- Podle způsobu vynášení rozemletého materiálu se kulové mlýny dělí na mlýny s vynášením dutým čepem (Obr. 2.3 A), mlýny s vynášením štěrbinovou přepážkou (Obr. 2.3 B) a mlýny s vynášecím sítím na obvodu pláště (Obr. 2.3 C). [21] [22]



Obr. 2.3 – Kulové mlýny podle způsobu vynášení rozemletého materiálu [20]

Nejrozšířenějším typem členění kulových mlýnů je dělení dle tvaru mlecí nádoby. Popíšeme si je tedy podrobněji:

#### **Bubnové kulové mlýny (Obr. 2.4 A)**

Mají poměr délky mlýnu k průměru mlýnu, neboli  $L:D$ , okolo 1–1,5. Častěji se používají pro mokré mletí. Mohou se ale využívat i pro suché, přičemž se používá vynášení rozemletého materiálu vynášecím sítím. Bubnový mlýn může sloužit i pro mísení různých surovin. Je možné ho využít téměř pro všechny druhy materiálu. [17] [21]

#### **Troubové (rourové) kulové mlýny (Obr. 2.4 B)**

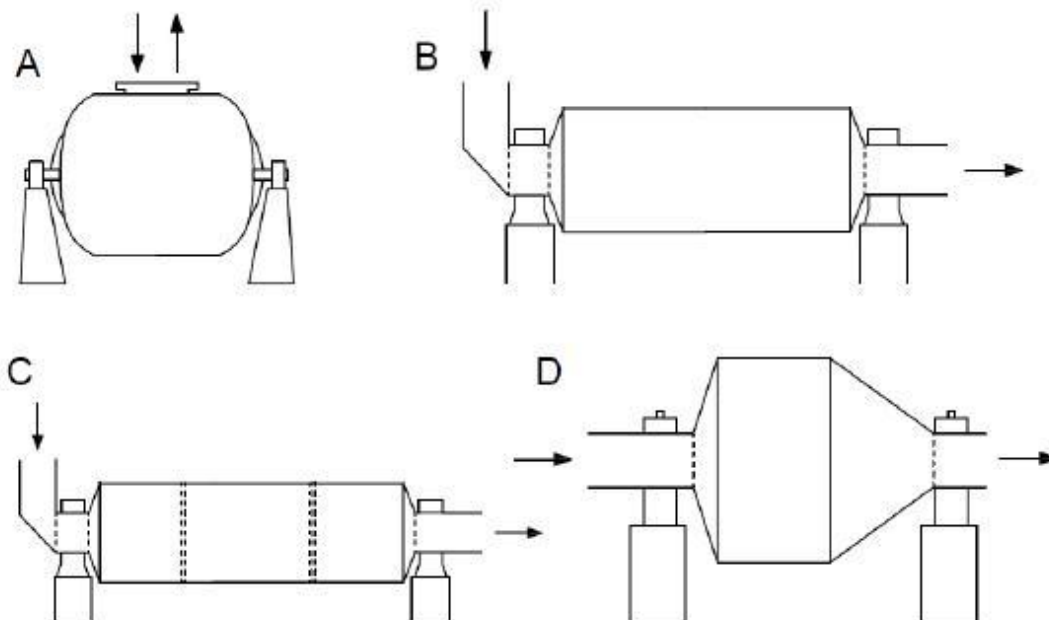
Vyvinuly se z bubnových mlýnů prodloužením pláště. Poměr  $L:D$  je u těchto mlýnů přibližně 2–8. Melivo je dopravováno a následně odváděno dutým čepem. Používají se především v cementářském průmyslu při mletí slínku. Oproti bubnovým mlýnům dochází ke zjemňování materiálu především rozmačkáváním a roztíráním. [17] [21]

### Trubnaté (sdružené) kulové mlýny (Obr. 2.4 C)

Vyvinuly se z mlýnů troubových. Trubnaté mlýny mají na rozdíl od troubových více komor, zpravidla dvě až čtyři, a využívají se pro suché i mokré mletí. V první komoře se používají největší mlecí tělesa, v dalších komorách se jejich velikost postupně zmenšuje. Pro trubnaté mlýny se používá mletí v otevřeném, nebo v uzavřeném okruhu. U otevřeného okruhu je veškerý materiál po mletí odváděn do zásobníků. U okruhu uzavřeného se materiál po průchodu mlýnem roztřídí v třídíči, odkud se hotový výrobek dopraví do zásobníku a částečně rozemletý materiál zpět do mlýna. [17] [21]

### Kuželové kulové mlýny (Obr. 2.4 D)

Podobají se mlýnům bubnovým, využívají však rozdílů obvodových rychlostí mlecích těles ve válcové a kuželové části mlýna. Větší zrna materiálu přecházejí do části mlýna s větším průměrem, kde jsou i větší mlecí tělesa. Naopak jemnější zrna přecházejí do části mlýna se zmenšujícím se průměrem. Kuželové mlýny se používají například pro mletí křemene nebo živce. [17] [21]



Obr. 2.4 – Kulové mlýny podle tvaru mlecí nádoby [17]

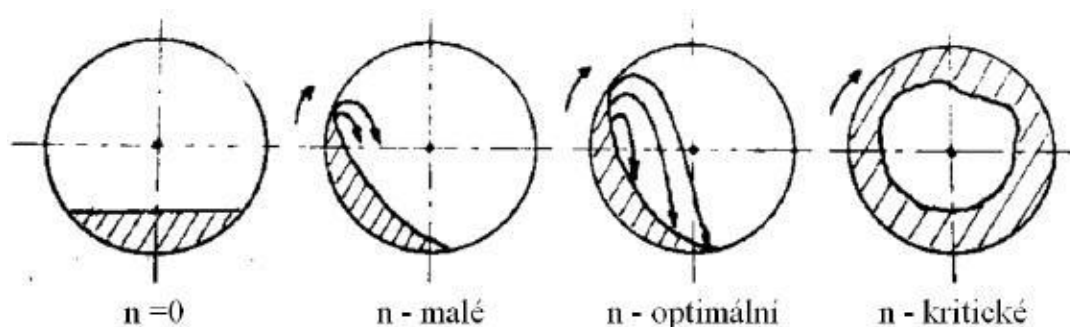
### 2.3.2 Proces mletí v kulovém mlýnu

Charakter mletí je do velké míry závislý na tvaru mlecí nádoby a byl popsán pro jednotlivé nádoby v předchozí kapitole. Pro správný chod kulového mlýna je

však potřeba nejdříve stanovit několik dalších základních parametrů. Jsou jimi: mokrý/suchý způsob mletí, optimální počet otáček mlýna, množství a druh mlecí náplně, výkon a příkon mlýna.

Mletí materiálu může probíhat buď suchým, nebo mokrým způsobem. Při mletí za mokra vytváří voda vhodné mlecí prostředí. Její molekuly se totiž snadno dostanou i do nejjemnějších povrchových trhlinek. „Obsah vody se při mletí mokrým způsobem pohybuje okolo 40%.“ [17] Suché mletí se používá v případě, že výsledný produkt má zůstat suchý. Mokrý mletí má oproti suchému několik výhod. Je potřeba menšího množství mlecích těles, mlýny jsou účinněji chlazeny, dojde k lepší homogenizaci materiálu a pracovní prostředí je méně prašné. Výhodou suchého mletí je menší spotřeba energie než u mokrého mletí, protože voda brzdí náraz mlecích těles. Navíc není potřeba další úpravnický proces, kterým by se odstranila přebytečná voda, jako je tomu u mokrého mletí, kde je potřeba ještě filtrovat, sušit, atd. [16] [18]

Z hlediska optimálních otáček mlýna je potřeba nastavit takovou rychlost otáčení, aby mlecí koule byly vynášeny dostatečně vysoko (Obr. 2.5). Zároveň však nesmí být rychlost příliš velká, protože by odstředivá síla působící na koule byla větší než gravitační a koule by se tak držely po obvodu mlecí komory. Taková frekvence otáčení, při které se koule začínají pohybovat s vnitřním povrchem mlýna a neodpadávají, se nazývá kritickou frekvencí. Pro dosažení maximální mlecího účinku úderem je potřeba zajistit včasné oddělování koulí od povrchu mlecí komory a zároveň dostatečnou pádovou výšku. [22] [23]

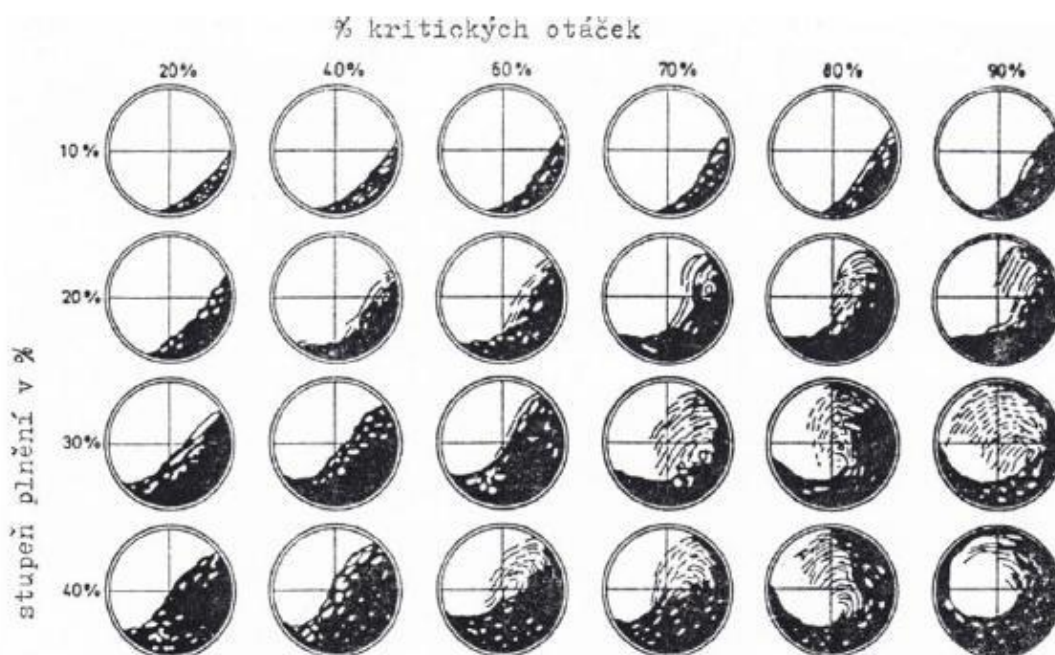


Obr. 2.5 – Tvar hladiny náplně v mlýnu pro různé otáčky [23]

Mlecí náplň kulových mlýnů tvoří nejčastěji ocelové koule. Mlecí tělesa ale mohou mít i tvar válečků, kotoučků a dalších. Kromě oceli se jako materiál používá i pazourek, keramika, či korund. Jiný materiál než ocel je vyžadován hlavně v

případech, kdy namletý produkt nesmí obsahovat železo, které se uvolňuje otěrem mlecích koulí. V těchto případech je navíc vnitřní vyložení mlýna pogumované, nebo porcelánové, namísto ocelových pancéřových desek. Průměry mlecích koulí se pohybují okolo 40–150 mm v závislosti na vlastnostech mletého materiálu, velikosti zrna a průměru mlýna. Většinou se do komory mlýna přidávají koule různých velikostí. [18] [19] [21]

Objem mlecí náplně má vliv na výkon mlýna i spotřebu elektrické energie. „Synpý objem mlecích těles v poměru k pracovnímu objemu mlýna se nazývá stupeň plnění.“ [17] U kovových koulí při suchém mletí je vhodný stupeň plnění 30–40%, při mokřém mletí může být vyšší než 50%. Při nižších hodnotách stupně plnění kloužou koule po pancéřích mlýna. Pohyb mlecích těles v mlýně je závislý především na otáčkách a stupni plnění mlýna viz.(Obr. 2.6). Při nižším stupni plnění je dosaženo silnějšího drtícího účinku mlecích koulí až při vyšších otáčkách. Při vyšším stupni plnění mají mlecí koule naopak drtící účinek již při nižších otáčkách. [17] [21] [22]



Obr. 2.6 – Pohyb mlecích těles v kulovém mlýně [17]

### 3 Experimentální část

V experimentální části jsou nejprve podány informace o materiálech, které vstupovaly do procesu zkoumání vlastností FPC betonů. Další kapitola je věnována postupům výroby vzorků a přípravy materiálů pro ně. A poslední kapitola této části je věnována postupům prováděných měření.

#### 3.1 Vstupní materiály

V této části práce jsou popsány jednotlivé materiály, které byly použity pro výrobu zkušebních těles.

##### 3.1.1 Pojivo - Popílky

Jako pojiva bylo využito různých kombinací elektrárenských popílků. Konkrétně se jednalo o popílky z elektrárny Tisová ETH 10 odběr z 9. 3. 2015 (dále jen ETH 10), ETH 20 odběr z 8. 4. 2015 (dále jen ETH 20) a z elektrárny Počerady-Silo A odběr z 27. 2. 2015 (dále jen EPC).

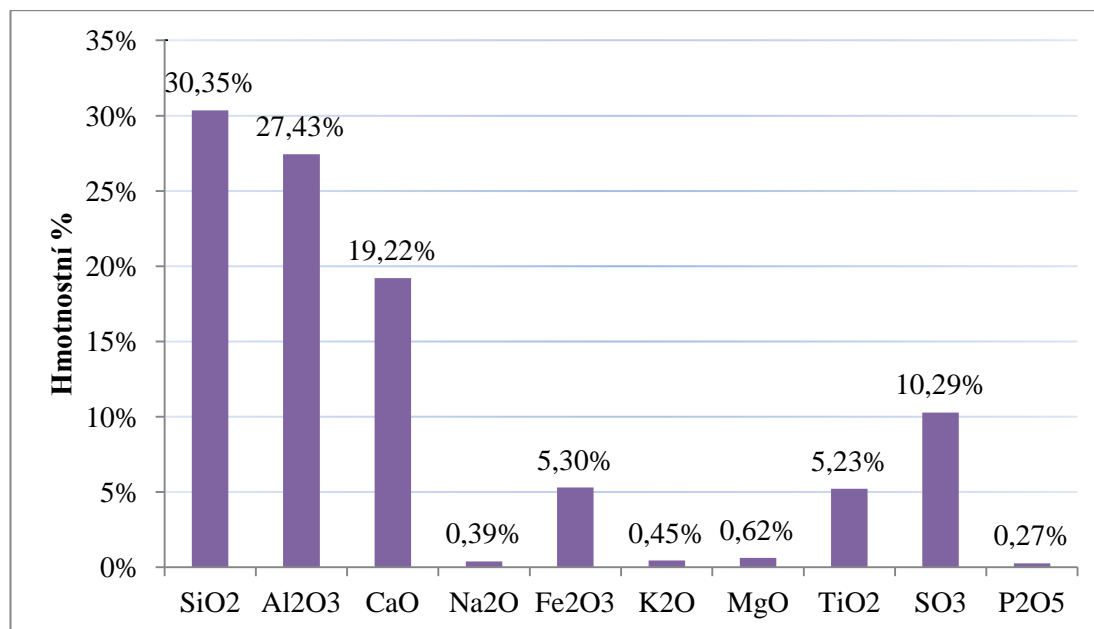
Kvantitativní stanovení prvků jednotlivých nemletých popílků bylo provedeno rentgenovou fluorescenční analýzou zkráceně RFA. Zkouška RFA umožňuje stanovení koncentrace měřených prvků v koncentraci od jedné desítitisíciny procenta. S protonovým číslem prvku roste přesnost měření, které je nedestruktivní a lze tedy opakovat na stejném vzorku. Chemické složení bylo stanovováno pouze u nemletých popílků kvůli předpokladu zachování si chemického složení po mechanickém mletí a z důvodu finanční úspory. [32]

Níže bude uveden obsah chemických látek ve zkušebních vzorcích rozpočítaný na hmotnostní procenta. Uvedeny jsou pouze látky, které překročily hranici 0,15 hmotnostních procent.

**ETH 10** je směs ve formě velmi jemného světle šedého prášku s většími částicemi, složená z fluidních popílků úletových i ložových z kotlů FK11 a FK12 [33]. Hmotnostní rozložení složek popílku ETH 10 zaokrouhlené na dvě desetiny procenta je uvedeno v Tab. 3.1 a grafu Graf 3.1.

ETH 10 9.3.2015 [%]									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
30,35%	27,43%	19,22%	0,39%	5,30%	0,45%	0,62%	5,23%	10,29%	0,27%

Tab. 3.1 – Prvkové složení popílku Tisová ETH 10 z 9. 3. 2015



Graf 3.1 – Prvkové složení popílku Tisová ETH 10 z 9. 3. 2015

Fluidní popílky jsou zhruba z 60 % tvořeny dvěma oxidy – SiO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [11]. U popílku ETH 10, který vzniká při fluidním spalování, je zastoupení těchto dvou oxidů 57,78 %. Další významnou složkou je CaO v množství 19,22 %. CaO sice zvyšuje reaktivitu popílku a výsledné pevnosti popílku, zároveň však vytváří vyšší riziko objemových změn.

ETH 10 obsahuje rovněž větší podíl SO<sub>3</sub> v množství 10,29 %. SO<sub>3</sub> je nežádoucí hlavně při případném využití popílku jako příměsi do betonu, kde způsobuje objemové změny a korozi ztvrdlého betonu [10]. Zastoupení TiO<sub>2</sub> v množství 5,23 % je poměrně vysoké, zpravidla se u fluidních popílků pohybuje okolo 1,5 % [11]. Ve větším množství je v ETH 10 ještě zastoupen Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ostatní oxidy jsou zastoupeny v množství menším než 1 % hmotnosti.

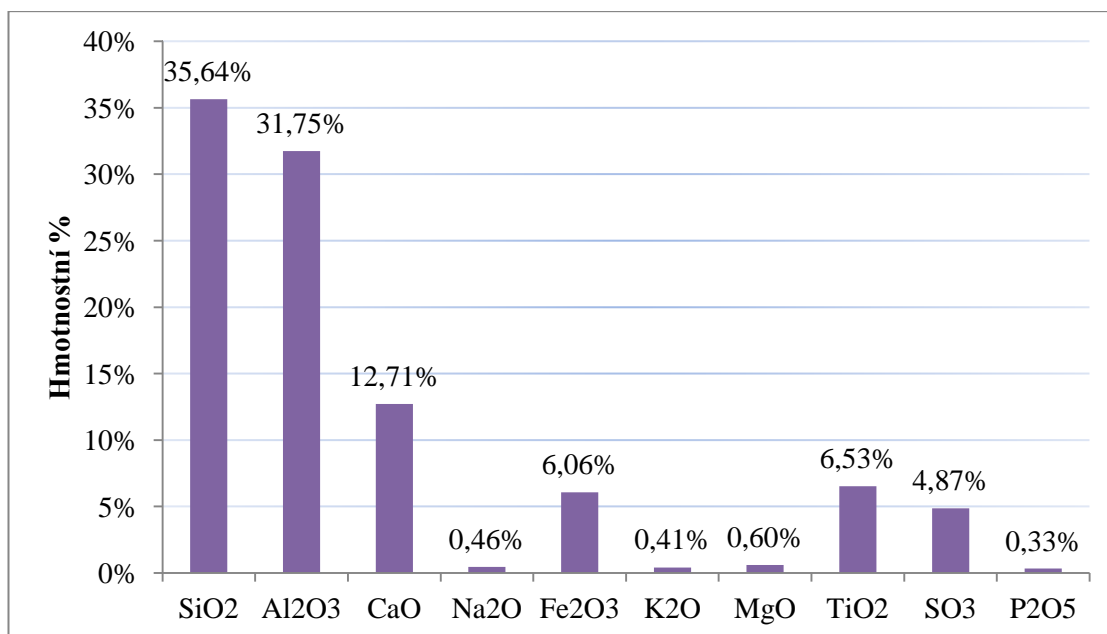
Granulometrie popílku ETH 10 a jeho mletí jsou v Graf 3.8.

**ETH 20** je směs ve formě velmi jemného šedého prášku, složená z fluidních úletových popílků z kotlů FK11 a FK12 [33]. Hmotnostní rozložení složek popílku ETH 20 zaokrouhlené na dvě desetiny procenta je uvedeno v Tab. 3.2 a Graf 3.2.



ETH 20 8.4.2015 [%]									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
35,64%	31,75%	12,71%	0,46%	6,06%	0,41%	0,60%	6,53%	4,87%	0,33%

Tab. 3.2 – Prvkové složení popílku Tisová ETH 20 z 8. 4. 2015



Graf 3.2 – Prvkové složení popílku Tisová ETH 20 z 8. 4. 2015

Dle provedené RFA zkoušky jsou v množství větším než 30 % obsaženy SiO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, které v součtu tvoří 67,39 %. ETH 20 obsahuje oproti ETH 10 menší množství CaO, ne však natolik, aby nemělo vliv na chování a vlastnosti popílku [20].

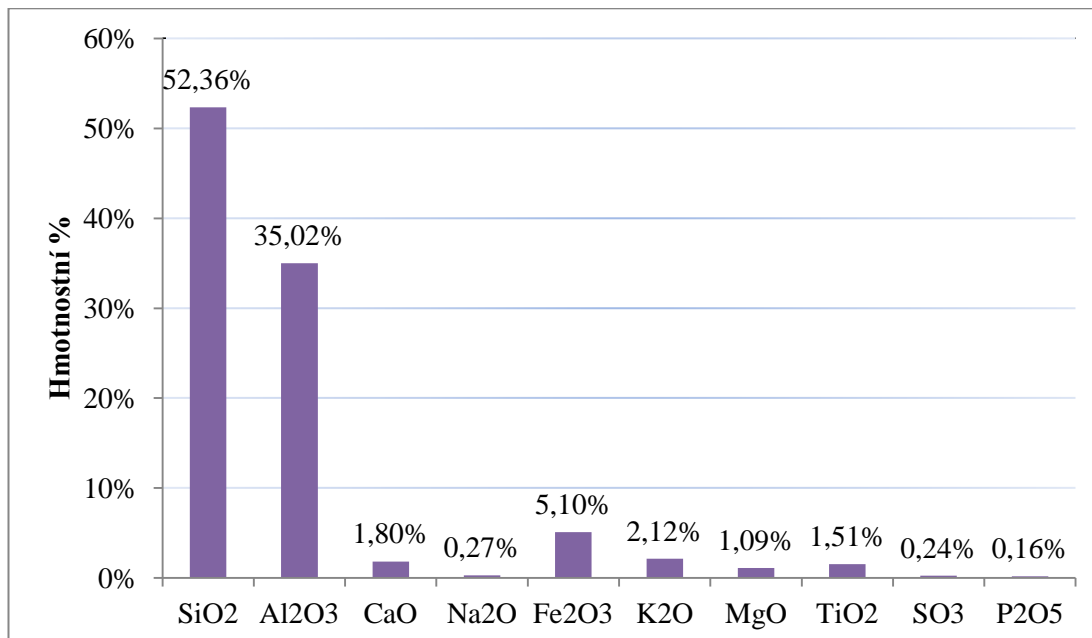
Z důvodu negativního vlivu SO<sub>3</sub> vymezují normy jeho množství pro použití do betonu zpravidla na hodnotu 3 – 5 % [34]. VETH 20 je SO<sub>3</sub> obsažen v množství 4,87 %, čímž je jeho využitelnost v tomto ohledu reálnější než u ETH 10. ETH 20, shodně s druhým zkoumaným popílkem z elektrárny Tisová, obsahuje vyšší množství TiO<sub>2</sub>, konkrétně 6,53 %. Více než pět procent je v obsahu ještě zastoupen Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Zbylé oxidy jsou obsaženy v množství menším než 1 %.

Granulometrie popílku ETH 20 a jeho mletí jsou v Graf 3.9.

**EPC Silo A** je směs ve formě velmi jemného šedého prášku, složená z úletového vysokoteplotního popílku, který je tvořen směsí ze sekce 1, sekce 2 a sekce 3 elektrárny Počerady [33]. Pro zkoušky byl použit odběr z 27. 2. 2015. Hmotnostní rozvrstvení složek popílku EPC Silo A zaokrouhlené na dvě desetiny procenta uvádějí Tab. 3.3 a Graf 3.3.

Počerady Silo A 27. 2. 2015 [%]									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
52,36%	35,02%	1,80%	0,27%	5,10%	2,12%	1,09%	1,51%	0,24%	0,16%

Tab. 3.3 – Prvkové složení popílku Počerady-Silo A z 27. 2. 2015



Graf 3.3 – Prvkové složení popílku Počerady-Silo A z 27. 2. 2015

Počeradský popílek EPC je oproti dvěma zkoumaným popílkům z elektrárny Tisová popílkem klasickým vysokoteplotním. Proto je jeho složení z důvodu rozdílného technologického procesu spalování do značné míry odlišné.

Klasické popílky jsou přibližně z 80% tvořeny oxidem křemičitým a oxidem hlinitým [11]. EPC Silo A je z 52,36% složen z SiO<sub>2</sub> a z 35,02 % z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, čímž odpovídá běžnému složení klasických vysokoteplotních popílků. Nízké množství CaO a SO<sub>3</sub> je u EPC způsobeno absencí procesu upravujícím emisní zátěž. Oxid železitý tvoří 5,10 % popílku EPC. Zbylé oxidy jsou zastoupeny v množství okolo 2% a méně. Na rozdíl od popílků z Tisové zde nejsou patrné nadměrné hodnoty obsahu TiO<sub>2</sub>.

### 3.1.2 Pojivo – SORFIX

Kromě tří popsaných popílků probíhala měření i na dvou různě mletých směsích s názvem SORFIX (dále také jako SFX I). Tyto směsi byly tvořeny popílkem z Tisové, popílkem z Počerad a hydroxidem vápenatým v pevně stanoveném poměru tak, aby množství Ca(OH)<sub>2</sub> představovalo 15% součtu hmotností obou popílků.

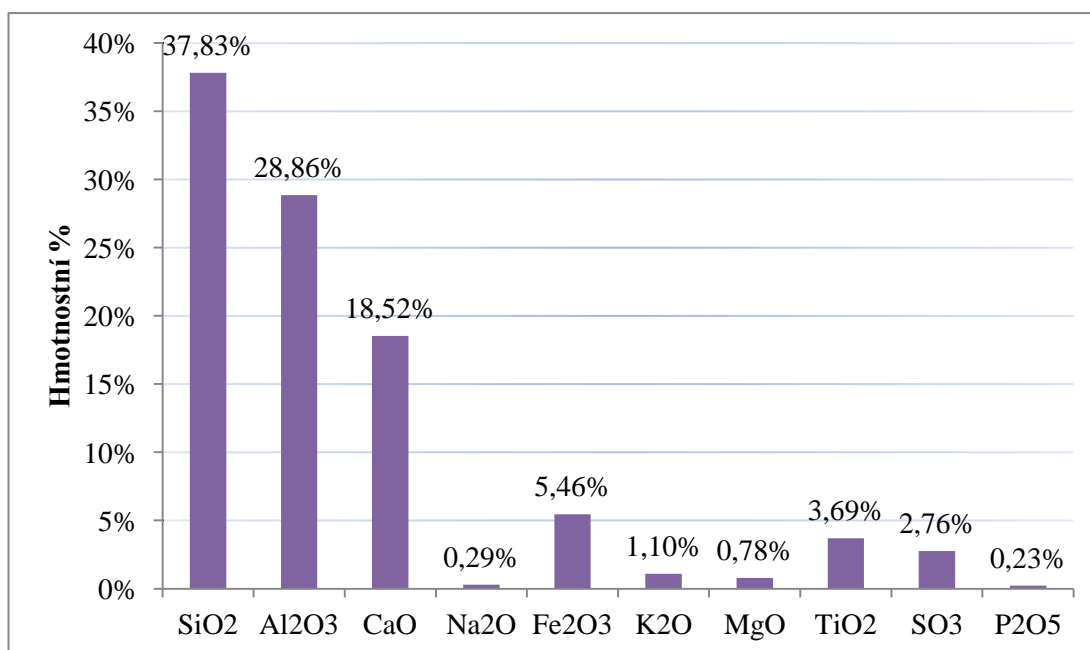
**SORFIX I** se složením (navážka před homogenizací mletím):

- 2,174 kg ETH 20 z 8. 4. 2015
- 2,174 kg EPC Silo A z 27. 2. 2015
- 0,652 kg Ca(OH)<sub>2</sub>

Hmotnostní zastoupení složek směsi SORFIX I zaokrouhlené na dvě desetiny procenta uvádějí Tab. 3.4 a Graf 3.4.

SFX I [%]									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
37,83%	28,86%	18,52%	0,29%	5,46%	1,10%	0,78%	3,69%	2,76%	0,23%

Tab. 3.4 – Prvkové složení SORFIX I



Graf 3.4 – Prvkové složení SORFIX I

Chemické složení směsi SORFIX I je ovlivněno jejími složkami, které představují klasický vysokoteplotní popílek EPC, fluidní popílek ETH 20 a hydroxid vápenatý. Logicky je tedy odůvodnitelné vyšší množství CaO než u samostatných popílků, což se projevilo zejména úbytkem procentuálního zastoupení SiO<sub>2</sub>a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Množství SO<sub>3</sub> je relativně nižší, takže se dá předpokládat i menší riziko objemových změn při případném přidání do betonové směsi. Oxid železitý tvoří stejně jako u samostatných popílků přibližně 5% hmotnosti. Ostatní oxidy jsou zastoupeny v malém množství.

Granulometrie pojiva SFX I a jeho mletí jsou v Graf 3.10.

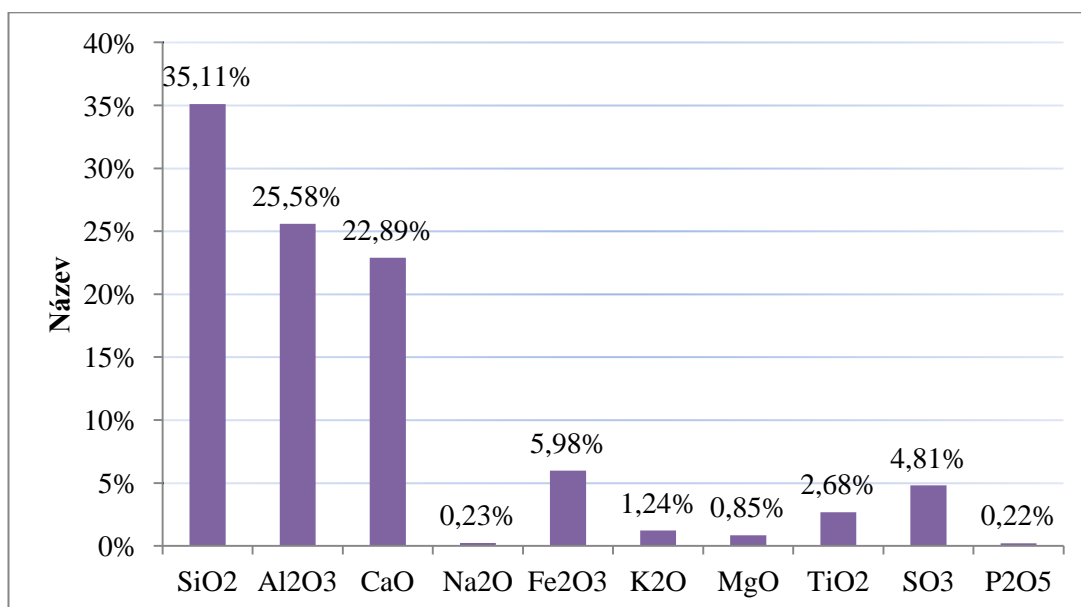
**SORFIX II** se složením (navážka před homogenizací mletím):

- 2,174 kg ETH 10 z 9. 3. 2015
- 2,174 kg EPC Silo A z 27. 2. 2015
- 0,652 kg Ca(OH)<sub>2</sub>

Hmotnostní zastoupení složek směsi SORFIX II zaokrouhlené na dvě desetiny procenta uvádějí Tab. 3.5 a Graf 3.5.

SFX II [%]									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
35,11%	25,58%	22,89%	0,23%	5,98%	1,24%	0,85%	2,68%	4,81%	0,22%

Tab. 3.5 – Prvkové složení SORFIX II



Graf 3.5 – Prvkové složení SORFIX II

SORFIX II obsahuje ze všech zkoumaných popílků a směsí největší množství CaO, které je dokonce srovnatelné s množstvím Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Shodně se všemi ostatními popílků je i u SORFIX II nejvíce zastoupen oxid křemičitý. Přibližně stejné v porovnání s ostatními popílků je i množství Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Necelých 5% SO<sub>3</sub> dělá ze směsi SORFIX II dle norem možnou přísadu do betonu [34]. Ostatní oxidy tvoří procentuelně jen malou část směsi.

Granulometrie pojiva SFX II a jeho mletí jsou v Graf 3.11.

### 3.1.3 Aktivátor – hydroxid vápenatý

**Hašené vápno** bylo z lokality Čertovy schody, pod firemním označením CL 90-S. V obchodních řetězcích známé pod názvem Čert'ák. Vzorky byly vyrobeny ze dvou odběrů stejné šarže. S následujícími vlastnostmi podle EN 459-1:2010 (Tab. 3.6).

Složení hašeného vápna z lomu Čertovy schody			
CaO+MgO	MgO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
> 90%	< 5%	< 4%	< 2%

Tab. 3.6 – Prvkové složení hašeného vápna z lokality Čertovy schody [35]

### 3.1.4 Přísady

**Glenium ACE 40** je tekutý superplastifikátor na bázi polykarboxylátetheru od výrobce BASF. Doporučené dávkování pro cementové betony je 0,6 – 1% hmotnosti cementu. Dávkování je dále závislé na mnoha faktorech, jedním z nich je požadovaná zpracovatelnost [36]. Pro výrobu zkušebních těles bylo primárními vlastnostmi získání dobré konzistence bez charakteristické lepidlosti. Tohoto efektu lze částečně dosáhnout i přidáním vody, ale tím se zvyšuje vodní součinitel  $w/c$  a tím pádem snižuje výsledná pevnost. Množství bylo dávkováno objemovým procentem v množství podle dané receptury. [31]

### 3.1.5 Plnivo

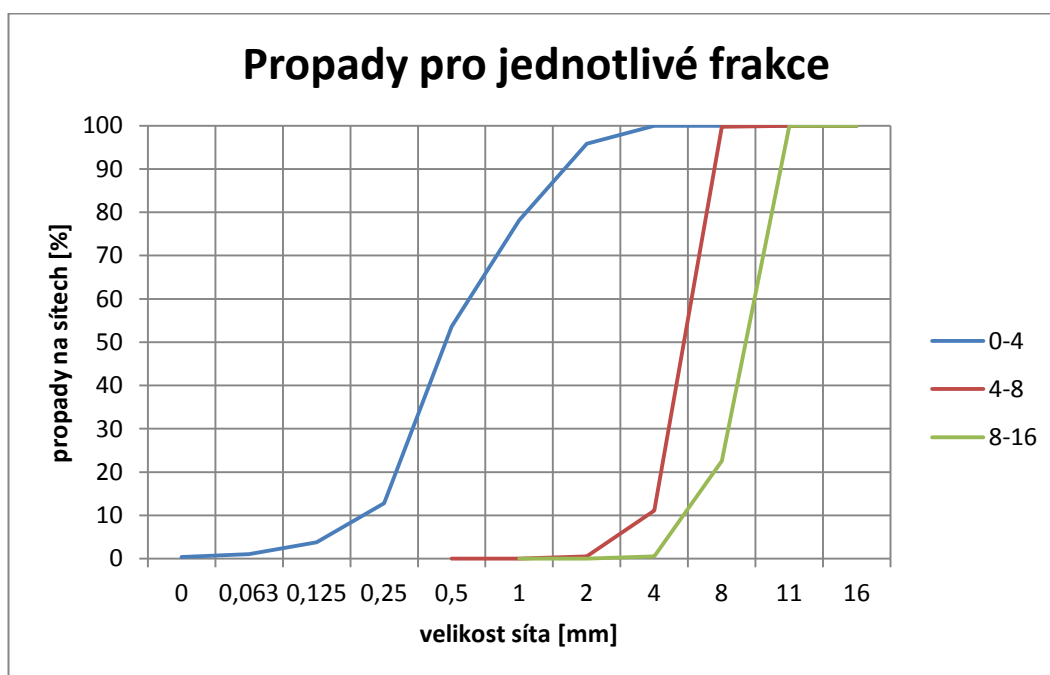
Jako plniva bylo použito kamenivo z lokalit Dobříň a Zbraslav.

#### Dobříň + Zbraslav

- Frakce 0/4 - těžené prané kamenivo z pískovny Dobříň
- Frakce 4/8 - drcené kamenivo z kamenolomu Zbraslav
- Frakce 8/16 - drcené hrubé kamenivo z kamenolomu Zbraslav

velikost síta	Frakce - propady			Frakce - zbytky na sítích		
	0-4	4-8	8-16	0-4	4-8	8-16
	[mm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
<b>0</b>	0,35	0	0	1,04	0	0
<b>0,063</b>	1,04	0	0	2,77	0	0
<b>0,125</b>	3,81	0	0	8,99	0	0
<b>0,25</b>	12,8	0	0	40,83	0	0
<b>0,5</b>	53,63	0	0	24,57	0,05	0
<b>1</b>	78,2	0,05	0	17,65	0,48	0,05
<b>2</b>	95,85	0,53	0,05	4,15	10,6	0,48
<b>4</b>	100	11,13	0,53	0	88,63	22
<b>8</b>	100	99,76	22,53	0	0,24	77,47
<b>11</b>	100	100	100	0	0	0
<b>16</b>	100	100	100	0	0	0
suma	100	100	100	100	100	100

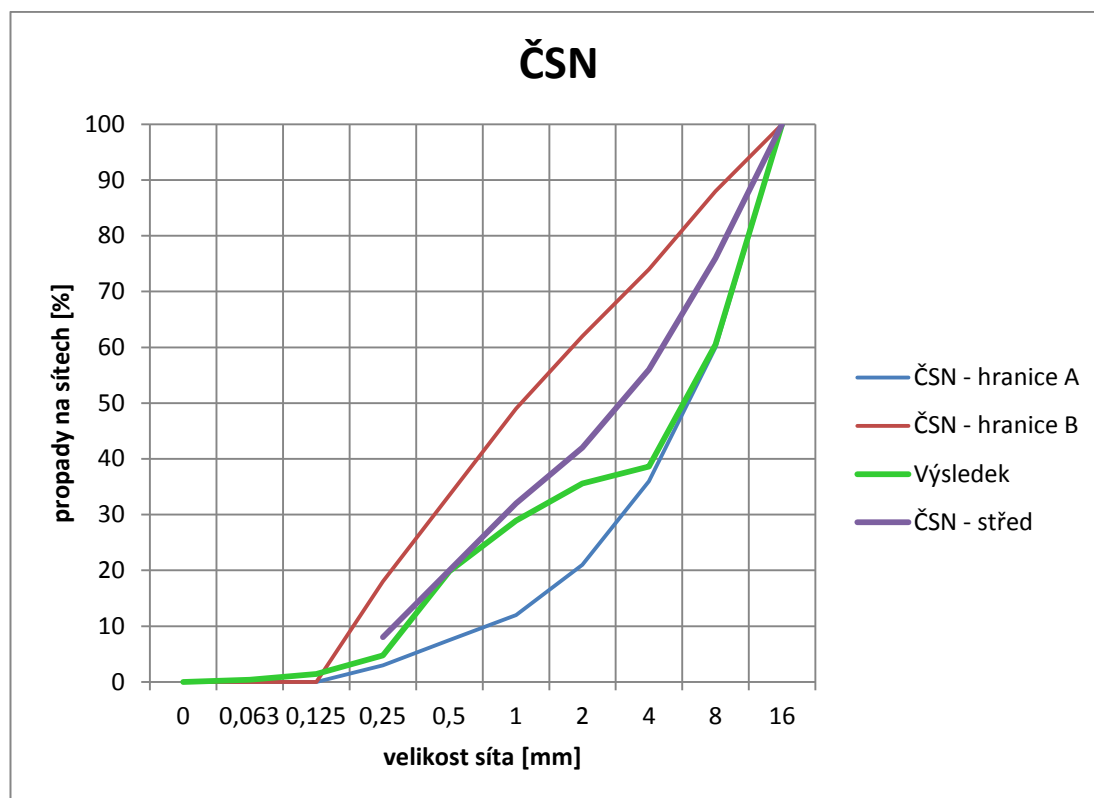
Tab. 3.7 – Hodnoty výsledků síťového rozboru kameniva Dobříň + Zbraslav



Graf 3.6 – Propady jednotlivých frakcí kameniva z lokality Dobříň + Zbraslav

Jak je patrné z Graf 3.6, všechny frakce kameniva Dobříň a Zbraslav mají dobré granulometrické složení.

Po optimalizaci dávkování jednotlivých frakcí vypadá zrnitostní křivka následovně:



Graf 3.7 – Zrnitostní křivka výsledného dávkování kameniva z lokality Dobříň+Zbraslav

### 3.1.6 Voda

Byla použita pitná voda z vodovodního řadu, stáčená na VŠCHT v Praze, která dle ČSN EN 1008 vyhovuje do betonu jako voda záměsová i bez potřeby provedení průkazných zkoušek. Dávkováno bylo objemovým procentem na popílek a to předem určeným programem receptury. V případě, že toto plánované množství nebylo dostatečné, další voda se přidávala dle vizuálního stavu míchané směsi.

## 3.2 Výroba vzorků

Výroba vzorků probíhala díky spolupráci s VŠCHT v laboratořích ústavu skla a keramiky na VŠCHT. Avšak příprava pojiv mletím byla prováděna v Experimentálním centru Českého vysokého učení technického v Praze.

### 3.2.1 Mletí

- **Popis kulového mlýna**

Popílký a směsi sorfixů byly umlety pomocí bubnového kulového mlýna poskytnutého společností ČEZ Energetické produkty s.r.o. Konkrétně se jednalo o Omílací buben OM 20f (Obr. 3.1). Kulový mlýn byl v laboratoři Experimentálního

centra uložen do speciálního protihlukového boxu, který zajistil snížení hluchnosti při mletí.



Obr. 3.1 – Omlací buben OM 20f

Buben je poháněn elektromotorem přes převodovku a je chráněn plechovou konstrukcí a bezpečnostním krytem z přední strany pro snížení rizika zranění obsluhy. Buben je řízen elektrickým panelem PLC. Ve spodní části je plechový skluz a pod ním nádoba k vyjmutí umletého materiálu. Součástí jsou dva uzavírací segmenty. Plný pro mletí vzorku a děrovaný pro jeho vymílání.

Mlecí náplň bubnu představují ocelové koule různých průměrů o celkové hmotnosti 90 kg v následujícím složení:

- koule Ø 17 mm – 50 kg
- koule Ø 30 mm – 20 kg
- koule Ø 50 mm – 20 kg [20]

#### • Příprava a mletí vzorků

Popílky byly poskytnuty v papírových pytlích a přesypány do plastových barelů nebo byly v těchto plastových sudech rovnou dovezeny z jednotlivých elektráren (Tisová, Počerady). Pomocí půlkruhové plechové lopatky byly odebrány



vzorky pro mletí. Jejich velikost byla určena na 5 kg, což odpovídá doporučené hodnotě v návodu k omílacímu bubnu. Zvážení vzorků bylo provedeno na digitálních vahách, přesnost hmotnosti odebraného vzorku byla  $\pm 2,0$  g.

Jednotlivé vzorky byly vsypány do bubnu a uzavřeny pomocí plného segmentu. Na dotykovém panelu se nastavila doba a otáčky mletí. „Otáčky mlýna byly při mletí nastaveny pro všechny vzorky na stejnou hodnotu – 45 otáček/min – což představuje optimální hodnotu udanou výrobcem omílacího bubnu“ [20]. Pozorováním reálné hodnoty otáček na dotykovém panelu PLC v průběhu mletí bylo zjištěno, že otáčky nabývají hodnot cca o 3,7 – 4,0% vyšších (tzn. 46,65 – 46,80 otáček/min), než jaké byly nastaveny.

U každého popílku probíhalo mletí různou dobu při zachování konstantních otáček. Po uplynutí mlecího času proběhla výměna plného segmentu za děrovaný a zahájilo se vymílání. Umletý popílek se tím vysypal do spodní nádoby mlýna a byl znovu zvážen. Poté byl vzorek vsypán do plastového barelu, popsán a uchován tak pro výrobu zkušebních těles.

Celkem ve čtyřech várkách se z každého popílku připravilo cca 20kg pojiva dané jemnosti. U směsí SORFIX to bylo 5kg pro každou jemnost viz. Tab. 3.8 – Hodnoty mletí pojiv.

- **Vymílání vzorků**

Otáčky mlýna při vymílání byly pro všechny vzorky nastaveny na hodnotu 20 otáček/min. Reálně se hodnoty pohybovaly na 21 otáček/min tedy o cca 5,0% výše. Čas pro vymletí byl stanoven na 15 minut. Hodnoty vymletí nabývali u první várky nižších hodnot pravděpodobně v důsledku prázdného bubnu po vyčištění viz. Tab. 3.8 – Hodnoty mletí pojiv.

- **Čištění omílacího bubnu**

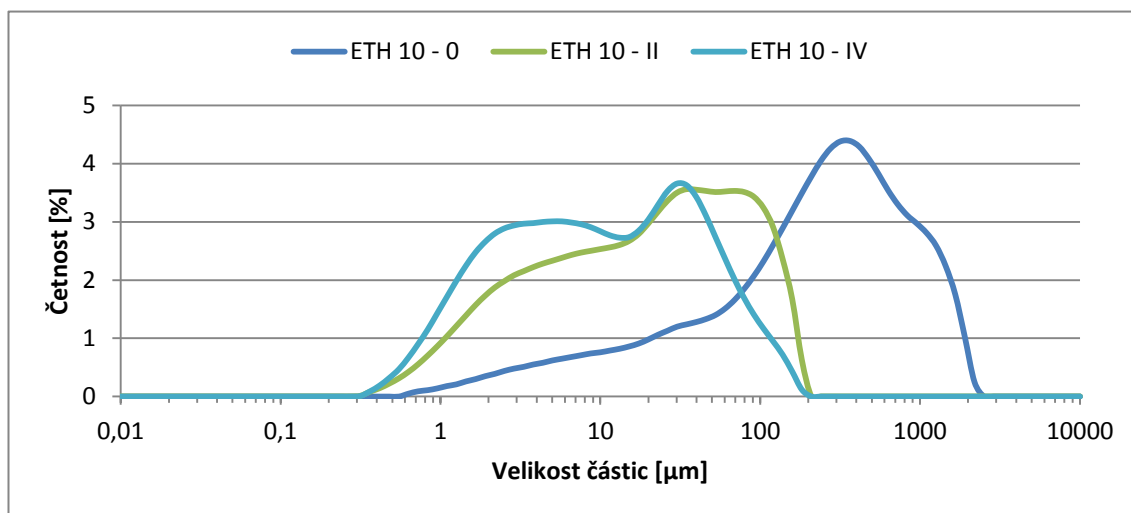
Před zahájením mletí nového druhu pojiva bylo vždy nejprve provedeno čištění omílacího bubnu, a to jak z vnějšku (důkladným zametením podlahy a ořtením vnějších částí mlýna) tak z vnitřku (mletím jedné “čistící“ dávky popílku, který v programu mletí následoval).

Před prvním mletí ETH 10 proběhlo vyčištění omílacího bubnu popílkem ETH 10 takto:

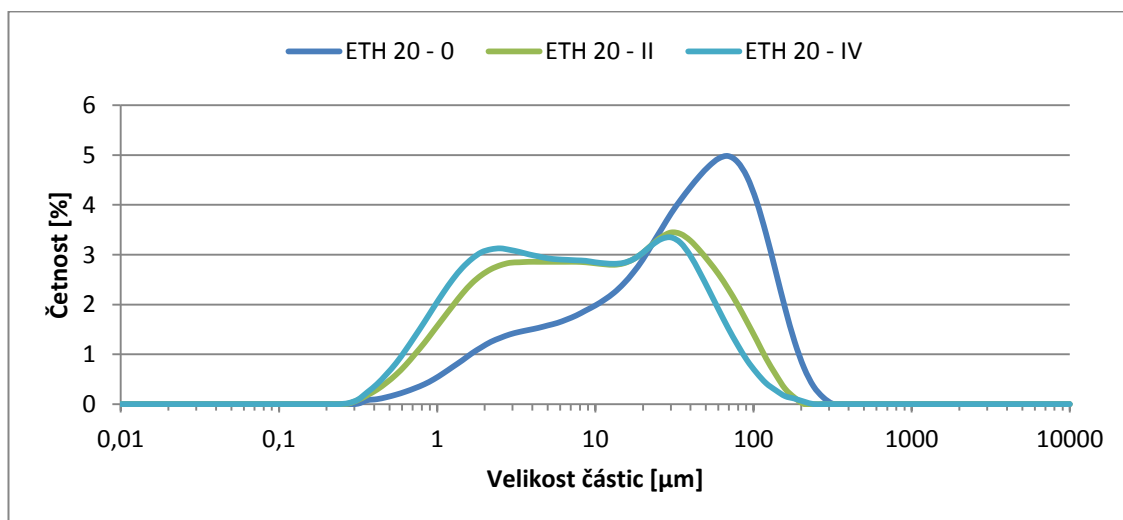
- 60 minut mletí (45 otáček/min), 45 minut vymílání (20 otáček/min), 5000 g

Před prvním mletí ETH 20 a obou SORFIXů proběhlo vyčištění stejně. Čištění mezi jednotlivými jemnostmi mletí proběhlo formou 60 minutového vymílání (20 otáček/min).

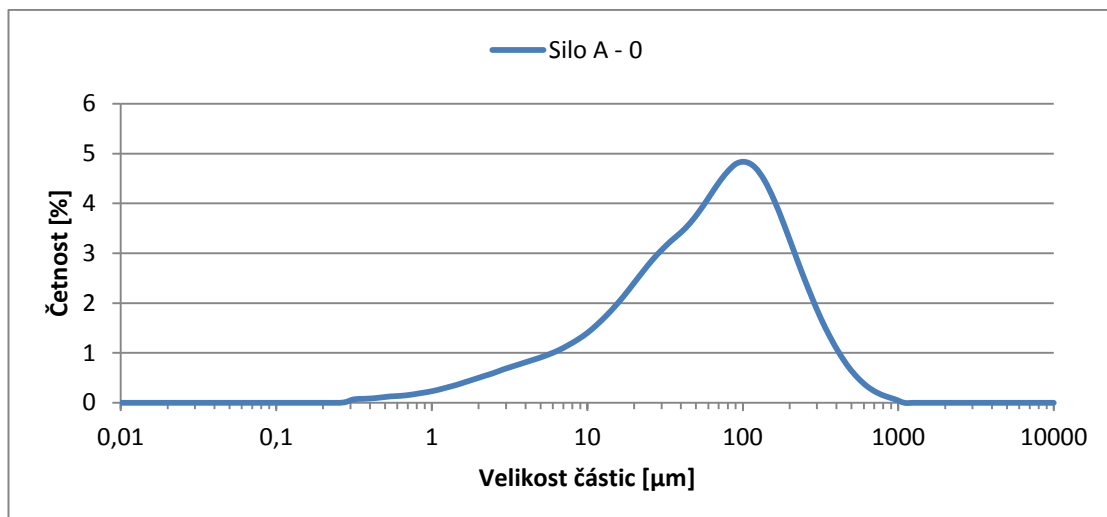
Následují grafy granulometrií jednotlivých popílků a pojivových směsí různého mletí:



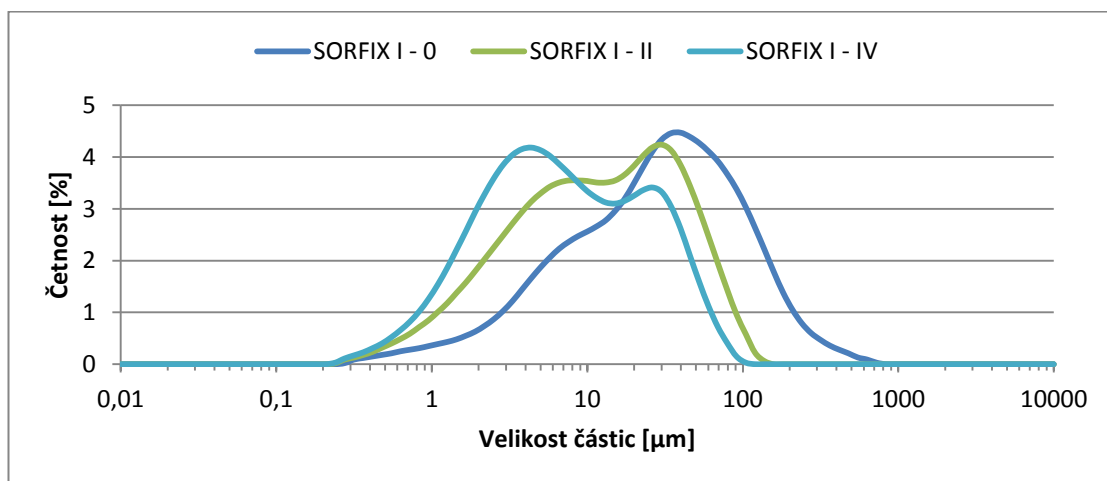
Graf 3.8 – Rozdělení velikosti částic –zastoupení frakcí –ETH 10



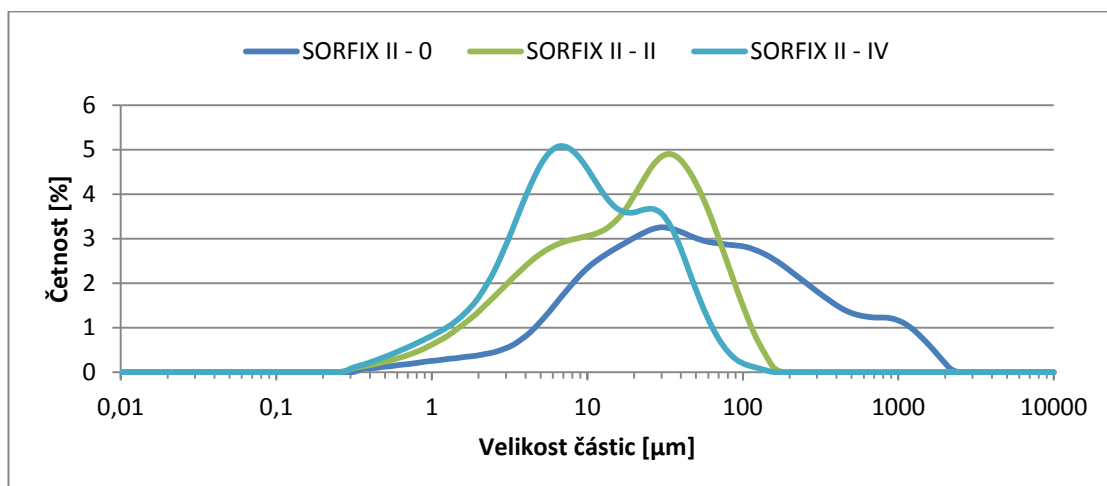
Graf 3.9 – Rozdělení velikosti částic –zastoupení frakcí –ETH 20



Obr. 3.2 – Rozdělení velikosti částic –nemleté frakce –EPC Silo A



Graf 3.10 – Rozdělení velikosti částic –zastoupení frakcí –SFX I



Graf 3.11 – Rozdělení velikosti částic –zastoupení frakcí –SFX II

Nastavené ot.	[ot/min]	konst. = 45				20	konst. = 45				20
Označení	-	II				-	IV				-
Čas	[min]	15				60	45				60
Várka	číslo	1	2	3	4	Vyčištění	1	2	3	4	Vyčištění
<b>ETH 10</b>											
Hm. před mletím	[g]	5000,0	5001,0	5000,5	5000,5	169,0	5000,0	5000,5	5000,0	5000,0	126,0
Hm. po mletí	[g]	4860,0	4987,5	4991,0	4994,5	165,0	4897,5	4977,5	5003,5	4996,0	130,0
Zbytky	[g]	140,0	13,5	9,5	6,0	4,0	102,5	23,0	-3,5	4,0	-4,0
Reálné otáčky	[ot/min]	46,65	46,80	46,70	46,75	-	46,65	46,70	46,65	46,70	-
<b>ETH 20</b>											
Hm. před mletím	[g]	5000,5	5000,5	5000,5	5000,0	60,5	5001,0	5000,0	5000,0	5000,0	51,5
Hm. po mletí	[g]	4941,5	5010,5	4973,0	5016,0	123,0	4870,0	5010,0	5018,0	5051,5	88,5
Zbytky	[g]	59,0	-10,0	27,5	-16,0	-62,5	131,0	-10,0	-18,0	-51,5	-37,0
Reálné otáčky	[ot/min]	46,75	46,70	46,75	46,65	-	46,75	46,65	46,70	46,65	-
<b>SORFIX I</b>											
Hm. před mletím	[g]	5000,0	-	-	-	43,0	5000,0	-	-	-	53,0
Hm. po mletí	[g]	4957,0	-	-	-	22,5	4947,0	-	-	-	68,0
Zbytky	[g]	43,0	-	-	-	20,5	53,0	-	-	-	-15,0
Reálné otáčky	[ot/min]	46,65	-	-	-	-	46,70	-	-	-	-
<b>SORFIX II</b>											
Hm. před mletím	[g]	5000,0	-	-	-	39,5	5000,0	-	-	-	21,0
Hm. po mletí	[g]	4960,5	-	-	-	42,0	4979,0	-	-	-	34,5
Zbytky	[g]	39,5	-	-	-	-2,5	21,0	-	-	-	-13,5
Reálné otáčky	[ot/min]	46,70	-	-	-	-	46,65	-	-	-	-

Tab. 3.8 – Hodnoty mletí pojiv

### 3.2.2 Složení sérií

Přesné složení s váhami jednotlivých složek v sériích je uvedeno v protokolech z výroby. Níže bylo přistoupeno k utřídění sérií do skupin podle složení s navzájem vypovídající, porovnatelnou hodnotou.

- **Rozdílná doba mletí a hlavního druhu popílku**

#### **ETH 10**

- **mletí 0** Série B-FPC č.: 59, 61, 68, 69
- **mletí II** Série B-FPC č.: 64, 65, 66, 67
- **mletí IV** Série B-FPC č.: 57, 60, 62, 63

#### **ETH 20**

- **mletí 0** Série B-FPC č.: 78, 79, 80, 81
- **mletí II** Série B-FPC č.: 70, 71, 72, 73
- **mletí IV** Série B-FPC č.: 74, 75, 76, 77

#### **SORFIX I**

- **mletí II** Série B-FPC č.: 83
- **mletí IV** Série B-FPC č.: 82

#### **SORFIX II**

- **mletí II** Série B-FPC č.: 85
- **mletí IV** Série B-FPC č.: 84

### 3.2.3 Průběh výroby

Složky jednotlivých směsí byly vždy váženy na váze DIGI DS-500 s přesností na celé gramy. Voda byla odměřována v odměrném válci s přesností na 10 ml. K míchání všech směsí byla použita míchačka RUBIMIX-50-N. Během celého pracovního postupu byly zaznamenávány časové údaje průběhu výroby a k nim bezkontaktním ručním teploměrem GMTL1826 teploty prostředí a směsi.

Pracovní postup pro série B-FPC 57 - 85 byl následující:

- 1) Odvážená dávka všech frakcí kameniva
- 2) Míchání s přidáním smáčecí vody
- 3) Přidání odvážené dávky pojiv (popílků) a případně vápna

- 4) Míchání s přidáním záměsové vody a následným přidáním Glénia ACE40
- 5) Případné přidání vody pro lepší konzistenci
- 6) Plnění forem (100x100x100 mm) a následné vibrování

Po cca minutovém vibrování na přístroji VSB-40 se veškeré vzorky označily popsáním a navlhčeným filtračním papírem. Následně se formy se vzorky zakryly igelitem, aby nedocházelo k příliš rychlému vysychání a možnému smrštění od vysychání viz. Obr. 3.5. Série se nechaly týden zrát ve formě a poté se odbednily. Všechny série se podařilo v pořádku odbednit až na série B-FPC 69 a 77, které špatným zhutněním v důsledku své rozdílné konzistence, vykazovaly v několika případech poruchy povrchu a pravděpodobně i struktury. U řídké série B-FPC 69 se jednalo o nadměrné zhutnění a pravděpodobné sesednutí kameniva viz. Obr. 3.3. U série B-FPC 77 se jednalo o nedostatečné zhutnění. Odbedněné vzorky byly umístěny v regále laboratoře.



*Obr. 3.3 – Porušený povrch krychle ze série B-FPC 69*



*Obr. 3.4 – Porušený povrch krychle ze série B-FPC 77*



*Obr. 3.5 – Uložení vzorků čerstvých sérií*

### 3.2.4 Konzistence

Přestože je většina směsí chemicky skoro totožná, vznikaly rozdíly v konzistenci. Velký vliv na konzistenci měla jemnost mletí.

Kvůli časové náročnosti a lepivosti popílkových betonů bylo upuštěno od zkoušky sednutí kužele. Konzistence proto byla popsána slovy a podložena hodnotami vodního součinitele.

**B-FPC 57:** Směs bych popsal jako vazkou až tekutou. Po vytvoření brázdy lžící se směs po cca 4 sekundách slila zpět do jedolité plochy. Směs hodnotím jako velmi dobře zpracovatelnou.

**B-FPC 58:** Směs měla běžnou sušší konzistenci betonu, zpracovatelnost vibrací po dobu 2 minuty a ke konci dusáním. Pro praktické využití by pravděpodobně obstála.

**B-FPC 59:** Směs bych popsal jako vazkou až tekutou. Po vytvoření brázdy lžící se směs po cca 2 sekundách slila zpět do jedolité plochy. Směs hodnotím jako velmi dobře zpracovatelnou.

**B-FPC 60:** Směs byla velmi řídká až tekutá. Po vytvoření brázdy lžící se směs ihned slila zpět do jedolité plochy. Směs hodnotím jako velmi dobře zpracovatelnou.

**B-FPC 61:** Směs byla relativně tekutá. Po vytvoření brázdy lžící se směs slila po cca 5 sekundách, po brázdě zůstal žlábek. Směs hodnotím jako normálně zpracovatelnou.

**B-FPC 62:** Směs byla poměrně suchá. Zpracovatelnost vibrací po dobu 2 minuty a ke konci dusáním. Pro praktické využití by se nacházela na hraně zpracovatelnosti.

**B-FPC 63:** Směs byla extrémně řídká až tekutá. Po vytvoření brázdy lžící se směs ihned slila zpět do jedolité plochy. K ukládání betonové směsi do forem muselo být použito fanky. Směs hodnotím jako velmi dobře zpracovatelnou.

**B-FPC 64:** Směs měla běžnou sušší konzistenci betonu. Popsal bych ji jako lepidlo na obklady. Zpracovatelnost vibrací po dobu 1,5 minuty a ke konci dusáním. Pro praktické využití by pravděpodobně obstála.



**B-FPC 65:** Směs bych popsal jako vazkou až tekutou. Po vytvoření brázdy lžící se směs po cca 2 sekundách slila zpět do jedolité plochy. Směs hodnotím jako velmi dobře zpracovatelnou.

**B-FPC 66:** Směs byla velmi řídká až tekutá. Po vytvoření brázdy lžící se směs ihned slila zpět do jedolité plochy. Směs hodnotím jako velmi dobře zpracovatelnou.

**B-FPC 67:** Směs měla běžnou sušší konzistenci betonu. Zpracovatelnost vibrací po dobu 1,5 minuty a ke konci dusáním. Pro praktické využití by pravděpodobně obstála.

**B-FPC 68:** Směs měla běžnou sušší konzistenci betonu. Zpracovatelnost vibrací po dobu 1,5 minuty a ke konci dusáním. Pro praktické využití by pravděpodobně obstála.

**B-FPC 69:** Směs byla relativně tekutá. Po vytvoření brázdy lžící se směs slila po cca 8 sekundách, po brázdě zůstal žlábek. Směs hodnotím jako normálně zpracovatelnou.

**B-FPC 70:** Směs měla běžnou sušší konzistenci betonu, přirovnal bych jí k čokoládové šlehačce. Zpracovatelnost vibrací po dobu 2 minut. Pro praktické využití by obstála.

**B-FPC 71:** Směs bych popsal jako vazkou až tekutou. Po vytvoření brázdy lžící se směs po cca 3 sekundách slila zpět do jedolité plochy. Směs hodnotím jako velmi dobře zpracovatelnou.

**B-FPC 72:** Směs měla běžnou sušší konzistenci betonu. Zpracovatelnost vibrací po dobu 1,5 minuty a ke konci dusáním. Pro praktické využití by pravděpodobně obstála.

**B-FPC 73:** Směs bych popsal jako tekutou. Po vytvoření brázdy lžící se směs po cca 2 sekundách slila zpět do jedolité plochy. Směs hodnotím jako velmi dobře zpracovatelnou.

**B-FPC 74:** Směs měla normální konzistenci betonu. Nebyla ani suchá ani tekutá, přirovnal bych jí k řeckému jogurtu. Byla to pravděpodobně nejlepší konzistence, které se dosud podařilo dosáhnout.

**B-FPC 75:** Směs bych popsal jako vazkou až tekutou. Po vytvoření brázdy lžící se směs po cca 3 sekundách slila zpět do jedolité plochy. Směs hodnotím jako velmi dobře zpracovatelnou.

**B-FPC 76:** Směs měla běžnou sušší konzistenci betonu. Zpracovatelnost vibrací po dobu 1,5 minuty a ke konci dusáním. Pro praktické využití by pravděpodobně obstála.

**B-FPC 77:** Směs byla velmi řídká až tekutá. Po vytvoření brázdy lžící se směs ihned slila zpět do jedolité plochy. Směs hodnotím jako velmi dobře zpracovatelnou.

**B-FPC 78:** Směs byla před přidáním vody pro lepší konzistenci absolutně nezpracovatelná (stále sypká). Po přidání vody měla běžnou sušší konzistenci betonu. Zpracovatelnost vibrací po dobu 2 minut a ke konci dusáním.

**B-FPC 79:** Směs měla běžnou sušší konzistenci betonu. Zpracovatelnost vibrací po dobu 1,5 minuty a ke konci dusáním. Pro praktické využití by pravděpodobně obstála.

**B-FPC 80:** Směs byla před přidáním vody pro lepší konzistenci absolutně nezpracovatelná (stále sypká). Po přidání vody měla běžnou sušší konzistenci betonu. Zpracovatelnost vibrací po dobu 1,5 minuty a ke konci dusáním.

**B-FPC 81:** Směs měla běžnou sušší konzistenci betonu. Zpracovatelnost vibrací po dobu 1,5 minuty a ke konci dusáním. Pro praktické využití by pravděpodobně obstála.

**B-FPC 82:** Směs měla normální konzistenci betonu. Nebyla ani suchá ani tekutá, ideálně k nahazování. Zpracování vibrací po dobu 0,75 minuty. Byla to pravděpodobně nejlepší konzistence, které se dosud podařilo dosáhnout.

**B-FPC 83:** Směs měla normální konzistenci betonu. Nebyla ani suchá ani tekutá. Směs byla o trochu sušší než ta předchozí. Přirovnal bych ji k lepidlu na obklady. Zpracování vibrací po dobu 1 minuty. Směs hodnotím jako dobře zpracovatelnou.

**B-FPC 84:** Směs měla normální konzistenci betonu. Nebyla ani suchá ani tekutá, ideálně k nahazování. Zpracování vibrací po dobu 0,75 minuty.

**B-FPC 85:** Směs měla normální konzistenci betonu. Nebyla ani suchá ani tekutá. Směs byla o trochu sušší než ta předchozí. Přirovnal bych ji k lepidlu na obklady. Zpracování vibrací po dobu 1 minuty. Směs hodnotím jako dobře zpracovatelnou.

Jednotlivým směsím byla podle konzistence přiřazena číselná hodnota od 1 do 10. Jednička pro velmi řídké směsi a 10 pro směsi, do kterých bylo nutno přidat vodu viz. Tab. 3.9. Série B-FPC 58 byla z číselného hodnocení vyřazena, protože její receptura obsahuje výrazně méně záměsové vody.

Série	Hl. pojivo	Vedl. pojiva	Mletí	Konzistence
B-FPC 57	ETH 10	-	IV	4
B-FPC 58	ETH 10	-	IV	-
B-FPC 59	ETH 10	-	0	2
B-FPC 60	ETH 10	EPC+Ca	IV	1,5
B-FPC 61	ETH 10	EPC+Ca	0	4
B-FPC 62	ETH 10	+Ca	IV	8
B-FPC 63	ETH 10	EPC	IV	1
B-FPC 64	ETH 10	-	II	6
B-FPC 65	ETH 10	EPC+Ca	II	2
B-FPC 66	ETH 10	EPC	II	1,5
B-FPC 67	ETH 10	+Ca	II	7
B-FPC 68	ETH 10	+Ca	0	7
B-FPC 69	ETH 10	EPC	0	4,5
B-FPC 70	ETH 20	-	II	6
B-FPC 71	ETH 20	EPC+Ca	II	3
B-FPC 72	ETH 20	+Ca	II	7
B-FPC 73	ETH 20	EPC	II	2
B-FPC 74	ETH 20	-	IV	5
B-FPC 75	ETH 20	EPC+Ca	IV	3
B-FPC 76	ETH 20	+Ca	IV	7
B-FPC 77	ETH 20	EPC	IV	1,5
B-FPC 78	ETH 20	-	0	10
B-FPC 79	ETH 20	EPC+Ca	0	9
B-FPC 80	ETH 20	+Ca	0	10
B-FPC 81	ETH 20	EPC	0	9
B-FPC 82	SFX I	-	IV	5
B-FPC 83	SFX I	-	II	6
B-FPC 84	SFX II	-	IV	5
B-FPC 85	SFX II	-	II	6

Tab. 3.9 – Číselný popis konzistence

### 3.3 Postupy měření

Jelikož normy pro FPC betony neexistují, bylo při prováděných měřeních přihlédnuto k normám ČSN, popisujícím měření na běžných betonech.

#### 3.3.1 Měření pevnosti

Při měření pevnosti bylo přihlédnuto k aktuálně platné normě ČSN EN 12390-3 (Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3:Pevnost v tlaku zkušebních těles).

Pevnost se měřila na vzorcích suchého uložení celé sady „A“ a vzorku „B1“ ve stářích 7, 14, 28, 120 dní. A na vzorcích mokrého uložení, konkrétně „B2“, „B3“ a „C1“ ve stářích 14, 28, 120 dní. Vzorky byly nejprve očištěny od drobných zrn písku a případných přečnívajících částí. Poté byly kostky zváženy vahou DIGI DS-500 s přesností na 10g a změřeny posuvným měřítkem na 0,1 mm.

Měření probíhalo z důvodu nedostatečné měřicí stupnice u lisu Werkstoffprüfmaschinen Leipzig 267/56/17 na VŠCHT ještě na lisu v Experimentálním centru ČVUT. Před samotným měřením byla zkontrolována připravenost lisovacích zařízení zejména pak nastavení závaží na hodnotu C u lisu VŠCHT a čistota styčných ploch lisů. Krychle se osadila kolmo na směr plnění do středu spodní tlačné desky. Dotáhla se vrchní část tlačné desky ke vzorku a plynule se začalo zatěžovat do porušení krychle. Následovalo zapsání naměřených údajů do tabulky a posouzení způsobu porušení.

Pevnost v tlaku je dána následujícím vztahem:

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

Kde:  $f_c$  je pevnost v tlaku, v MPa (N/mm<sup>2</sup>)

F - maximální zatížení při porušení, v N

$A_c$  - průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku, vypočítaná, z jmenovité velikosti tělesa, v mm<sup>2</sup> [37]



Obr. 3.6 – „Výbušné porušení“ [37] zkoušky pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3

### 3.3.2 Měření nasákavosti

Při měření nasákavosti bylo přihlédnuto k aktuálně platné normě ČSN EN 13369:2013.

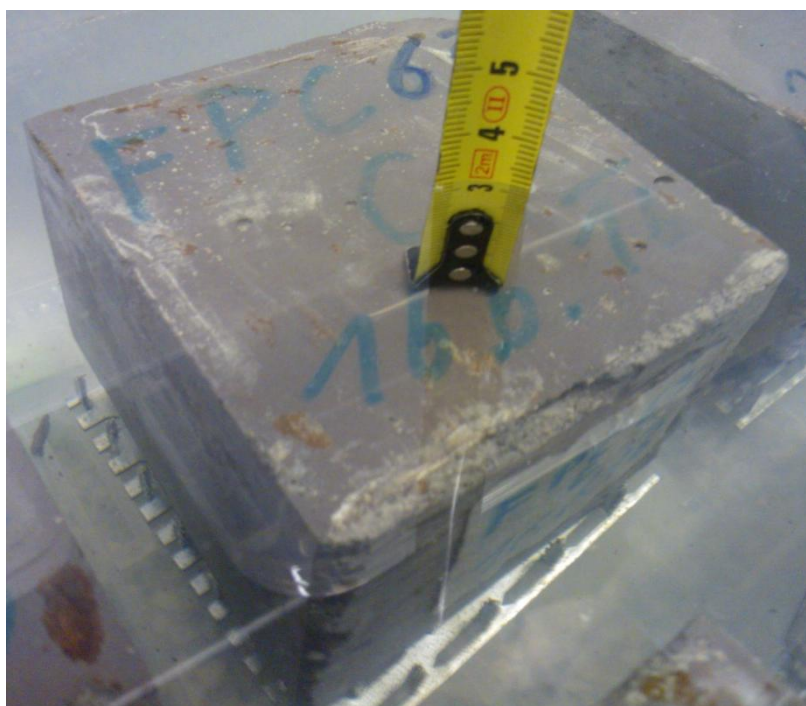
Pro měření nasákavosti byl určen jeden vzorek ze tří, mokře uložené sady C, které dosáhly stáří 90 dní. Vybrané krychle se nejprve očistily a popsaly lihovým fixem. Z důvodu mokrého uložení bylo přistoupeno k obrácenému procesu, než je uveden v normě ČSN EN 13369:2013. Tedy nejprve k sušení a poté namáčení. Vzorky byly vysoušeny sušičkou WTC binder 78532, kde se při  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  vysoušely 14 dní do doby, než byl u všech jejich hmotnostní úbytek v dvou po sobě jdoucích měřeních menší než 0,1%.

Takto se vzorky v suchém stavu znovu očistily, zvažily a uložily s patřičnými rozestupy na nerezavějící Gang-nail podložky do nádoby s pitnou vodou o teplotě okolního prostředí. Vzorky byly zvaženy po první hodině namáčení a poté každých 24 hodin následujícím způsobem. Vzorek byl vyjmut z nádrže a nechala se z něj stéct přebytečná voda, poté se ke všem stranám přiložilo na cca 3 sekundy přibližně šest plátků buničiny. Takto mohl být vzorek umístěn na váhu značky KERN ew s přesností 0,01 g. Naměřený údaj byl zapsán do tabulky a vzorek následně vrácen do

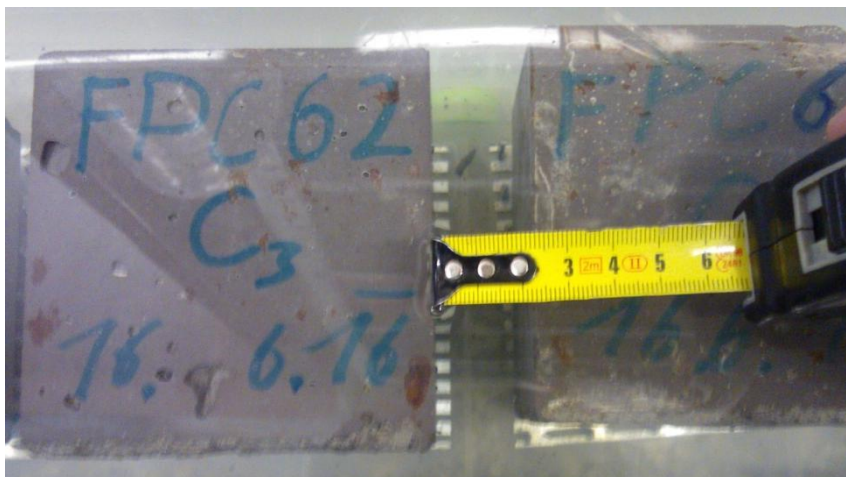
nádrže s vodou. V měření se tímto způsobem pokračovalo po dobu 21 dní, kdy už u všech vzorků dvě po sobě jdoucí měření dosahovala menší změny než 0,1% z hmotnosti vzorku.



Obr. 3.7 – Vysoušení vzorků

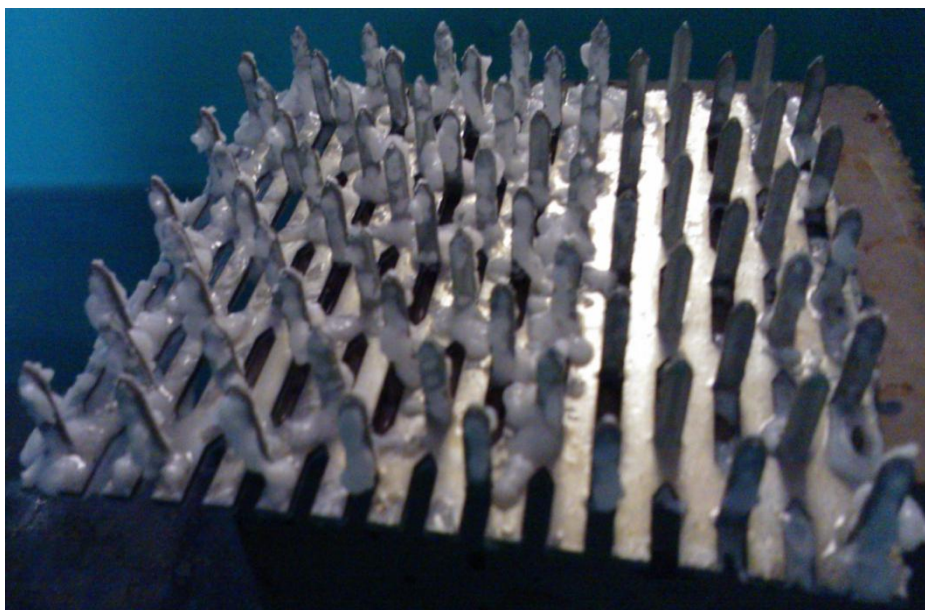


Obr. 3.8 – Zkouška nasákavosti: Dle ČSN min. hladina 2cm (3cm na obr.)



Obr. 3.9 – Zkouška nasákavosti: Dodržení minimálních předepsaných vzdáleností

Po ukončení zkoušky a přesunutí vzorků byla na Gang-nailových podložkách detekována neznámá bílá hmota jemně krystalické mýdlové konzistence viz. Obr. 3.10. Byl odebrán vzorek na chemickou analýzu s podezřením, že se jedná o C-S-H gel.



Obr. 3.10 – Neznámá bílá hmota

Z výsledků XRF a XRD zkoušek se zjistilo, že se jedná pravděpodobně o hydratované formy síranů a uhličitánů zinečnatých a zinečnato-hlinitých, jejichž difrakční záznamy nejsou v databázi referenčních vzorků.

### 3.3.3 Zkoušky CHRL

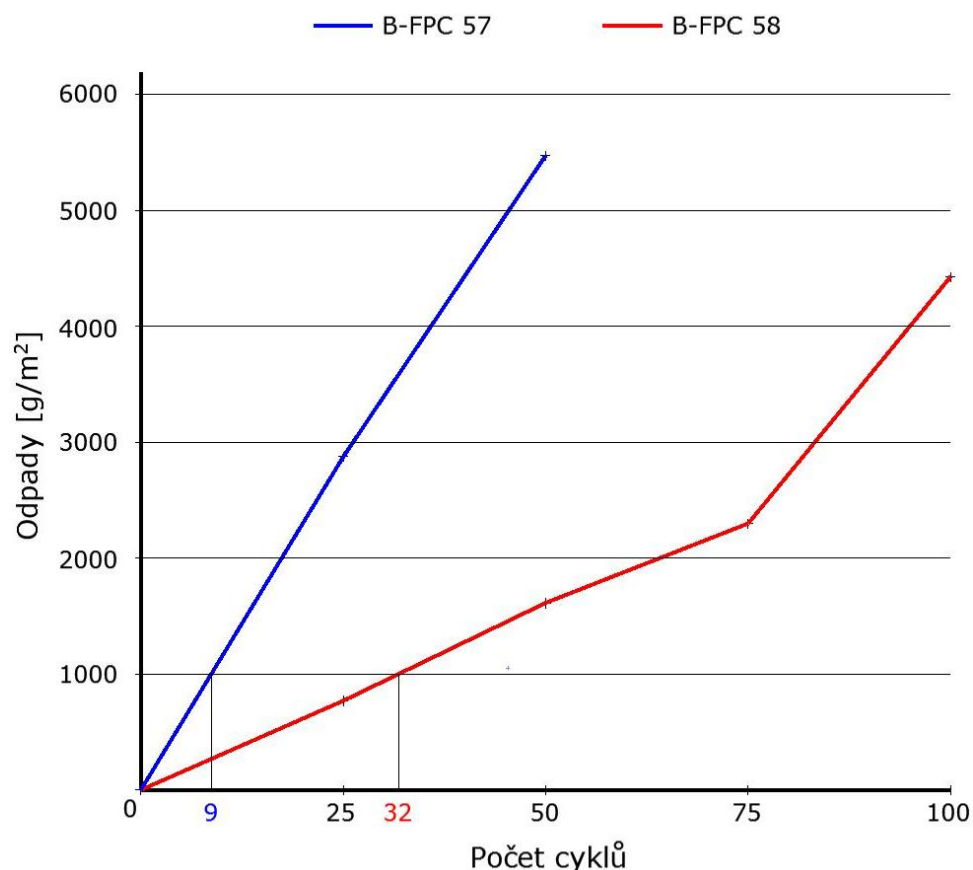
Zkoušky odolnosti povrchu proti působení chemických rozmrazovacích látek byly provedeny v Zkušební laboratoři betonu firmy BASF Stavební hmoty Česká republika s.r.o.. Zkouška byla provedena dle ČSN 73 1326 + Změna Z1, metoda A. Z každého vzorku byl zaznamenán protokol a pořízeny dvě fotografie. Jedna z nich je na Obr. 3.11.



*Obr. 3.11 – Vzorek B-FPC 58 C2 po zkoušce CHRL*

Jako kritérium odolnosti povrchu betonu proti působení vody a solných roztoků se obvykle uvádí součinitel D1, přičemž  $D1 = \text{počet cyklů, po kterých je odpad betonu } 1000 \text{ g/m}^2$ . Součinitelé D se získávají grafickým stanovením průsečíku odpadu betonu s příslušnou souřadnicí [27]. V našem případě vychází, že vzorek B-FPC 57 C je odolný do 9 cyklů a vzorek B-FPC 58 C do 32 cyklů (Graf 3.12).





Graf 3.12 – Grafické vyhodnocení odolnosti na CHRL vzorků B-FPC 57 a 58

### 3.3.4 Fenolftaleinové zkoušky

Zkoušky byly provedeny na vzorcích 120 denního stáří prošlých zkouškou pevnosti. Tyto vzorky, čerstvě naštípnuté podle jejich podélné osy zkouškou pevnosti, byly 2 – 3 cm od přední hrany rozštípnuty, pomocí majzlíku a kladiva. Poté byly vzorky očištěny. Následně na ně byla rozprašovačem nanесena vrstva indikačního roztoku fenolftaleinu o koncentraci 1%. Cca 1 – 2 minuty se nechal vzorek ležet, dokud nedošlo k ne/zabarvení. V případě zabarvení byla s přesností na mm změřena průměrná vzdálenost od okraje vzorku k vytvořené fialové hranici. V každém případě byla pořízena série dokumentujících fotografií. Při zkoušce bylo přihlíženo k ČSN EN 13630.

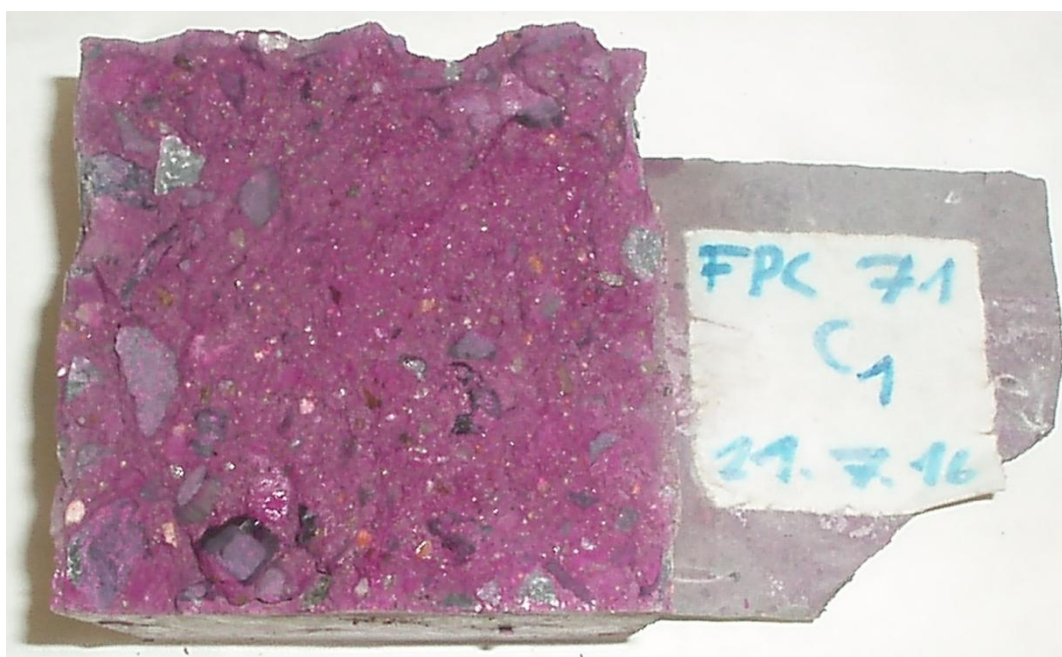
Jelikož měla většina zbarvených vzorků rozdílnou hodnotu vzdálenosti fialové hranice od horního okraje oproti okraji dolnímu, bylo přistoupeno k dvojímu měření a zapisování výsledku ve formátu x/y. Kde první údaj „x“ značí hodnotu při horním okraji a druhý „y“ hodnotu při okraji dolním. Hodnota 100 znamená, že vzorek nejevil známky po fialové barvě, bylo tedy bezbarvých celých 100mm.



Obr. 3.12 – Označení hodnotou 100mm –  
bezbarvý vzorek B-FPC 74 B1



Obr. 3.13 – Označení hodnotou 15/6mm –  
vzorek B-FPC 75 B1



Obr. 3.14 – Označení hodnotou 0/0mm – zcela zbarvený vzorek B-FPC 71 C1

## 4 Výsledky a diskuze

V této kapitole jsou uvedeny a popsány výsledky provedených měření a zkoušek pro zkoumané popílky ze spalování uhlí a jejich směsi, které jsou z nich vytvořeny. Práce se zaměřuje především na fyzikální parametry ve spojitosti se složením. Je zde řešena pevnost v závislosti na složení jednotlivých sérií. Hodnoty nasákavosti. Z protokolů zaslaných Zkušební laboratoří betonu firmy BASF byly vyhodnoceny výsledky působení CHRL. A na závěr provedena rešerše výsledků karbonatace s komentářem.

### 4.1 Pevnost

Měření pevnosti bylo rozděleno do dvou hlavních kategorií podle dominantního zastoupení popílkem, tedy do kategorií ETH 10 a ETH 20. U těchto dvou skupin se porovnávala doba mletí prezentovaná na grafech střední velikosti zrna d50, působení rozdílného uložení a vliv velikosti vodního součinitele na referenčních vzorcích popílku ETH 10.

#### ETH 10

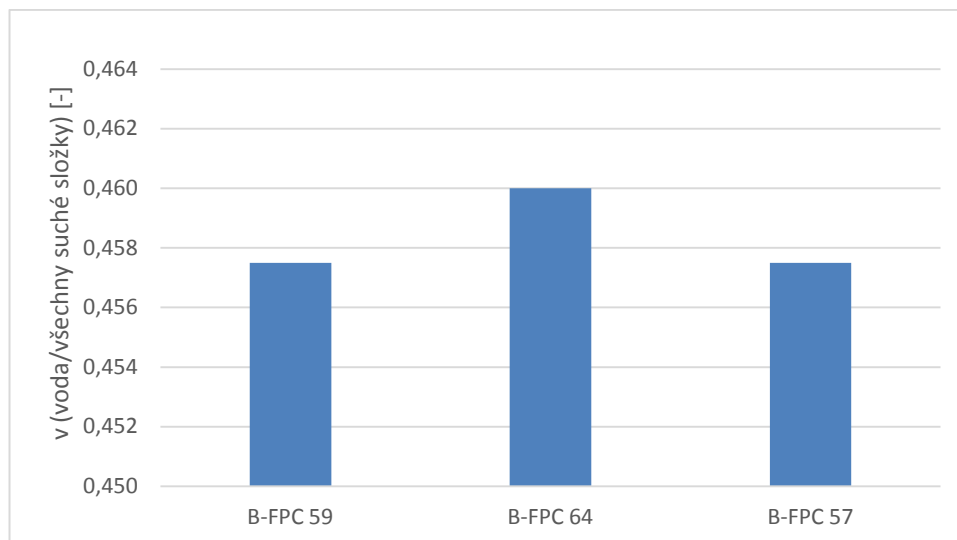
##### 4.1.1 Samotná ETH 10

- **Rozdílná doba mletí**

U vzorků B-FPC 57, 59 a 64 bylo použito jediné pojivé složky popílku z elektrárny Tisová viz. Tab. 4.1. Porovnávala byla pevnost v průběhu času v závislosti na rozdílné době mletí popílku. Je nutno podotknout, že u porovnávané trojice byl malý rozdíl ve vodním součiniteli „v“, který mohl nepatrně ovlivnit výsledky viz. Graf 4.1.

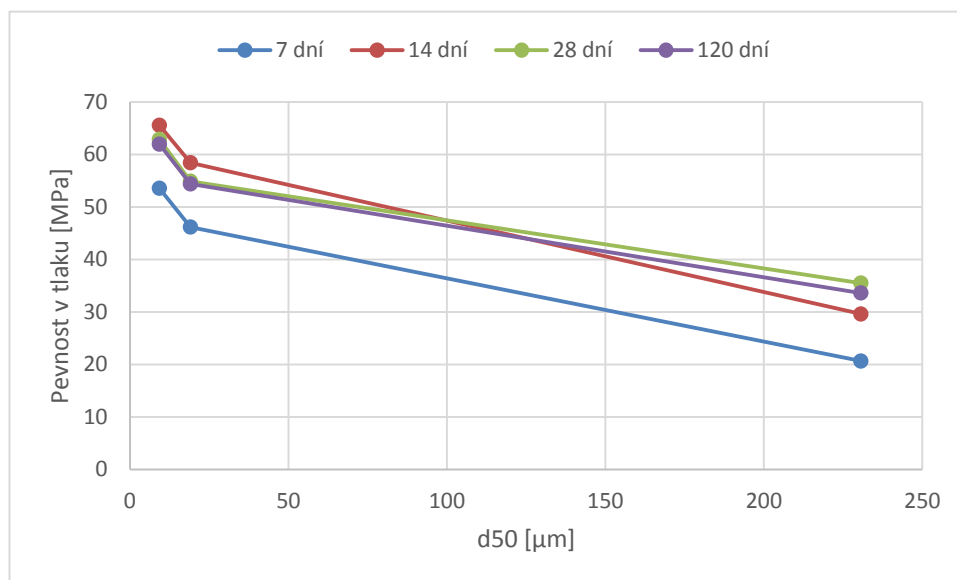
Série	druh pojiva	pevnost 28 dní [MPa]	mletí [ozn.-min]	vodní souč. v
B-FPC 57	Tisová ETH 10 9. 3. 2015	62,90	IV - 45	0,4575
B-FPC 59	Tisová ETH 10 9. 3. 2015	35,52	0 - 0	0,4600
B-FPC 64	Tisová ETH 10 9. 3. 2015	54,92	II - 15	0,4575

Tab. 4.1 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 57, 59, 64



Graf 4.1 – Rozdílné hodnoty vodního součinitele v (voda/všechny suché složky)

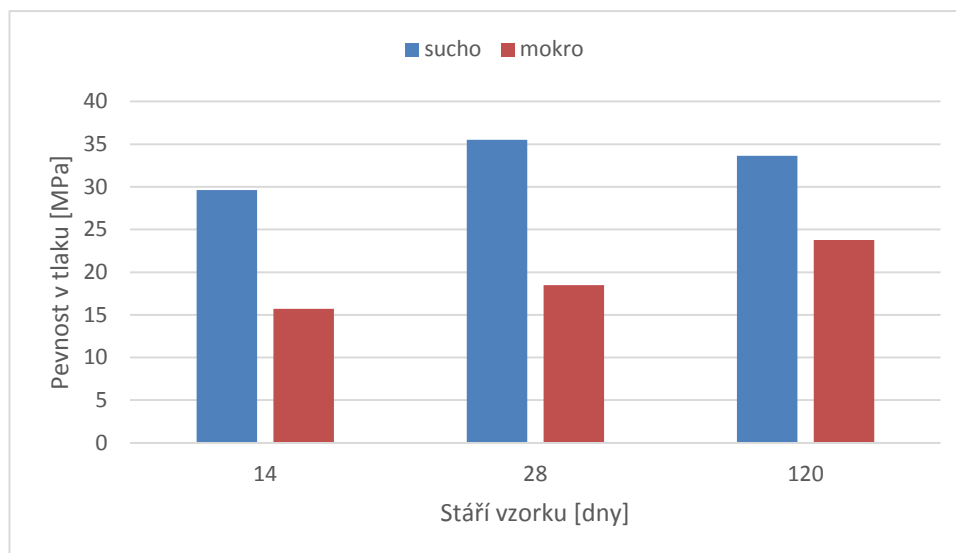
Z naměřených hodnot u těchto sérií jasně vychází pozitivní vliv délky mletí na výslednou pevnost betonu. Vzorky s označením IV, tedy dobou mletí 45 minut (hodnota 9,3 $\mu$ m- úplně vlevo) nabývaly už po dvou týdnech pevnosti přes 60 MPa. Trochu překvapující je nejvyšší naměřená pevnost u vzorků čtrnáctidenního stáří Graf 4.2.



Graf 4.2 – Pevnost B-FPC 57, 59 a 64 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků

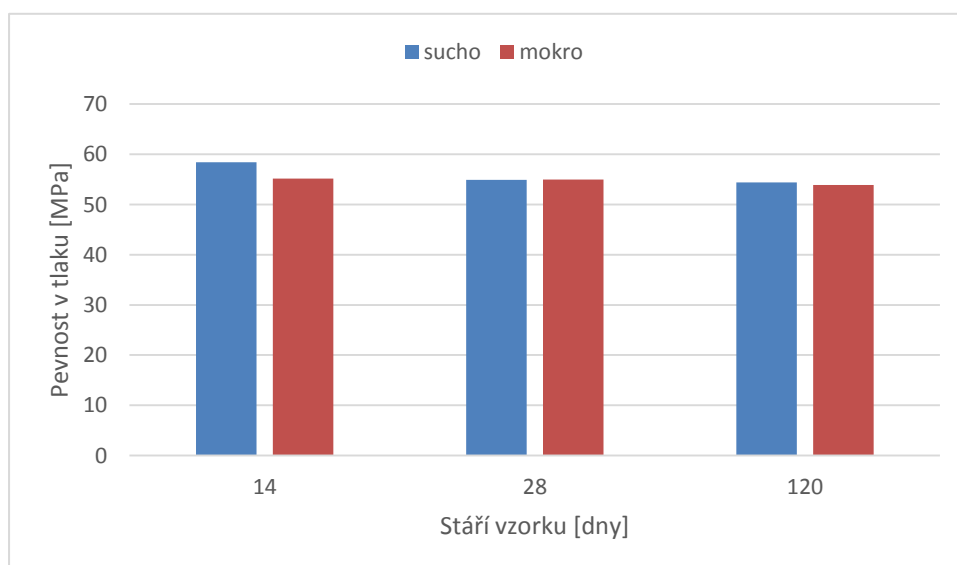
- **Vliv uložení**

Vzorky ze všech sérií byly rozděleny napůl do dvou sad, kde jedna sada tvrdla pod vodou v „mokrém uložení“ a druhá v regálech laboratoře v tzv. „suchém uložení“.



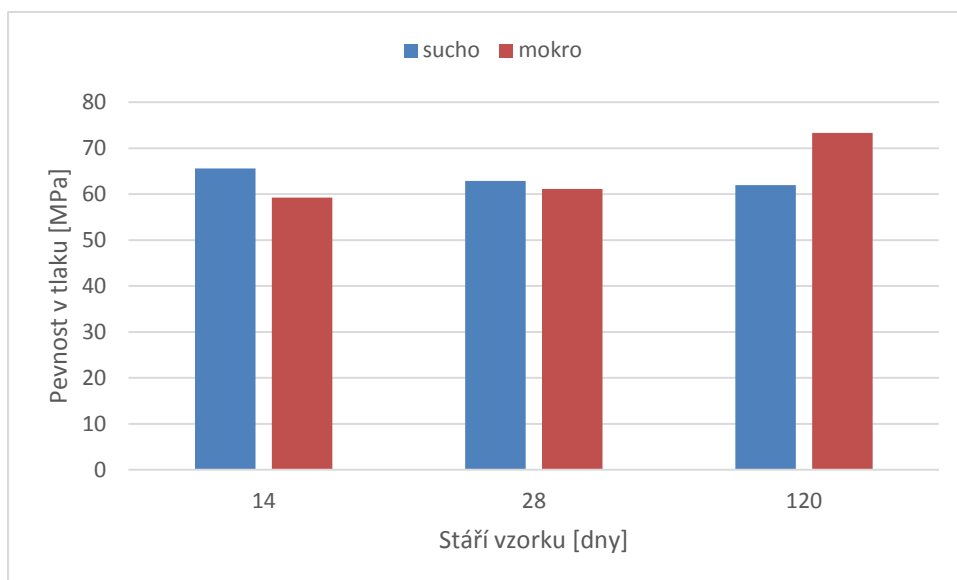
Graf 4.3 – Vliv uložení na nemletou sérii vzorků B-FPC 59

Z výše uvedeného grafu můžeme vidět větší hodnoty pevnosti u vzorku B-FPC 59 v suchém uložení oproti hodnotám z mokrého uložení. Avšak je možné, že v delším časovém horizontu by se hodnoty vyrovnaly, jelikož trend mokrého uložení je rostoucí, zatímco suché uložení vykázalo mezi 28 a 120 dny mírný pokles pevnosti. Situace se celkově mění u sérií s mletým popílkem Graf 4.4 a Graf 4.5.



Graf 4.4 – Vliv uložení na mletou sérii (II) vzorků B-FPC 64

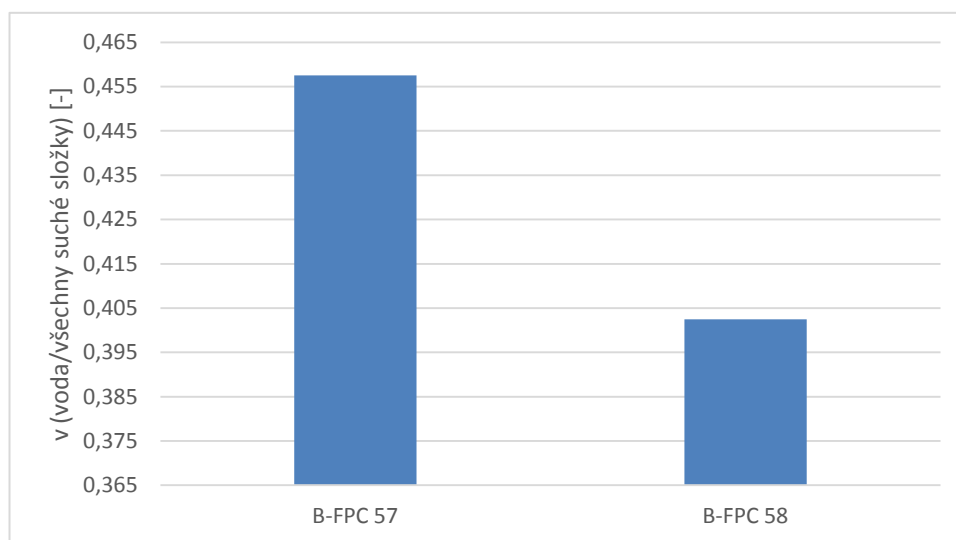
U mletí II můžeme vidět poměrně vyrovnané hodnoty pevností s nepatrně klesajícím trendem v obou případech uložení. Kdežto u mletí IV jsou trendy opět stejné jako u nemletého popílku tedy klesající pro suché uložení a rostoucí pro uložení mokré, díky čemuž mokré uložení nabývá ve 120. dnu o 11,33MPa větší pevnosti v tlaku.



Graf 4.5 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 57

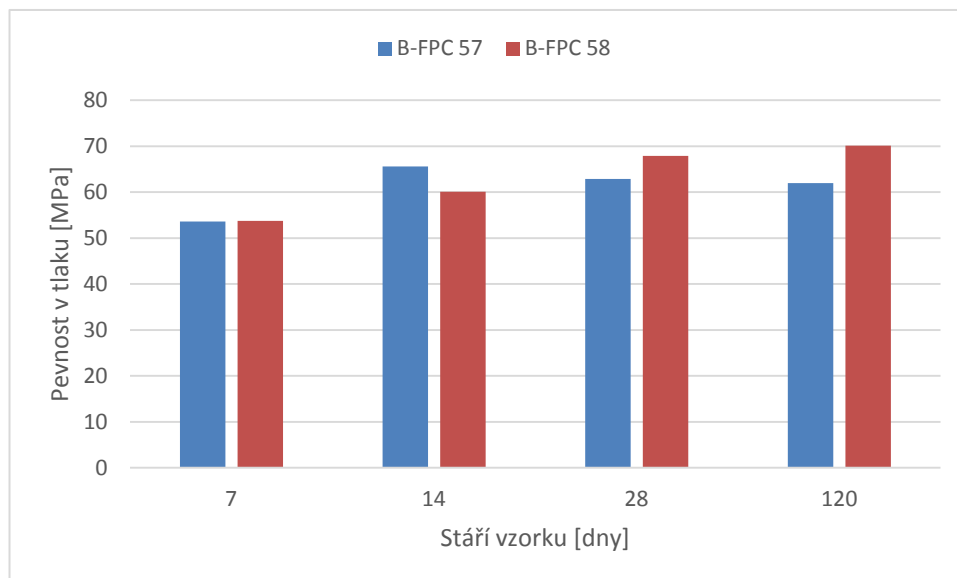
- **Vliv vodního součinitele**

Při vytváření prvních sérií byl hledán správný poměr vody k suchým složkám z důvodu nalezení optimální konzistence pro další série výzkumu. Z tohoto důvodu byl u série B-FPC 58 razantně snížen obsah vody (Graf 4.6).

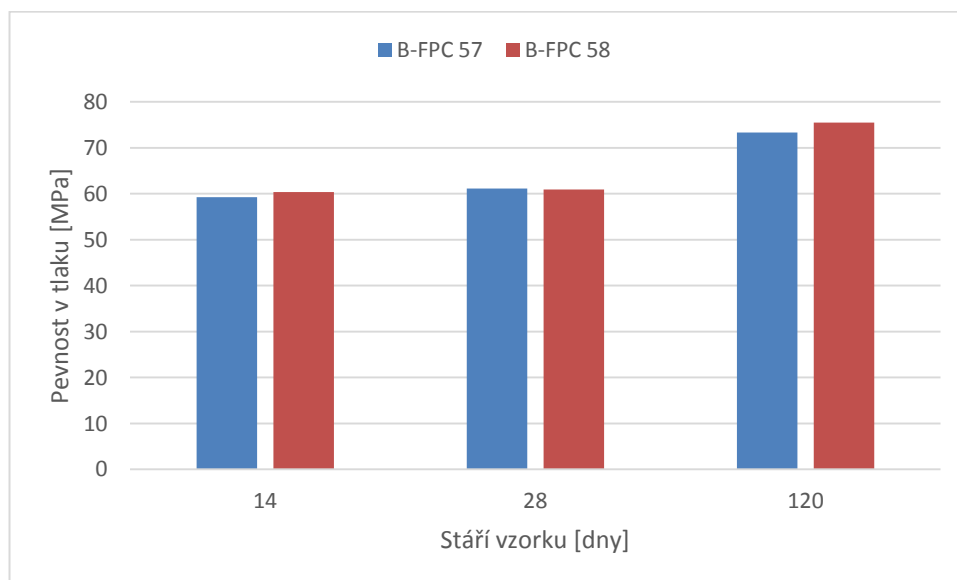


Graf 4.6 – Vodní součinitel u sérií B-FPC 57 a B-FPC 58

Z následujících dvou grafů (Graf 4.7 a Graf 4.8) je účinek snížení vodního součinitele patrný, avšak ne natolik jak bychom očekávali. K tomuto dávkování bychom mohli přistoupit jedině v případě smíření se s tím, že by byla většina sérií na hraně zpracovatelnosti a velká část dokonce za ní. Obě dvě série dosahují při stáří 28 dní úctyhodných pevností přes 60MPa.



Graf 4.7 – Pevnosti na suchu uložených sérií B-FPC 57, 58 s rozdílným množstvím vody



Graf 4.8 – Pevnosti mokře uložených sérií B-FPC 57, 58 s rozdílným množstvím vody

#### 4.1.2 ETH 10 + Ca(OH)<sub>2</sub>

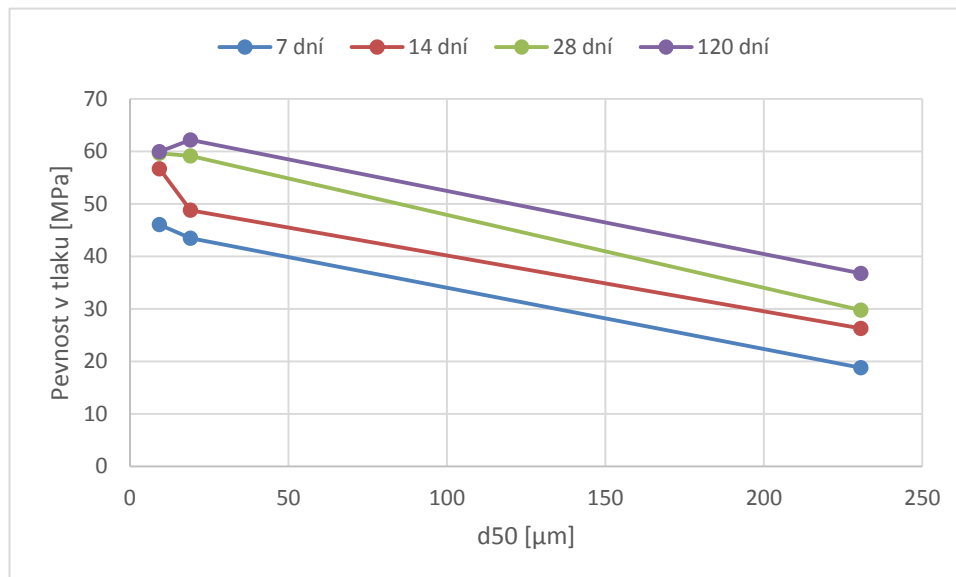
- **Rozdílná doba mletí**

Popílek ETH 10 s přidáním vápna měly vzorky s označením B-FPC 62, 67 a 68. V tomto případě bylo už množství vody dané recepturou a konzistencí pro všechny tři série totožné.

Série	druh pojiva	pevnost 28 dní [MPa]	mletí [ozn.-min]	vodní souč. v
B-FPC 62	Tisová ETH 10 + Ca(OH) <sub>2</sub>	59,67	IV - 45	0,4600
B-FPC 67	Tisová ETH 10 + Ca(OH) <sub>2</sub>	59,15	II - 15	0,4600
B-FPC 68	Tisová ETH 10 + Ca(OH) <sub>2</sub>	29,77	0 - 0	0,4600

Tab. 4.2 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 57, 59, 64

Z výsledků opět vyplývá vyšší pevnost pro mleté popílků, avšak nárůsty pevnosti mezi dobami mletí už nejsou tak markantní. Strmější růst čtrnáctidenní křivky by mohl naznačovat větší nárůst pevností jemněji mletých popílků v počátečních dobách tvrdnutí betonu viz. Graf 4.9.



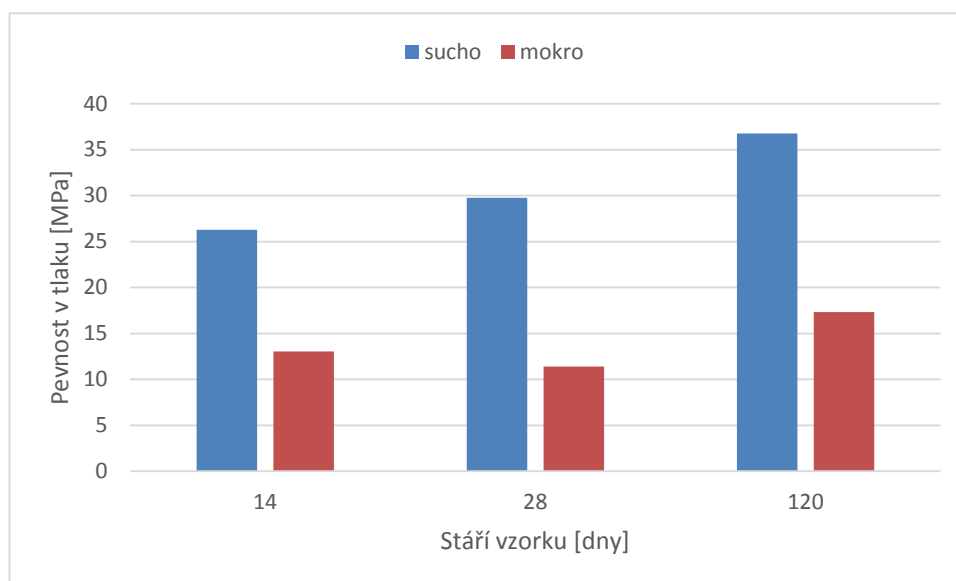
Graf 4.9 – Pevnost B-FPC 62, 67 a 68 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků

- **Vliv uložení**

I zde u nemletých popílků, navíc s přidáním vápnem, se z následujícího grafu (Graf 4.10) potvrzuje nižší pevnost v mokřém uložení. Avšak již není patrná

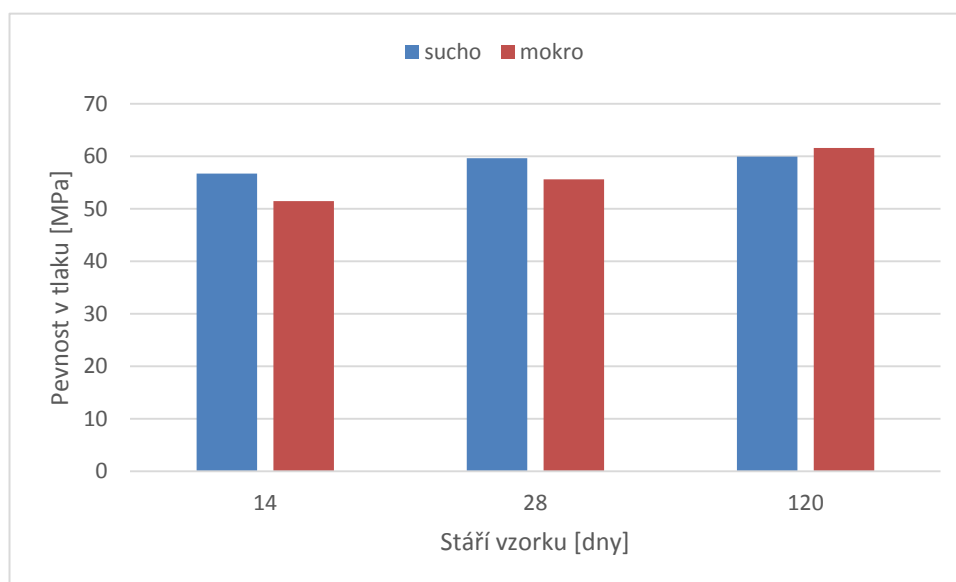


tendence vyrovnávání se pevností mezi 28. a 120. dnem pevnosti, jako tomu bylo u vzorků s ETH 10 bez vápna.



Graf 4.10 – Vliv uložení na nemletou sérii vzorků B-FPC 68

Prakticky stejné chování, oproti směrím bez vápna, vykazují i vzorky mleté tohoto složení. Kde se opět vyrovnaly hodnoty pevností obou uložení, při zachování růstového trendu pevností u vzorků mokře uložených (Graf 4.11).



Graf 4.11 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 62

### 4.1.3 ETH 10 + EPC

- **Rozdílná doba mletí**

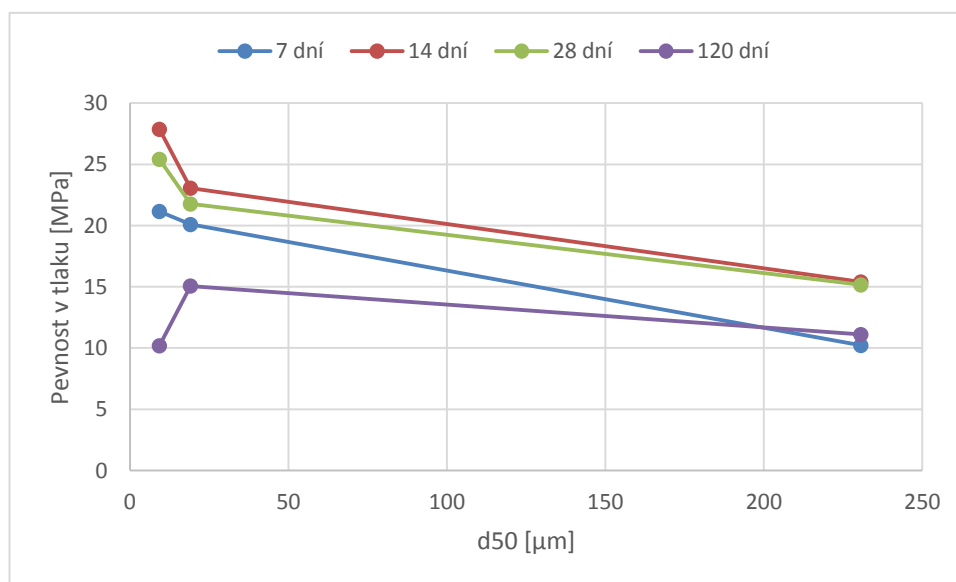
Zde se jedná o série č. 63, 66 a 69 s kombinací popílků ETH 10 a EPC (Tab. 4.3).

Série	druh pojiva	pevnost 28 dní [MPa]	mletí [ozn.-min]	vodní souč. v
B-FPC 63	Tisová ETH 10 + Počerady EPC	25,42	IV - 45	0,4600
B-FPC 66	Tisová ETH 10 + Počerady EPC	21,76	II - 15	0,4600
B-FPC 69	Tisová ETH 10 + Počerady EPC	15,16	0 - 0	0,4600

Tab. 4.3 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 63, 66, 69

I u tohoto složení se ukazuje pozitivní vliv menší hodnoty velikosti středního zrna na pevnost betonů a zároveň i markantní vzestup pevností u delší doby mletí oproti té kratší.

Celkově nižší hodnoty pevnosti, lehce přes 25 MPa, jsou pravděpodobně způsobeny popílkem EPC. Na vrub tohoto popílku může jít patně i nižší stodvacetidenní pevnost napříč všemi vzorky.

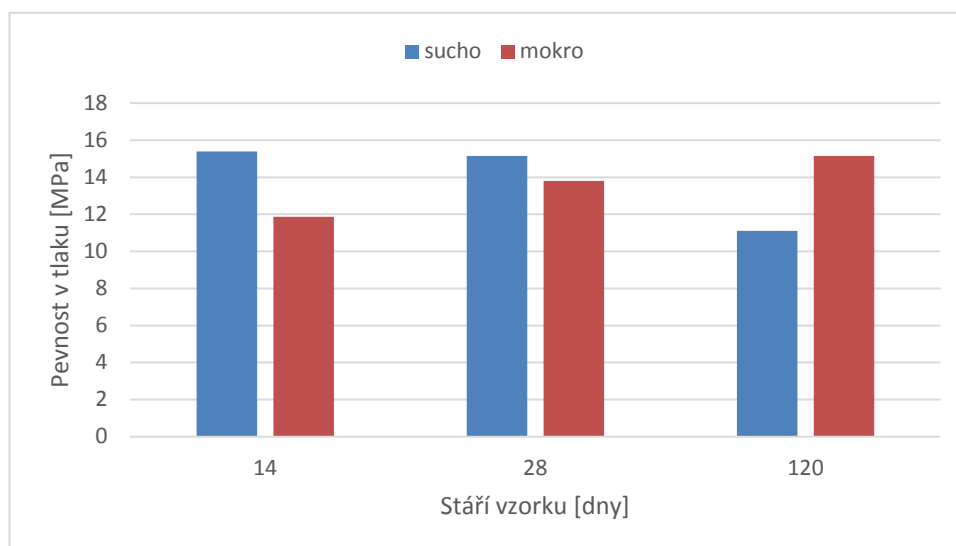


Graf 4.12 – Pevnost B-FPC 63, 66 a 69 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků

- **Vliv uložení**

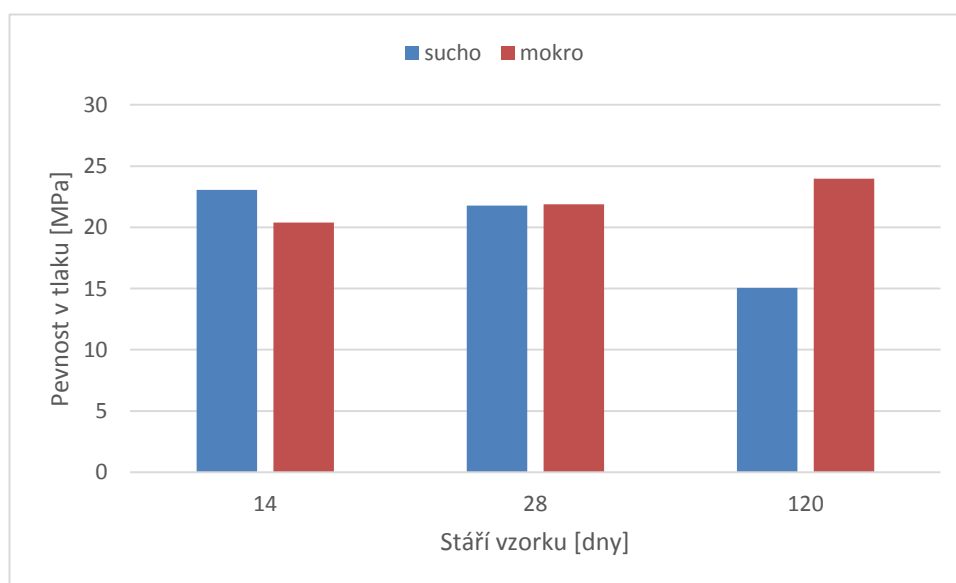
Při zkoumání vlivu uložení můžeme u této kombinace pojiv vidět podobné chování nárůstů pevností a zároveň odlišné rozdíly v nabytých hodnotách. Rozdíly

v pevnostech mezi suchými a mokřými vzorky už nejsou tak markantní jako v předchozích dvou případech. To může být způsobeno celkovou nižší pevností (do 16 MPa) oproti předchozím úrovním přes 25 – 35 MPa. Ale rostoucí trend pevností v mokřém uložení a klesající trend u suchého uložení zůstal zachován (Graf 4.13).



Graf 4.13 – Vliv uložení na nemletou sérii vzorků B-FPC 69

Výsledky vlivu uložení na mleté série je v podstatě shodný s předchozími dvěma porovnáními. Tedy poměrně vyrovnané hodnoty pevností napříč uloženími a setrvalý růst pevností v mokřém uložení. Zajímavé je, že u obou suše uložených mletých sérií došlo po 120 dnech k výraznému poklesu pevností. Jako příklad je uveden Graf 4.14 – Vliv uložení na mletou sérii (II) vzorků B-FPC 66.



Graf 4.14 – Vliv uložení na mletou sérii (II) vzorků B-FPC 66

#### 4.1.4 ETH 10 + EPC + Ca(OH)<sub>2</sub>

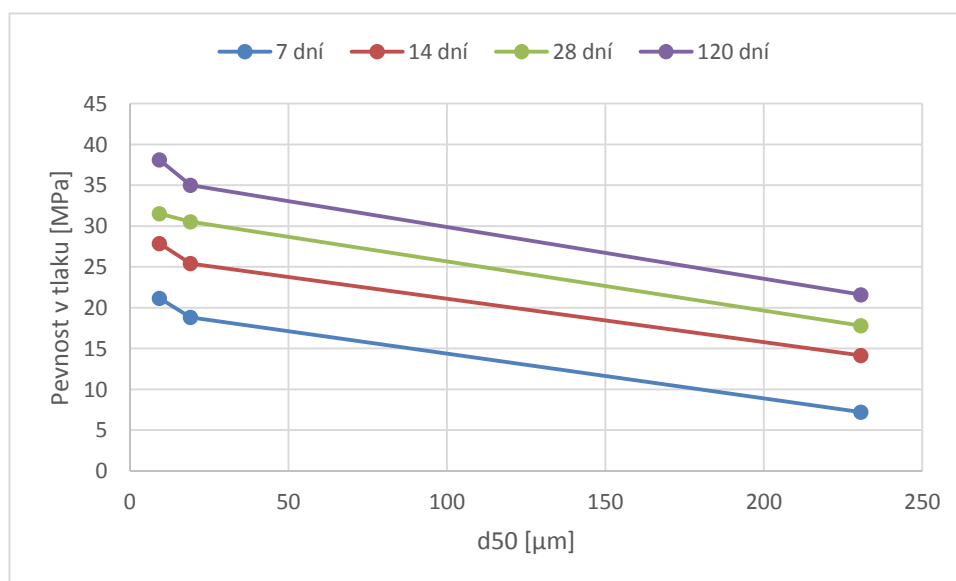
Série B-FPC 60, 61 a 65 s pojivou směsí složenou ze tří složek obsahovaly stejné množství záměsové vody (Tab. 4.4).

- **Rozdílná doba mletí**

Série	druh pojiva	pevnost 28 dní [MPa]	mletí [ozn.-min]	vodní souč. v
B-FPC 60	ETH 10 + EPC + Ca(OH) <sub>2</sub>	31,53	IV - 45	0,4600
B-FPC 61	ETH 10 + EPC + Ca(OH) <sub>2</sub>	17,80	0 - 0	0,4600
B-FPC 65	ETH 10 + EPC + Ca(OH) <sub>2</sub>	30,53	II - 15	0,4600

Tab. 4.4 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 60, 61, 65

Na Graf 4.15 můžeme vidět jasný příznivý vliv menší velikosti středního zrna na pevnost zkoušených betonů. Pozitivní vliv mletí se pochybuje od 65% - 85% podle jemnosti mletí. Dosažené hodnoty jsou celkově o trochu nižší, pravděpodobně vlivem EPC, i přes přidané vápno.

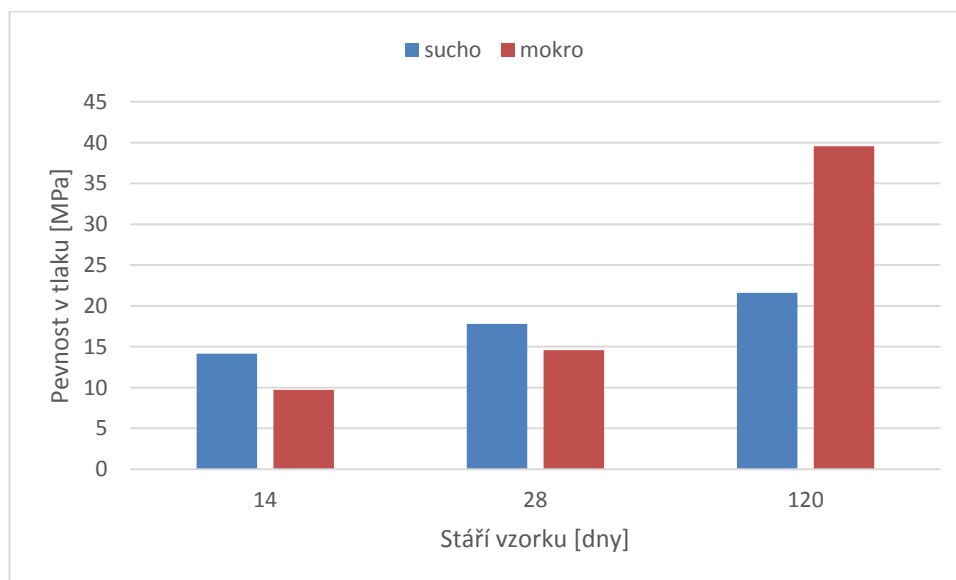


Graf 4.15 – Pevnost B-FPC 60, 61 a 65 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků

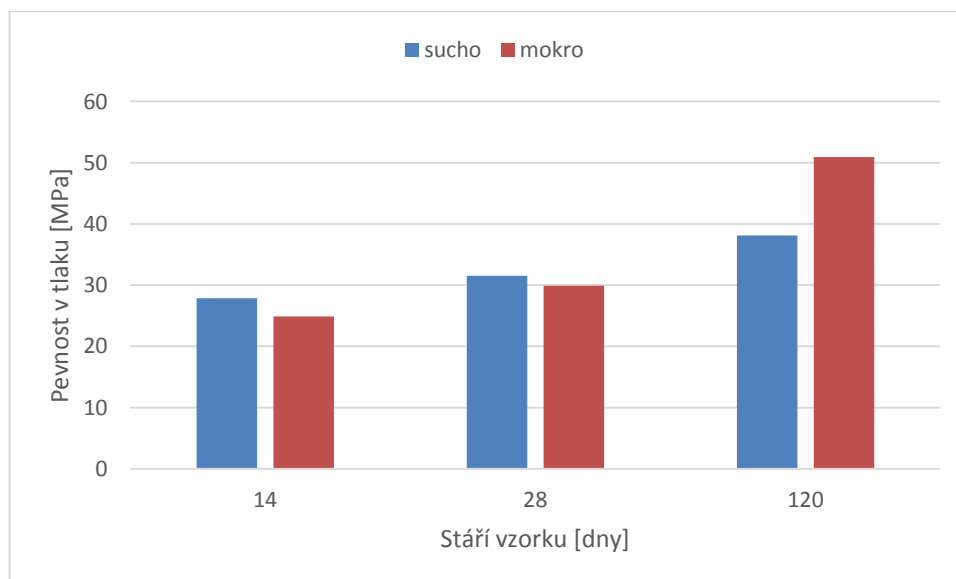
- **Vliv uložení**

Nejspíše kvůli přidanému vápnu jsou i zde v růstovém trendu vzorky uložené v obou prostředích. U všech tří vzorků byl zaznamenán výrazný nárůst pevností po 28. dni stáří především u mokrého uložení. To vede k úvaze, že

EPC aktivované hydroxidem vápenatým nabývá pevností až v pozdějším období stáří vzorku (po 28. dni) viz. Graf 4.16 a Graf 4.17.



Graf 4.16 – Vliv uložení na nemletou sérii vzorků B-FPC 61



Graf 4.17 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 60

#### 4.1.5 SORFIX II - ETH 10 + EPC + Ca(OH)<sub>2</sub>

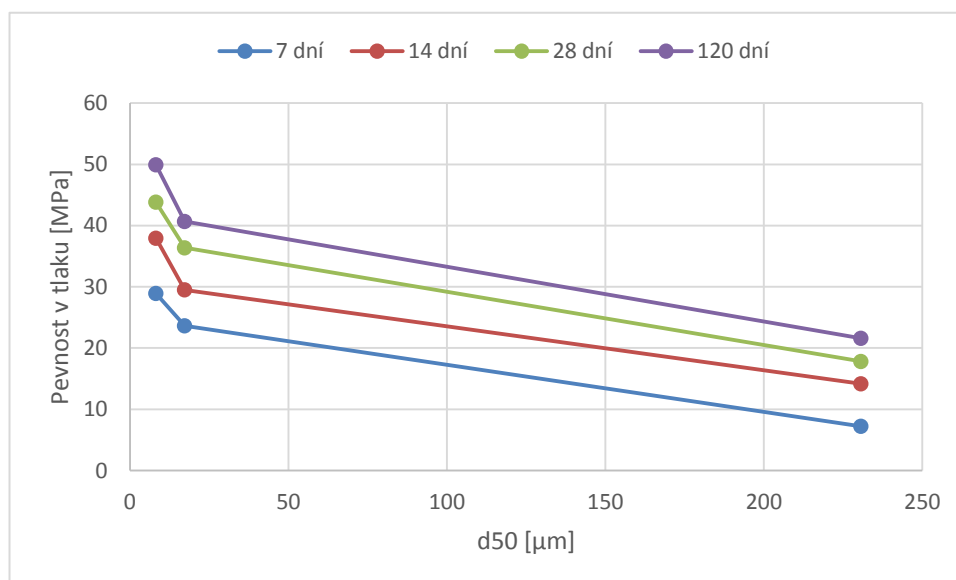
Ze složení v názvu podkapitoly můžeme vidět, že se jedná o složení stejné jako v předchozí kapitole 4.1.4. Rozdíl mezi nimi je v technologickém procesu, kde se melou všechny složky pojiva spolu zároveň. Druh nemletého SORFIXu tedy nemůže existovat a proto bylo přistoupeno k porovnání s nemletou směsí B-FPC 61.

- **Rozdílná doba mletí**

Série	druh pojiva	pevnost 28 dní [MPa]	mletí [ozn.-min]	vodní souč. v
B-FPC 61	ETH 10 + EPC + Ca(OH) <sub>2</sub>	17,80	0 - 0	0,4600
B-FPC 84	SORFIX II	43,83	IV - 45	0,4600
B-FPC 85	SORFIX II	36,36	II - 15	0,4600

Tab. 4.5 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 61, 84, 85

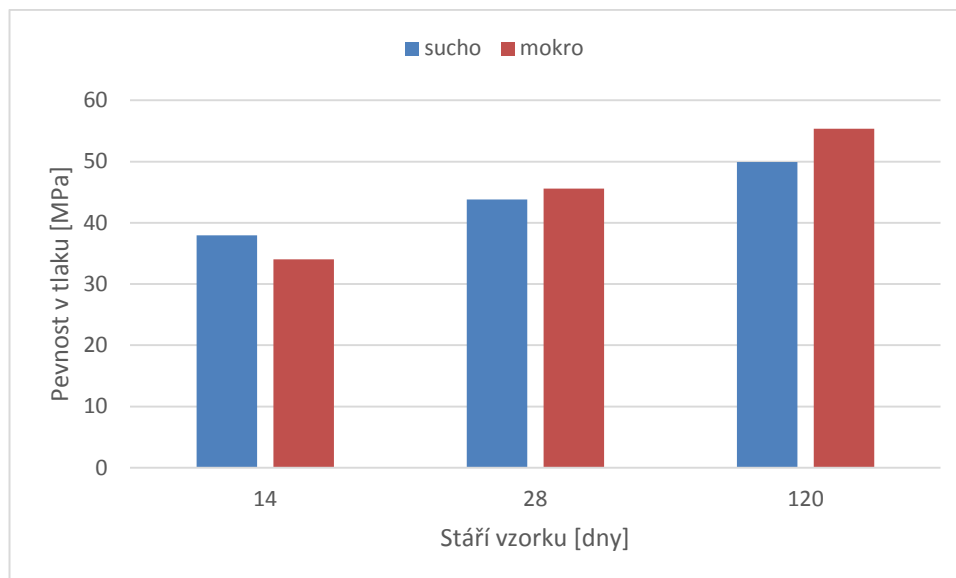
Nakonec i u posledních vzorků s ETH 10 můžeme pozorovat výrazný nárůst pevnosti se zmenšující se částicí střední velikosti zrna. Dokonce je patrný i vyšší nárůst pevností mezi mletím II a IV oproti nárůstu předchozí směsi, způsobený větší jemností a homogenitou všech částic (Graf 4.18).



Graf 4.18 – Pevnost B-FPC 61 a SFX II-II a SFX II-IV v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků

- **Vliv uložení**

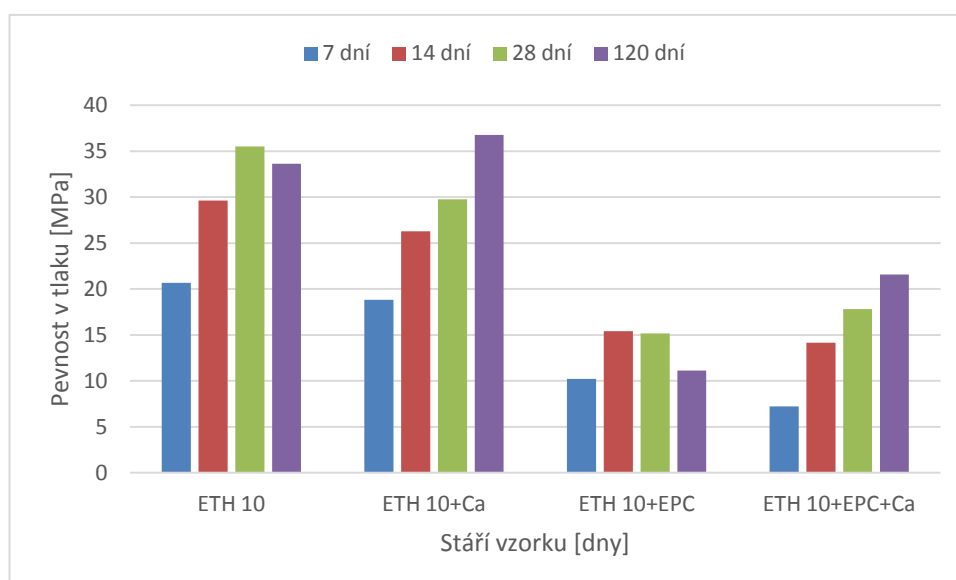
Díky prakticky stejnému složení se zde potvrdily výsledky z předchozí kapitoly (4.1.4), kde se také ukazovaly střední hodnoty pevností rostoucího charakteru v obou uloženích. Jediný nepatrný rozdíl je zde možná v tom, že se zde neprojevuje tak velký skokový nárůst pevnosti mezi dvacátým osmým a stodvacátým dnem pevnosti (). Pravděpodobně z důvodu větší homogenizace při společném mletí SORFIXů.



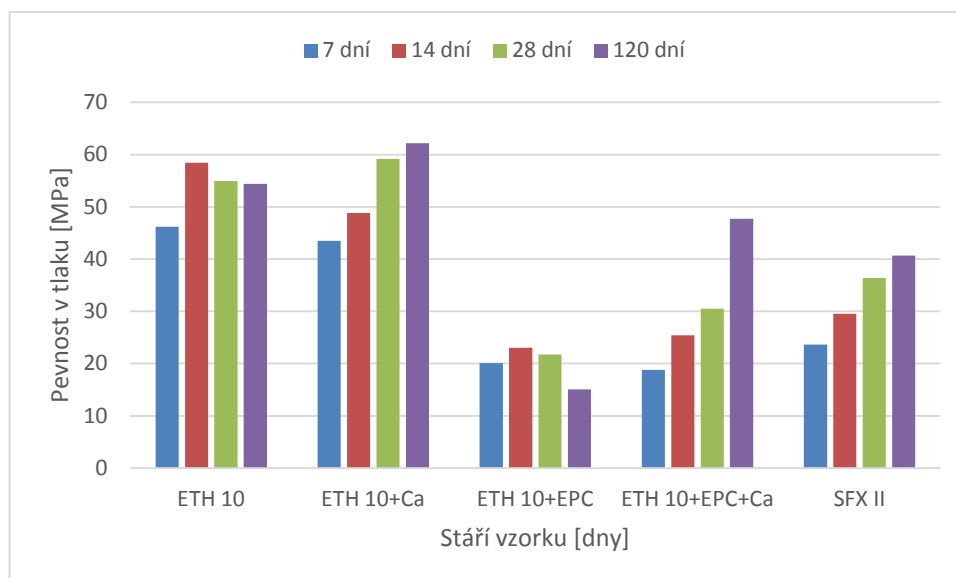
Graf 4.19 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 84

#### 4.1.6 Porovnání výsledků ETH 10

Z následujících grafů (Graf 4.20, Graf 4.21 a Graf 4.22) je patrné, že série s vysokoteplotním popílkem EPC dosahují nižších pevností v porovnání s ostatními sériemi. Hodnoty se po přidání hydroxidu vápenatého zvýší, což dokazuje, že vysokoteplotní popílků je nutné alkalicky aktivovat, aby byly schopné reagovat a měly požadované vazné účinky.

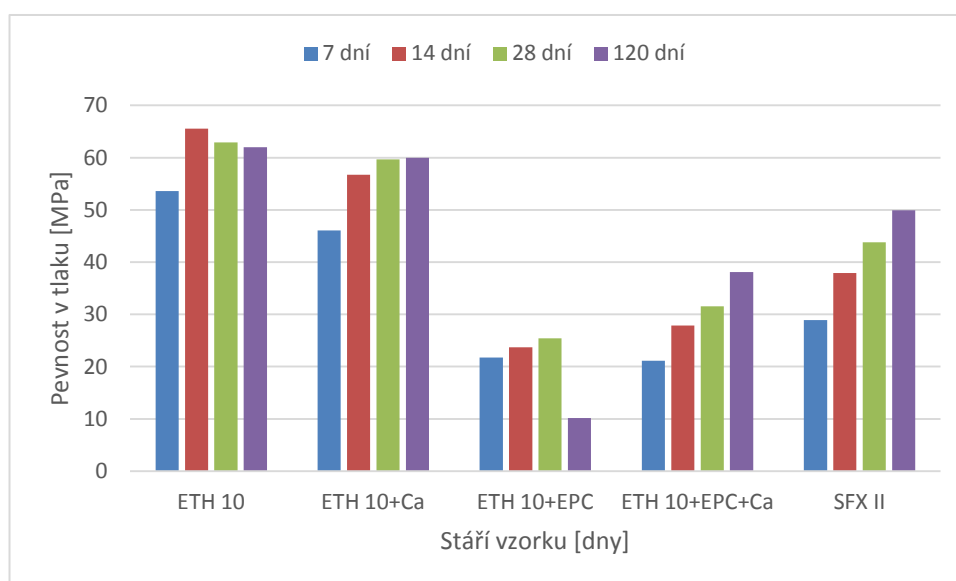


Graf 4.20 – Pevnost suše uložených nemletých ETH 10 s jednotlivými příměsemi



Graf 4.21 – Pevnost suše uložených mletých (II) ETH 10 s jednotlivými příměsemi

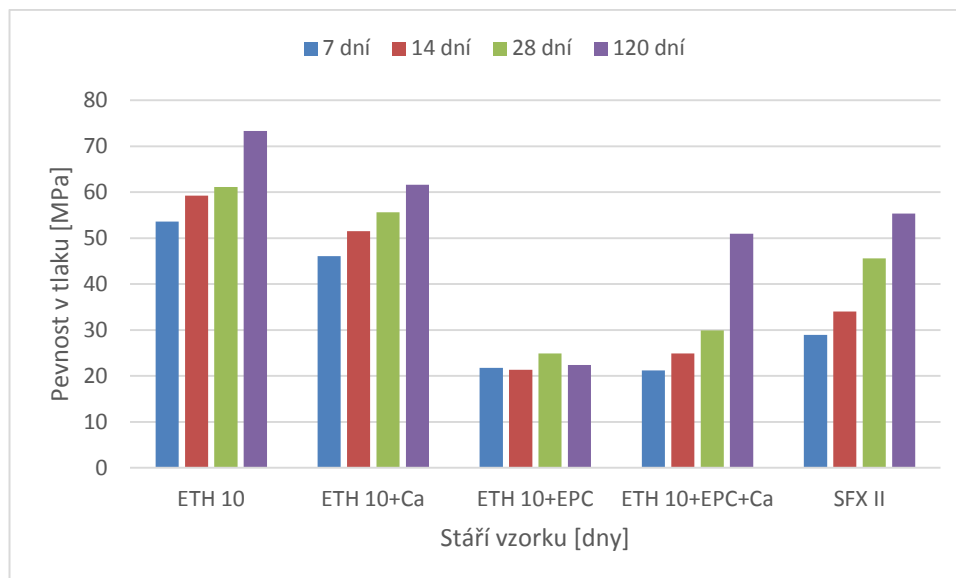
Zajímavé jsou poklesy 120-ti denních pevností napříč všemi mletími suše uložených sérií s pojivem z ETH 10+EPC



Graf 4.22 – Pevnost suše uložených mletých (IV) ETH 10 s jednotlivými příměsemi

Z předchozích výsledků a následujícího grafu (Graf 4.23) můžeme postřehnout i stabilnější a trvalejší růst pevností vlivem mokrého uložení a přítomností hydroxidu vápenatého.





Graf 4.23 – Pevnost mokře uložených mletých (IV) ETH 10 s jednotlivými příměsemi

## **ETH 20**

### **4.1.7 Samotná ETH 20**

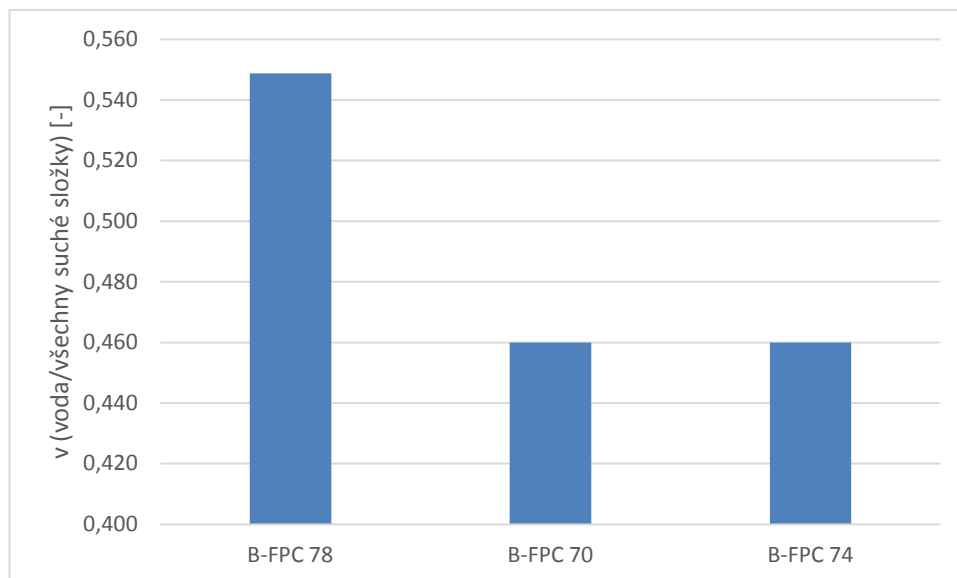
Na úvod je potřeba připomenout, že neupravovaný popílek ETH 20 se skládá z mnohem jemnějších částic než popílek ETH 10, proto bylo stejnou dobou mletí dosaženo menších částic.

- Rozdílná doba mletí**

Série	druh popílku	pevnost 28 dní [MPa]	mletí [ozn.-min]	vodní souč. v
B-FPC 70	Tisová ETH 20 8. 4. 2015	47,49	II - 15	0,4600
B-FPC 74	Tisová ETH 20 8. 4. 2015	43,14	IV - 45	0,4600
B-FPC 78	Tisová ETH 20 8. 4. 2015	30,31	0 - 0	0,5488

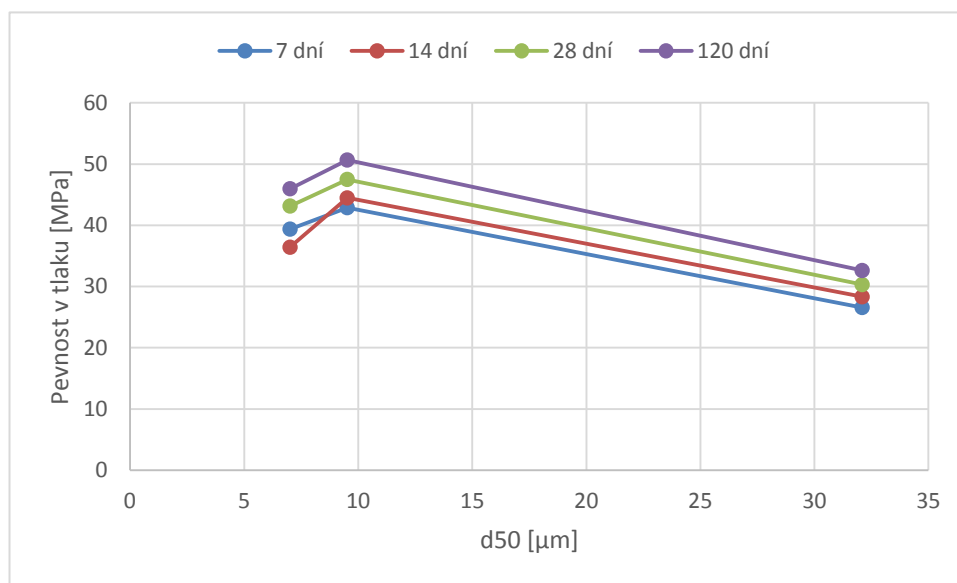
Tab. 4.6 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 70, 74, 78

Pozorovaná trojice sérií se významně liší ve vodním součiniteli (Graf 4.24) z důvodu nutnosti přidání vody do betonu s nemletým popínkem, který vykazoval velmi špatnou konzistenci. Z předchozích kapitol však lze vyvodit, že nedošlo k významnému ovlivnění pevností.



Graf 4.24 – Vodní součinitel v (voda/všechny suché složky) u sérií B-FPC 70, 74 a 78

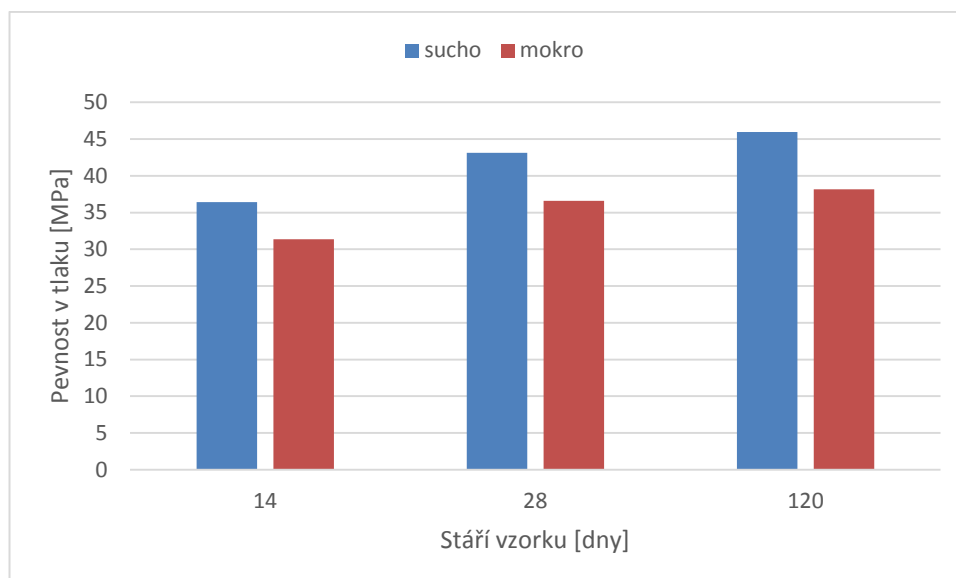
Na následujícím grafu (Graf 4.25) můžeme vidět příznivý vliv mletí II – 15 min, ale už nepříznivý vliv mletí IV – 45 min. Pravděpodobně došlo k tomu, že pojivová báze byla již příliš jemná a pro lepší pojivé účinky chyběly částice větších rozměrů se střední velikostí zrna nad 7  $\mu\text{m}$ .



Graf 4.25 – Pevnost B-FPC 70, 74 a 78 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků

- **Vliv uložení**

U skupiny vzorků se samotnou ETH 20 se projevilo dosažení vyšší pevnosti na suchu než v mokřém uložení. Všechny směsi prokázaly konstantní přírůstek pevnosti v obou druzích uložení (Graf 4.26).



Graf 4.26 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 74

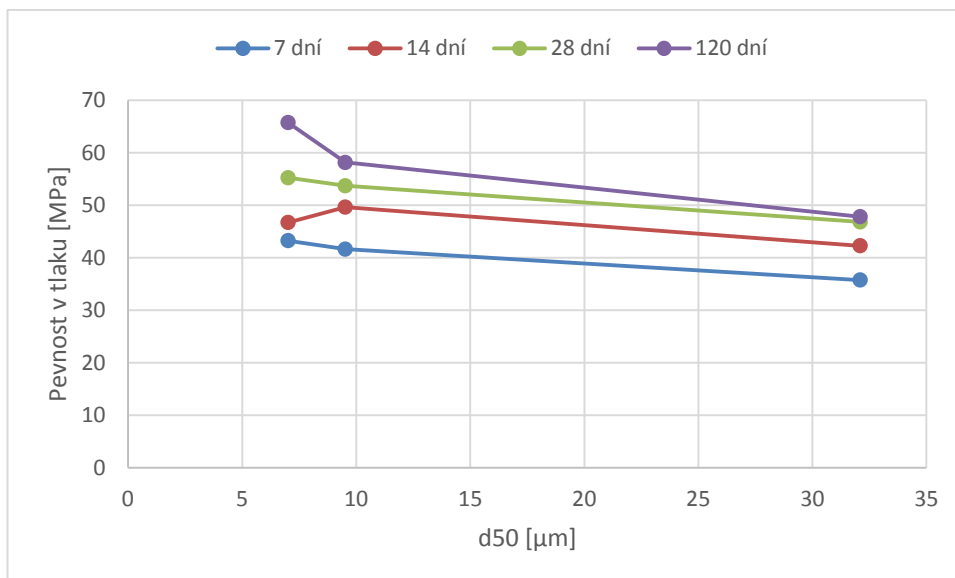
#### 4.1.8 ETH 20 + Ca(OH)<sub>2</sub>

- **Rozdílná doba mletí**

Série	druh popílku	pevnost 28 dní [MPa]	mletí [ozn.-min]	vodní souč. v
B-FPC 72	Tisová ETH 20 + Ca(OH) <sub>2</sub>	53,71	II - 15	0,4600
B-FPC 76	Tisová ETH 20 + Ca(OH) <sub>2</sub>	55,24	IV - 45	0,4600
B-FPC 80	Tisová ETH 20 + Ca(OH) <sub>2</sub>	46,83	0 - 0	0,5525

Tab. 4.7 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 72, 76, 80

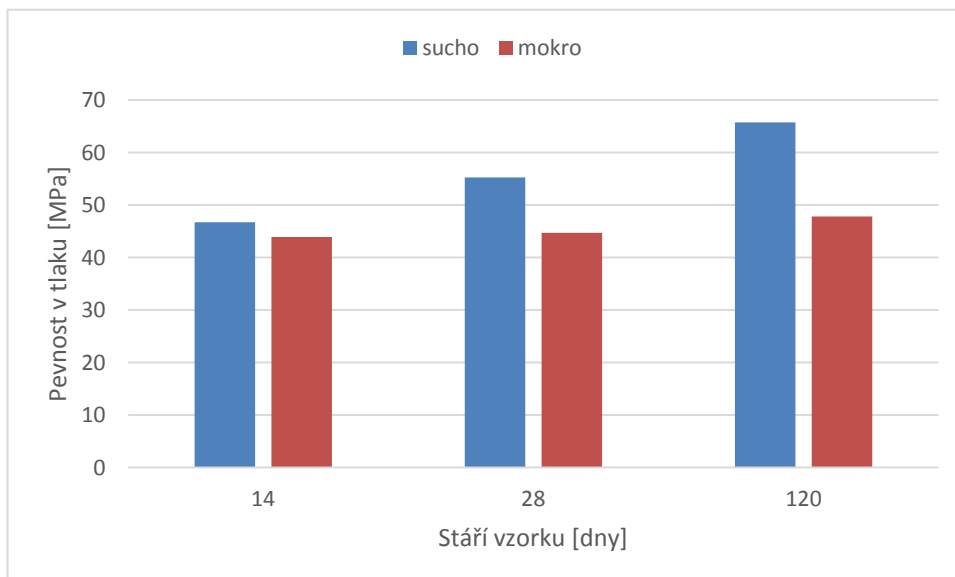
U trojice sérií B-FPC 72, 76 a 80, kde je pojivem popílek ETH 20 s přidaným vápenným hydrátem se celkem jasně projevuje růst po mletí II – 15 min. Oproti předchozím směsím bez vápna lze na následujícím grafu (Graf 4.27) zaregistrovat i opětovný růst po mletí IV, který je patrně způsobený doplněním větších částic z hydroxidu vápenatého. Růst pevnosti mezi d<sub>50</sub>=7,0 a d<sub>50</sub>=9,5 byl 2,8% (28 dní pevnosti).



Graf 4.27 – Pevnost B-FPC 72, 76 a 80 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků

- **Vliv uložení**

Po přidání vápna se vzorky chovají obdobně jako v předchozím případě. Je dosaženo vyšších pevností v suchém uložení a všechny směsi vykazovaly stabilní přírůstek pevností v obou druzích uložení (Graf 4.28).



Graf 4.28 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 76

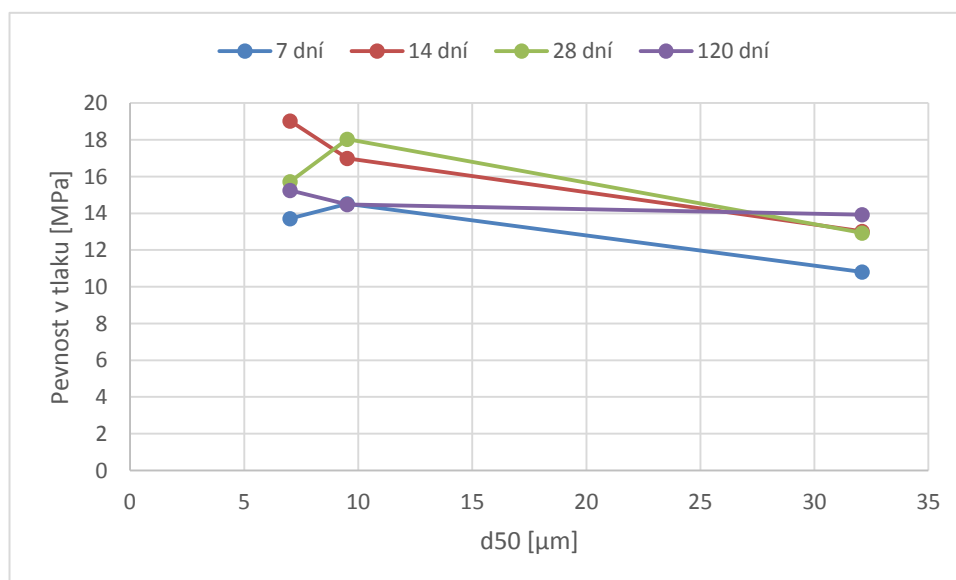
#### 4.1.9 ETH 20 + EPC

- **Rozdílná doba mletí**

Série	druh popílku	pevnost 28 dní [MPa]	mletí [ozn.-min]	vodní souč. v
B-FPC 73	Tisová ETH 20 + Počerady EPC	18,03	II - 15	0,4600
B-FPC 77	Tisová ETH 20 + Počerady EPC	15,72	IV - 45	0,4600
B-FPC 81	Tisová ETH 20 + Počerady EPC	12,93	0 - 0	0,4725

Tab. 4.8 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 73, 77, 81

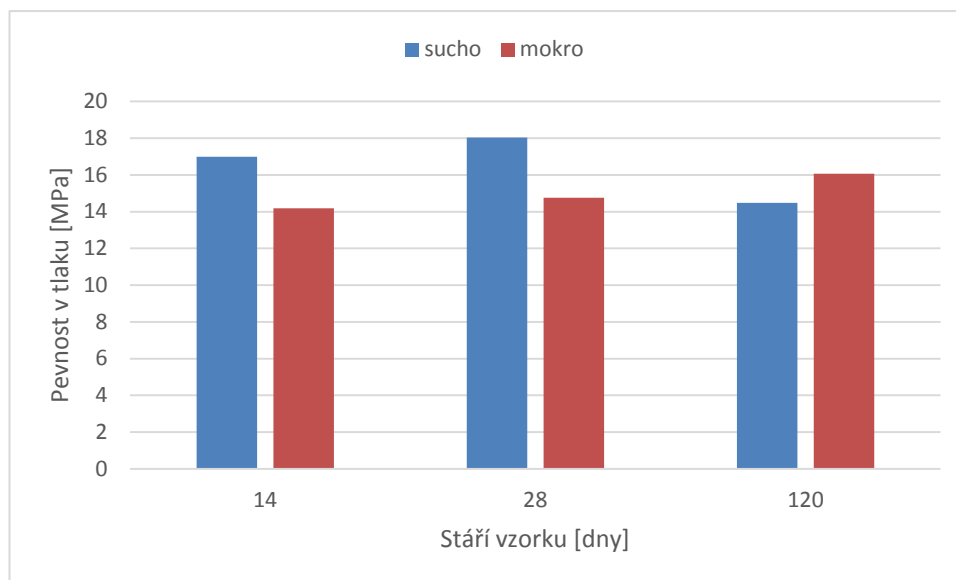
U sérií č. 73, 77 a 81 s příměsí vysokoteplotního popílku z elektrárny Počerady je opět patrný kladné působení mletí II – 15 min i přes celkově nižší hodnoty pevností. Pokud se však podíváme na hodnotu střední velikosti zrna 7, charakteristickou pro mletí IV – 45 min (Graf 4.29), můžeme pozorovat nejednoznačné výsledky. Ty mohou být důsledkem kombinace dvou protichůdných vlivů. Na jednu stranu dochází přidáním EPC ke zlepšení příliš jemné granulometrie popílku ETH 20 a na stranu druhou k nestálému chování popílku EPC nestabilizovaného hydroxidem vápenatým.



Graf 4.29 – Pevnost B-FPC 73, 77 a 81 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků

- **Vliv uložení**

I v této situaci se ukazuje, že přidáním vysokoteplotního popílku EPC může docházet ve vyšším stáří vzorku k poklesu pevnosti a že se tento jev do určité míry stabilizuje uložení ve vodě (Graf 4.30).



Graf 4.30 – Vliv uložení na mletou sérii (II) vzorků B-FPC 73

#### 4.1.10 ETH 20 + EPC + Ca(OH)<sub>2</sub>

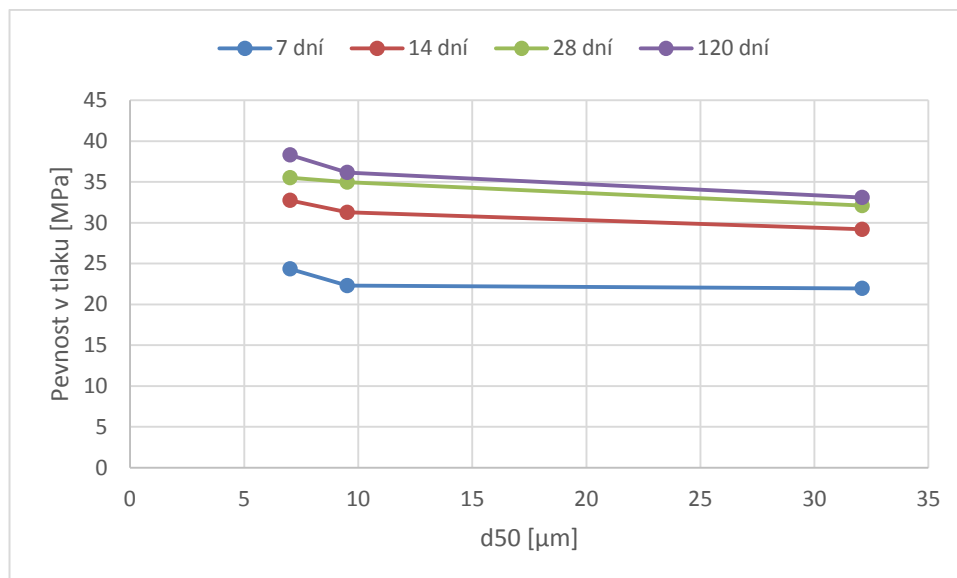
- **Rozdílná doba mletí**

U této trojice sérií, B-FPC 71 75 79, bude zkoumáno zastoupení všech tří složek pojiva viz. (Tab. 4.9).

Série	druh popílku	pevnost 28 dní [MPa]	mletí [ozn.-min]	vodní souč. v
B-FPC 71	ETH 20 + EPC + Ca(OH) <sub>2</sub>	34,98	II - 15	0,4600
B-FPC 75	ETH 20 + EPC + Ca(OH) <sub>2</sub>	35,52	IV - 45	0,4600
B-FPC 79	ETH 20 + EPC + Ca(OH) <sub>2</sub>	32,10	0 - 0	0,4650

Tab. 4.9 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 71, 75, 79

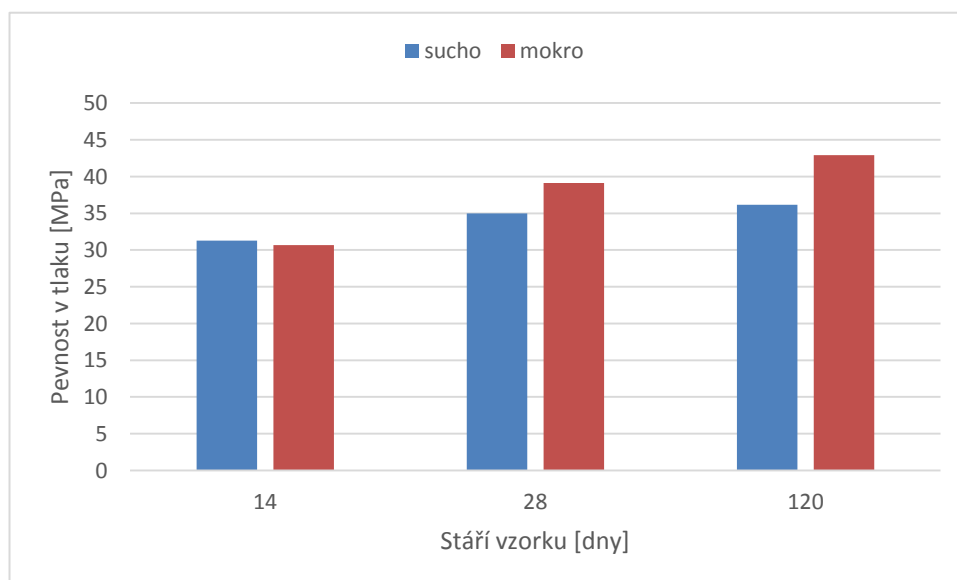
I v tomto případě se projevuje rostoucí pevnost vzorků se zmenšující se střední velikostí zrna pojiva. Nárůsty jsou pozvolnější, ale trvalé. Hodnoty obou mletých směsí okolo 35MPa při stáří 28 dní (Graf 4.31). Růst pevnosti mezi d<sub>50</sub>=7,0 a d<sub>50</sub>=9,5 byl 1,5% (28 dní pevnosti).



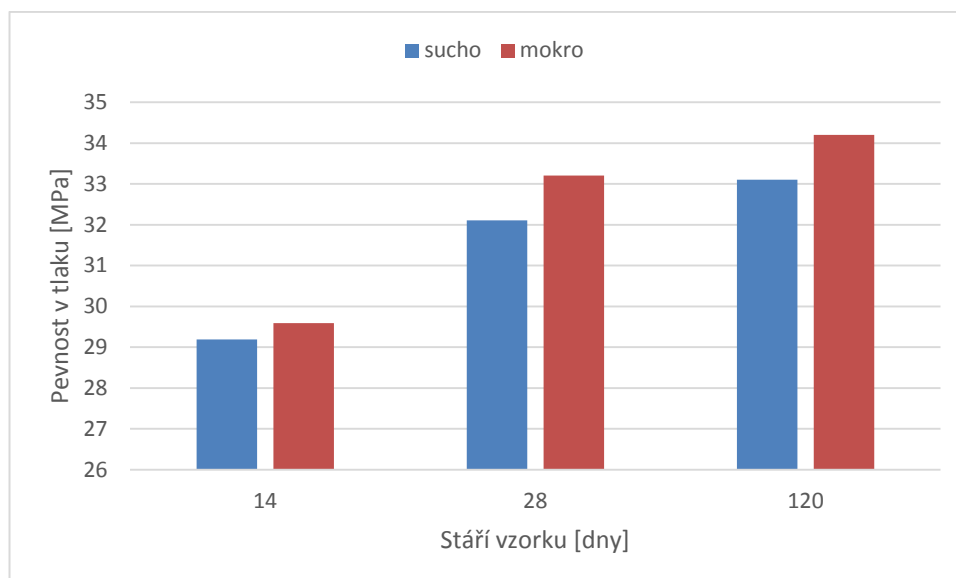
Graf 4.31 – Pevnost B-FPC 71, 75 a 79 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků

- **Vliv uložení**

U vzorků, v nichž je popílek ETH 20 a EPC spolu s vápnem nastává stabilizace růstu hodnot v obou uloženích. Při mokřém uložení vzorky nabývají vyšších konečných pevností (Graf 4.32 a Graf 4.33).



Graf 4.32 – Vliv uložení na mletou sérii (II) vzorků B-FPC 71



Graf 4.33 – Vliv uložení na nemletou sérii vzorků B-FPC 79

#### 4.1.11 SORFIX I - ETH 20 + EPC + Ca(OH)<sub>2</sub>

Ze složení v názvu podkapitoly můžeme vidět, že se jedná o složení stejné jako v předchozí kapitole 4.1.10. Rozdíl mezi nimi je v technologickém procesu, kde se melou všechny složky pojiva spolu zároveň. Druh nemletého SORFIXu tedy nemůže existovat a proto bylo přistoupeno k porovnání s nemletou směsí B-FPC 79.

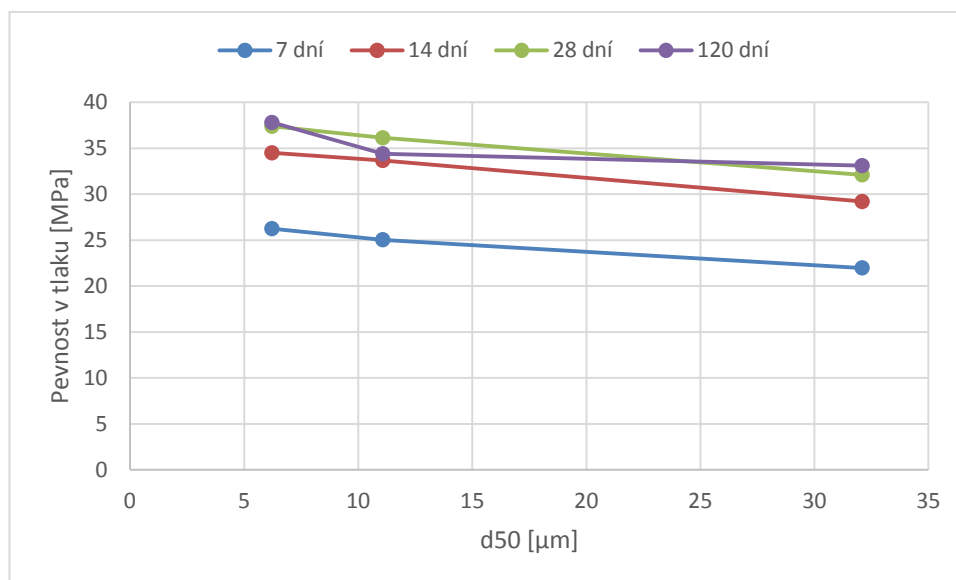
- **Rozdílná doba mletí**

Série	druh popílku	pevnost 28 dní [MPa]	mletí [ozn.-min]	vodní souč. v
B-FPC 79	ETH 20 + EPC + Ca(OH) <sub>2</sub>	32,10	0 - 0	0,4650
B-FPC 82	SORFIX I	37,39	IV - 45	0,4600
B-FPC 83	SORFIX I	36,13	II - 15	0,4600

Tab. 4.10 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 79, 82, 83

Nakonec i u posledních vzorků s ETH 20 můžeme pozorovat výrazný nárůst pevnosti se zmenšující se částicí střední velikosti zrna. Na Graf 4.34 můžeme také vidět potvrzení myšlenky o větších částicích EPC a vápna, jelikož v porovnání se střední velikostí zrna na ostatních grafech se hodnota při II. mletí změnila z 9,5 μm na 11,1 μm. Růst pevnosti mezi d<sub>50</sub>=6,2 a d<sub>50</sub>=11,1 byl 3,5% (28 dní pevnosti). Což je odpovídající vyšší hodnota vzhledem k menší hodnotě d<sub>50</sub>.

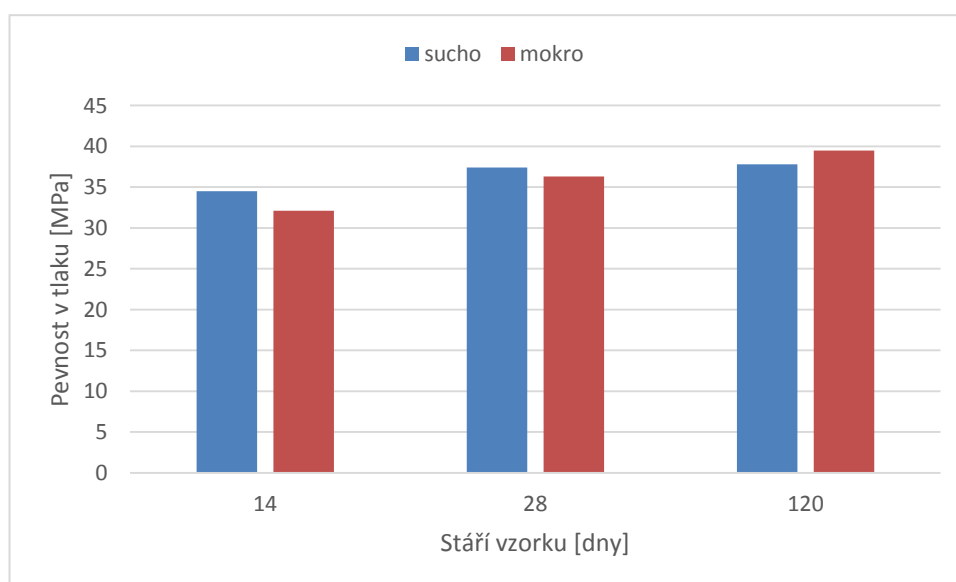




Graf 4.34 – Pevnost B-FPC 79, 82 a 83 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků

- **Vliv uložení**

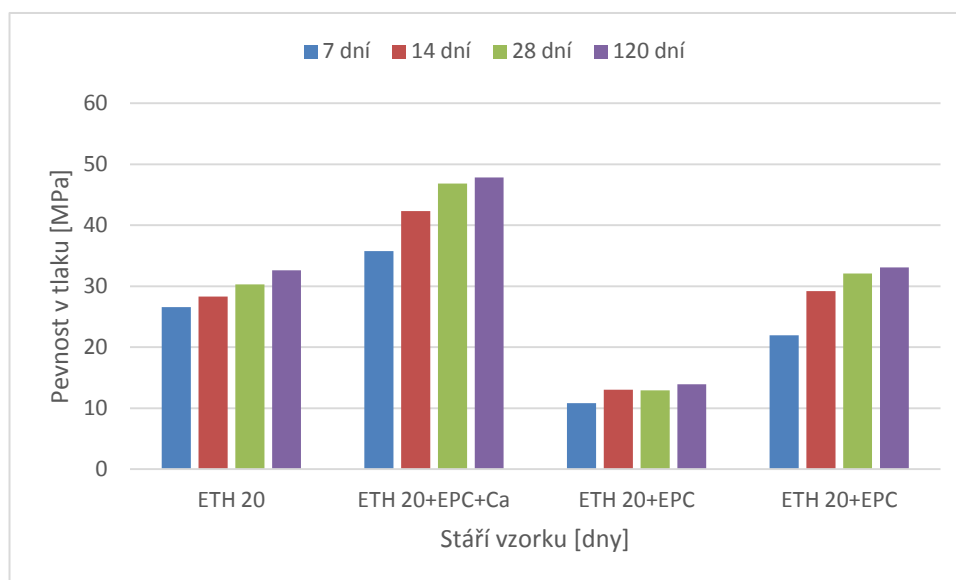
Společné mletí složek SORFIXů už nijak neovlivnilo chování vzorků v suchém/mokrém uložení. Výsledky uložení jsou proto shodné s předcházející kapitolou takto: U vzorků, v nichž je popílek ETH 20 a EPC spolu s vápnem nastává stabilizace růstu hodnot v obou uloženích. Při mokřém uložení vzorky nabývají vyšších konečných pevností (Graf 4.35).



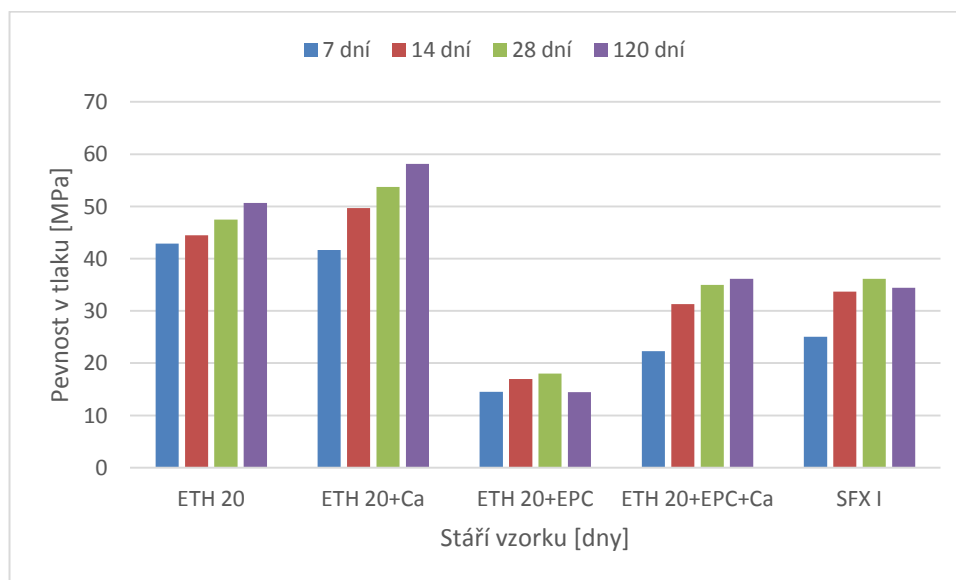
Graf 4.35 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 82

#### 4.1.12 Porovnání výsledků ETH 20

Z následujících grafů je patrné, že série s vysokoteplotním popílkem EPC dosahují nižších pevností v porovnání s ostatními sériemi. Hodnoty se po přidání hydroxidu vápenatého zvýší, což dokazuje, že vysokoteplotní popílky je nutné alkalicky aktivovat, aby byly schopné reagovat a měly požadované vazné účinky.

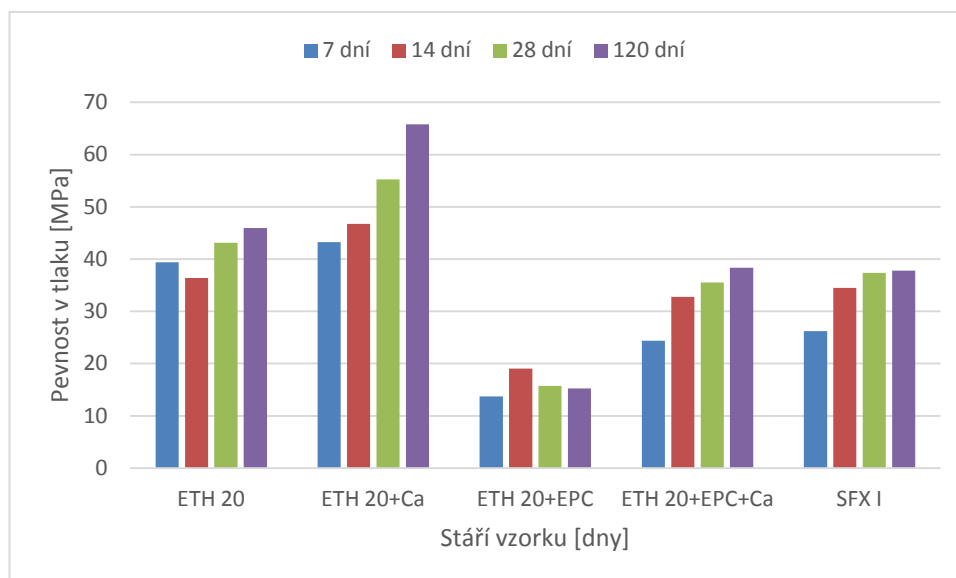


Graf 4.36 – Pevnost suše uložených nemletých ETH 20 s jednotlivými příměsemi



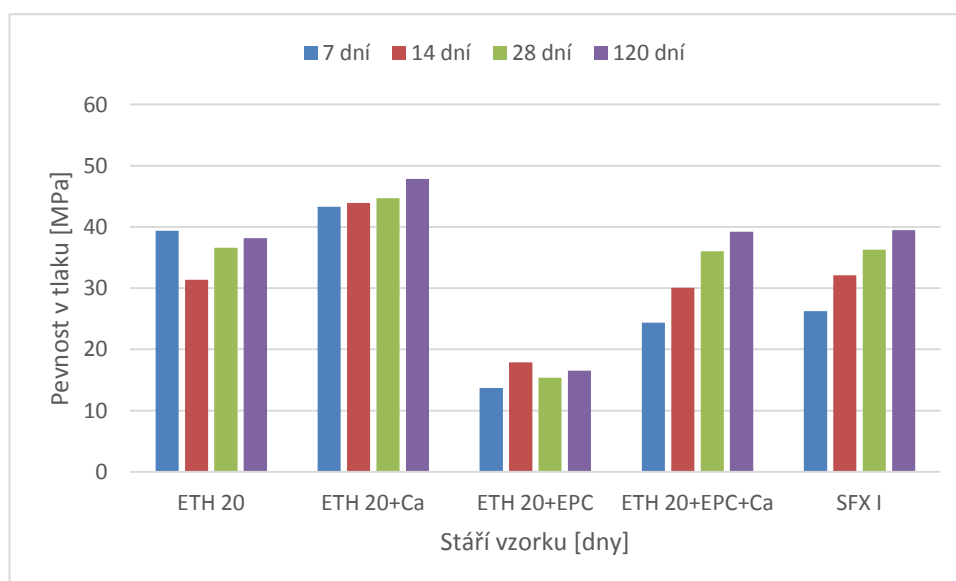
Graf 4.37 – Pevnost suše uložených mletých (II) ETH 20 s jednotlivými příměsemi

Zajímavé jsou poklesy 120-ti denních pevností napříč mletými, suše uloženými, sériemi s pojivem z ETH 20+EPC (Graf 4.37 a Graf 4.38).



Graf 4.38 – Pevnost suše uložených mletých (IV) ETH 20 s jednotlivými příměsemi

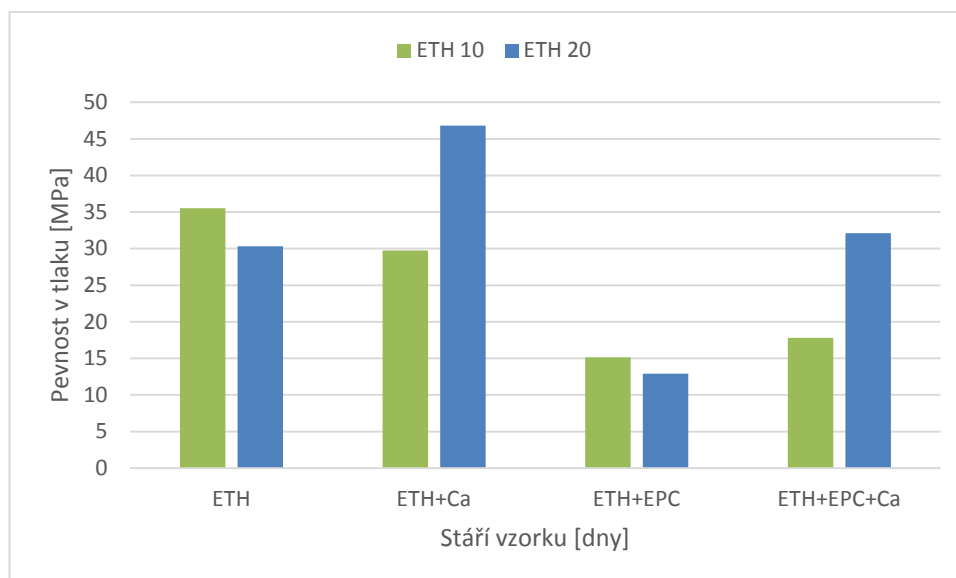
Z předchozích výsledků a následujícího grafu (Graf 4.39) můžeme postřehnout i stabilnější a trvalejší růst pevností vlivem mokrého uložení a přítomnosti hydroxidu vápenatého.



Graf 4.39 – Pevnost mokře uložených mletých (IV) ETH 20 s jednotlivými příměsemi

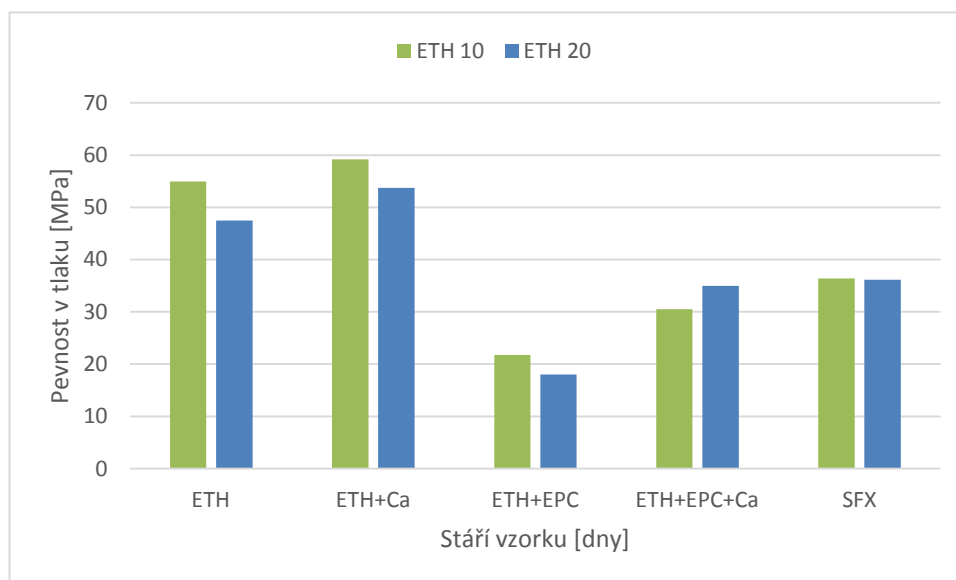
#### 4.1.13 ETH 10 vs. ETH 20

Z následujících grafů (Graf 4.40 a Graf 4.41) a předchozích výsledků lze soudit, že popílek ETH 10, sám o sobě, má lepší pojivové vlastnosti než popílek ETH 20.



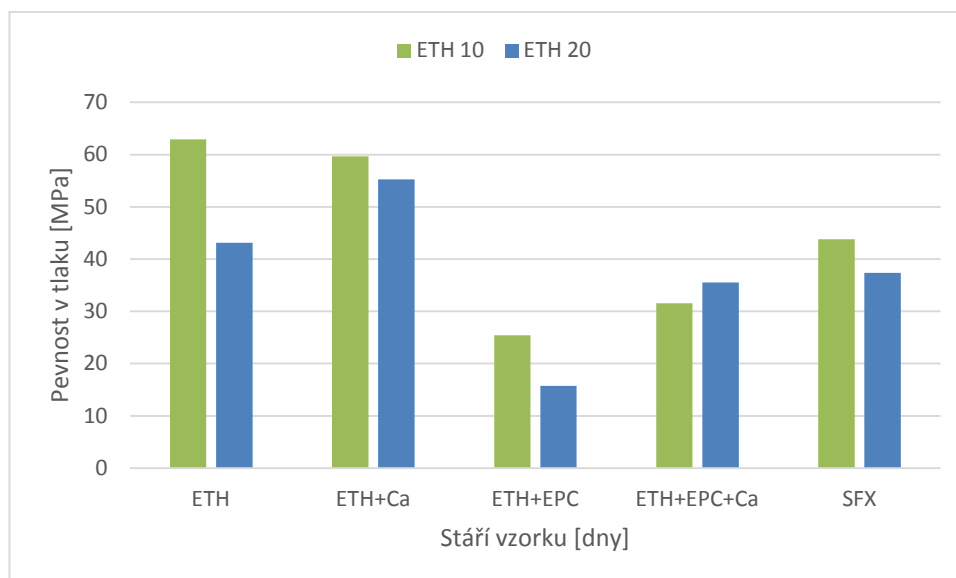
Graf 4.40 – Pevnosti na suchu (28 dní) nemletých fluidních popílků

Pokud však přidáme k ETH 20 vápno, tak se dosahované hodnoty pevností vyrovnají, dokonce v mnoha případech předčí. Hodnoty pevností s ETH 10. Této skutečnosti nahrává i fakt menšího obsahu CaO v popílku ETH 20 (12,7%) oproti popílku ETH 10 (19,2%).



Graf 4.41 – Pevnosti na suchu (28 dní) mletých (II) fluidních popílků

Pokud se napříč grafy podíváme na přírůstky pevností v závislosti na délce mletí, uvidíme, že delší mletí prospívá hlavně popílku ETH 10, který je hrubší a nemá sám o sobě tolik malých částic.



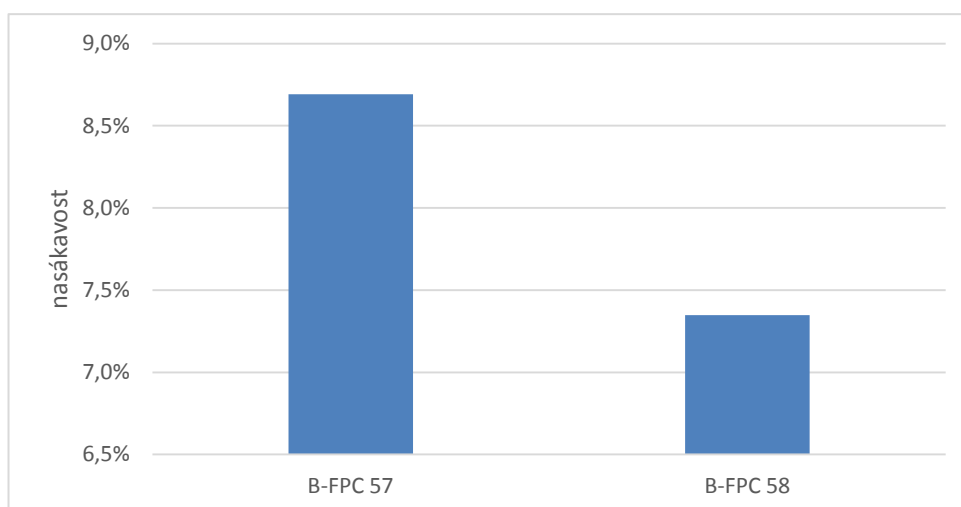
Graf 4.42 – Pevnosti na suchu (28 dní) mletých (IV) fluidních popílků

## 4.2 Nasákavost

V průběhu zkoušek nasákavosti se přišlo na fakt, že nasákavost není ani tak ovlivňována jemností mletí popílků, jako spíše vodním součinitelem. Je možné, že opačným procesem oproti normě došlo k přesušení vzorků a tak ke zkreslení výsledných nasákavostí.

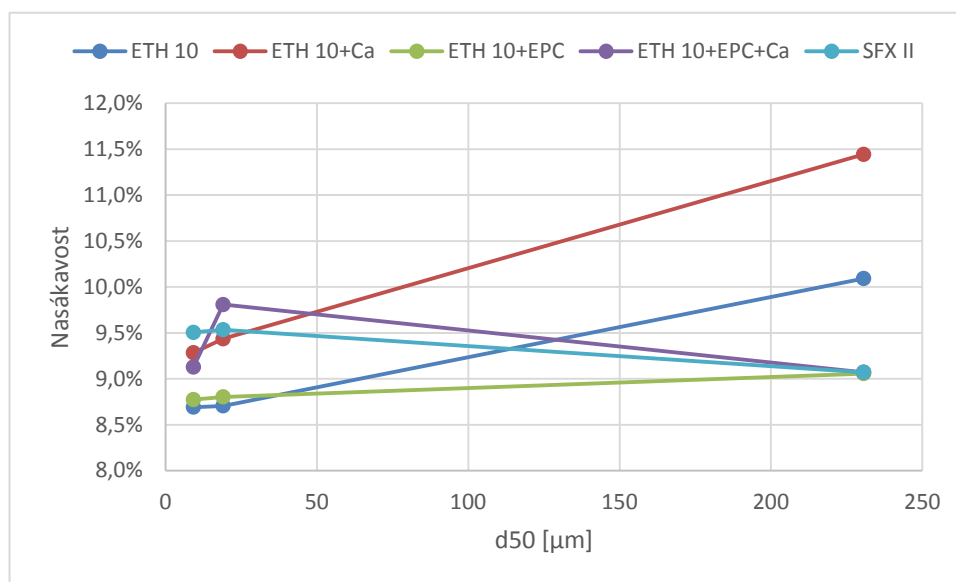
### 4.2.1 Nasákavost - ETH 10

Mezi dvěma referenčními sériemi B-FPC 57 a B-FPC 58, kde byl značný rozdíl v množství záměsové vody (Graf 4.6 – Vodní součinitel u sérií B-FPC 57 a B-FPC 58), se ukázal značný rozdíl v dosažené nasákavosti dosahující hodnoty 1,34%.



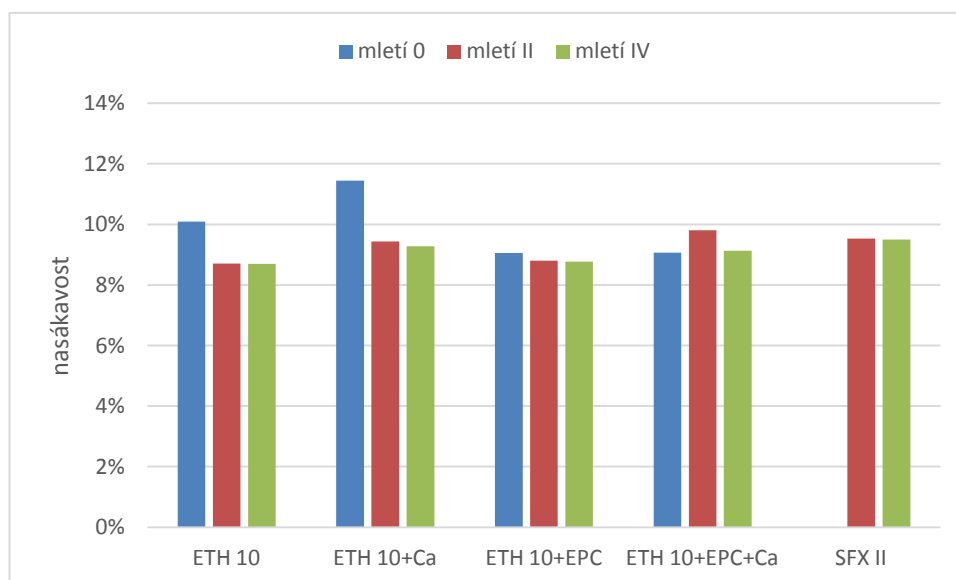
Graf 4.43 – Hodnoty nasákavostí u vzorků B-FPC 57 a B-FPC 58

Při srovnání jemnosti střední velikosti zrna ( $d_{50}$ ) a nasákavosti je patrná snižující se nasákavost pouze u pojiva ETH 10 a ETH 10 s vápnem. Na ostatní směsi pojiv má zmenšující se velikost středního zrna téměř žádný nebo záporný efekt (Graf 4.44).



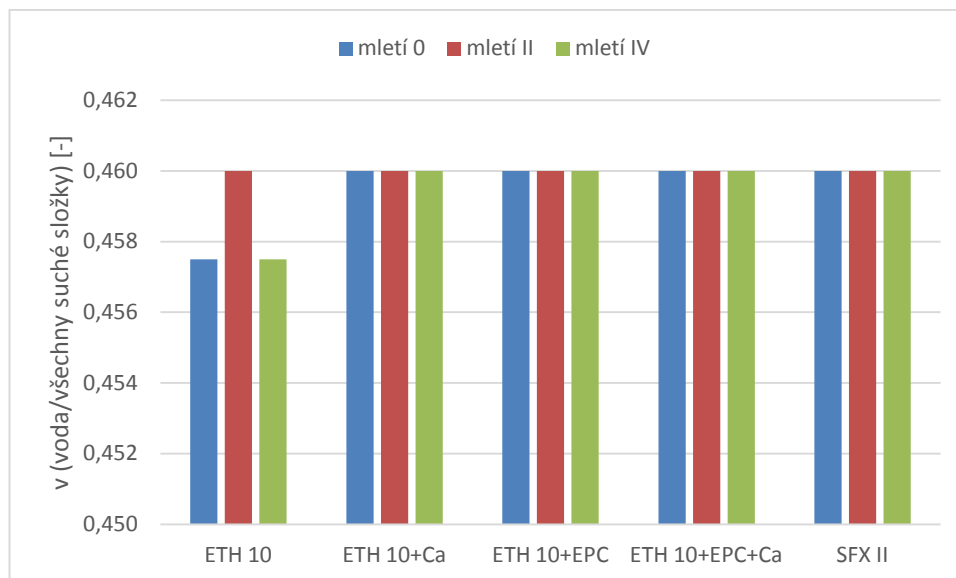
Graf 4.44 – Nasákavost ETH 10 v závislosti na jemnosti mletí

Na dalším grafu (Graf 4.45) můžeme vidět relativně konstantní hodnoty nasákavosti, které nevykazují žádný hlubší logický směr.



Graf 4.45 – Nasákavost ETH 10 v závislosti na složení

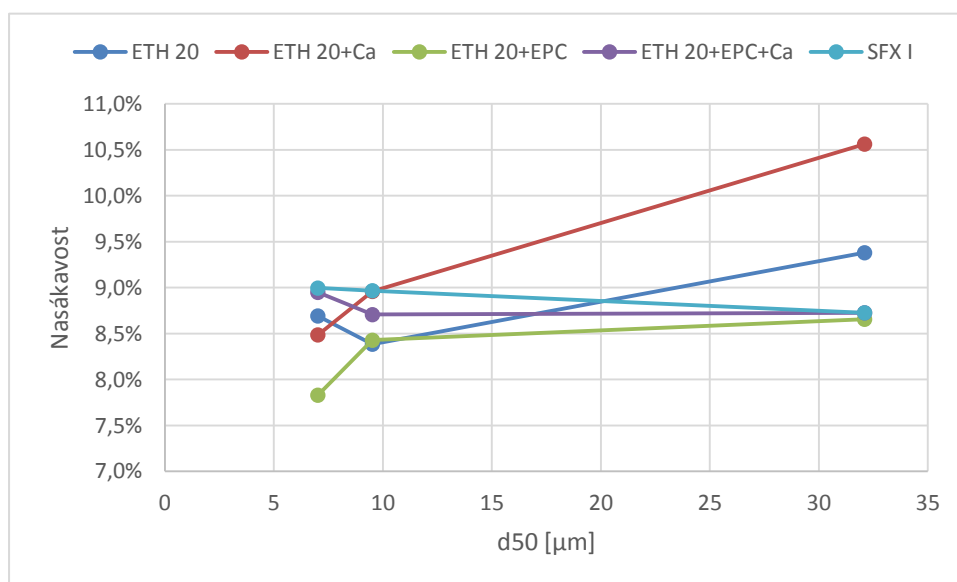
Do značné míry je to patrně tak proto, že u všech sérií byl zachován téměř konstantní vodní součinitel (Graf 4.46).



Graf 4.46 – Vodní součinitelé sérií s fluidním popílkem ETH 10

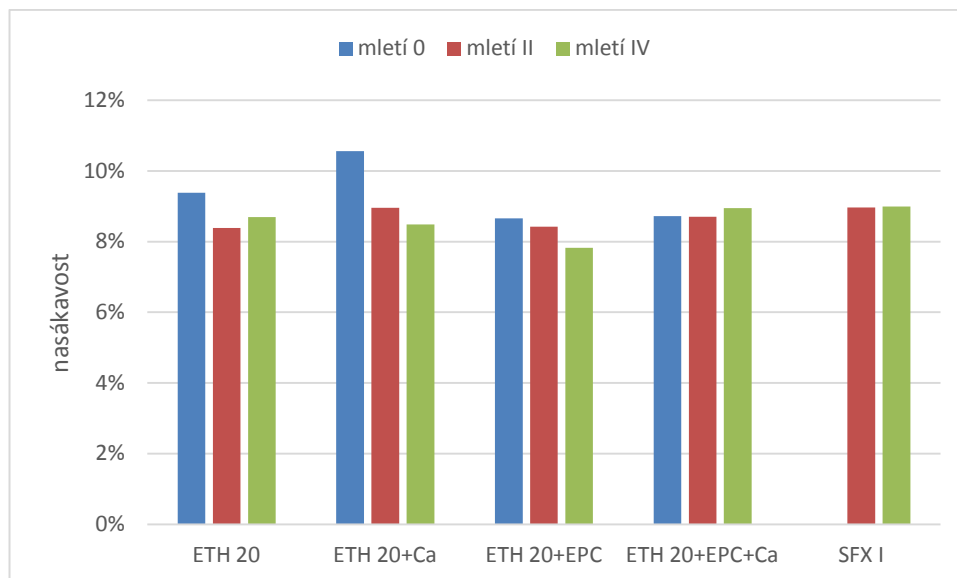
#### 4.2.2 Nasákavost - ETH 20

Fluidní popílky ETH 20 se zdají být nepatrně méně nasákové oproti popílkům ETH 10. Zajímavá je stejná snižující se hodnota nasákavosti u čistého pojiva ETH 20 a ETH 20 s vápnem (Graf 4.47). Tento stav naznačuje, že by mohl vývoj ovlivňovat popílek EPC.



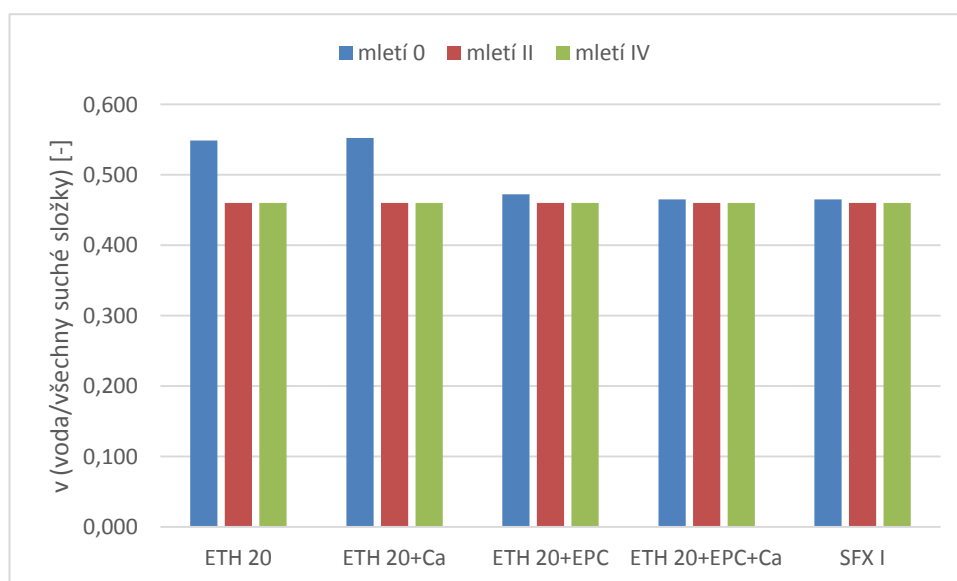
Graf 4.47 – Nasákavost ETH 20 v závislosti na jemnosti mletí

Na dalším grafu (Graf 4.48) můžeme vidět opět relativně konstantní hodnoty nasákavosti, které nevykazují žádný hlubší logický rámec.



Graf 4.48 – Nasákavost ETH 20 v závislosti na složení

Do značné míry je to opět patrně tak proto, že u všech sérií byl zachován téměř konstantní vodní součinitel. S myšlenkou vodního součinitele ovlivňujícího nasákavost zde korespondují dvě vyšší hodnoty v následujícím grafu (Graf 4.49).



Graf 4.49 – Vodní součinitel sérií s fluidním popilkem ETH 20



### 4.3 CHRL

Veškeré výsledky dodané zkušební laboratoří jsou uvedené v Tab. 4.11. Z hodnot odpadů po 25 cyklech vyplývá, že by pouze jeden, maximálně dva, vzorky splnily kritérium pro použití betonu na výrobu částí vozovky dle ČSN EN 1338. Norma ČSN 73 1326 hodnotí vzorky jako rozpadlé.

Série	Stáří vzorku [dny]	CHRL							
		25 cyklů		50 cyklů		75 cyklů		100 cyklů	
		g	g/m <sup>2</sup>	g	g/m <sup>2</sup>	g	g/m <sup>2</sup>	g	g/m <sup>2</sup>
B-FPC 57	153	50	<b>2873,4</b>	102,9	<b>5475,4</b>				
B-FPC 58	146	14,2	<b>770,1</b>	29,8	<b>1616,2</b>	42,4	<b>2299,6</b>	81,7	<b>4431,1</b>
B-FPC 59	139	189,5	<b>9036,7</b>	471,4	<b>22479,7</b>				
B-FPC 60	139	70,2	<b>2575,4</b>	174,5	<b>6401,8</b>				
B-FPC 61	118	88,7	<b>2914,9</b>	202	<b>6638,2</b>				
B-FPC 62	111	21,6	<b>945,3</b>	41,7	<b>1824,9</b>	70,6	<b>3089,6</b>	81,8	<b>3579,7</b>
B-FPC 63	111	362	<b>12387,1</b>	696,4	<b>23829,7</b>				
B-FPC 64	104	89,7	<b>3860,6</b>	212,4	<b>9141,4</b>				
B-FPC 65	90	52,5	<b>2147,4</b>	132,3	<b>5411,5</b>				
B-FPC 66	111	387,9	<b>17296,9</b>						
B-FPC 67	111	25,2	<b>1012,4</b>	46,5	<b>1868,1</b>	73,2	<b>2940,8</b>	117,9	<b>4736,7</b>
B-FPC 68	104	195,8	<b>6887,3</b>	609,3	<b>21432,3</b>				
B-FPC 69	104	556,1	<b>23149,6</b>						
B-FPC 70	97	555,2	<b>21999,4</b>						
B-FPC 71	97	71,2	<b>2875</b>	168,3	<b>6795,9</b>	282,5	<b>11407,2</b>	419,3	<b>16931,2</b>
B-FPC 72	97	13,5	<b>5454</b>	201,8	<b>10633,9</b>				
B-FPC 73	90	517,3	<b>22654,8</b>						
B-FPC 74	90	658,5	<b>26494,7</b>						
B-FPC 75	111	105,1	<b>3887,4</b>	182,1	<b>6735,5</b>	252,6	<b>9343,1</b>	354,8	<b>13123,2</b>
B-FPC 76	104	79,7	<b>3206,1</b>	163,8	<b>6589,2</b>	296,1	<b>11911,2</b>	409,1	<b>16456,8</b>
B-FPC 77	104	520	<b>20977,9</b>						
B-FPC 78	104	506,5	<b>20315,3</b>						
B-FPC 79	97	72,2	<b>2730,5</b>	114,7	<b>4337,8</b>	140,4	<b>5309,7</b>	162,4	<b>6141,7</b>
B-FPC 80	97	74,3	<b>3255,9</b>	137,7	<b>6034,2</b>	216,2	<b>9474,1</b>	261,1	<b>11447,7</b>
B-FPC 81	97	537	<b>23929,4</b>						
B-FPC 82	90	125	<b>5210,1</b>	258,6	<b>10778,6</b>	347,1	<b>14467,3</b>		
B-FPC 83	90	90,3	<b>3892,6</b>	187,7	<b>8091,2</b>	248,6	<b>10716,4</b>	289,9	<b>12496,8</b>
B-FPC 84	88	67,5	<b>2635,8</b>	108,4	<b>4232,9</b>	132,1	<b>5158,3</b>	153,3	<b>5986,2</b>
B-FPC 85	88	76,6	<b>2691,2</b>	117,8	<b>4138,7</b>	143,1	<b>5027,6</b>	171,5	<b>6025,4</b>

Tab. 4.11 – Tabulka výsledků CHRL

Jak už bylo zmíněno v teoretické části (kap. 2.1.3), odolnost proti CHRL je problémem i u cementových betonů. Porovnání z prací zabývajících se odolností betonu vůči CHRL byla sestavena Tab. 4.12.

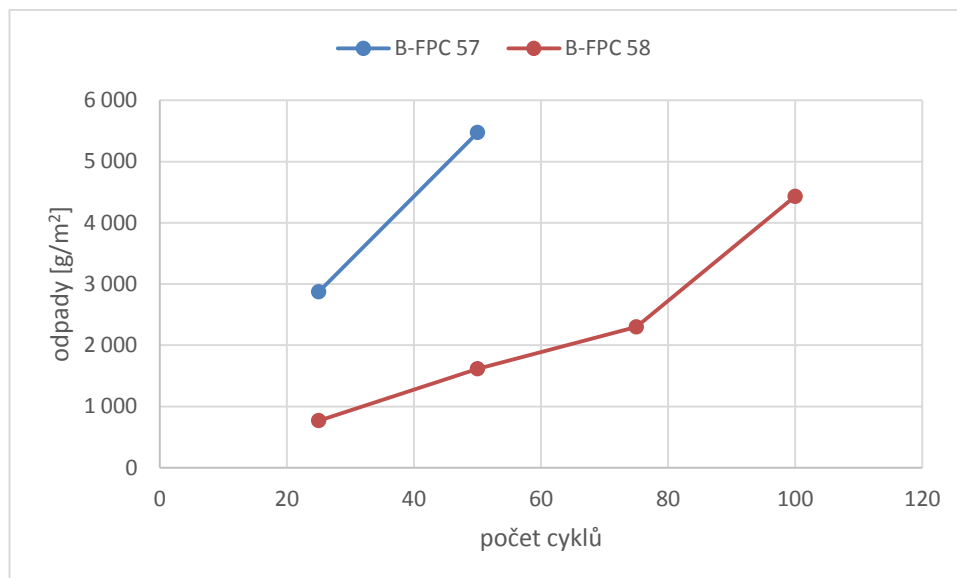
Beton	Odpad po cyklech [g/m <sup>2</sup> ]		w/c	pevnost 28 dní [MPa]
	25	50		
Cementový +30% pop.	250	-	0,450	47
Cementový +30% pop.	350	-	0,550	36
Cementový +30% pop.	500	-	0,310	52,7
Cementový +30% pop.	550	-	0,640	33
ETH 20	770	1616	0,403	60,9
Cementový +58% pop.	1800	2000	0,390	34,1
Cementový 42,5R	2361	15560	0,656	33,2
Cementový 42,5R	2417	10552	0,589	44,9
ETH 20+EPC+Ca	2730	4338	0,535	32,1
ETH 10	2873	5475	0,458	61,1
ETH 10+EPC+Ca	2915	6638	0,529	17,8
ETH 20+Ca	3256	6034	0,635	46,8
Cementový +58% pop.	4750	5750	0,650	41,6
Cementový 42,5R	5564	rozpad	0,784	21,4
ETH 10+Ca	6887	21432	0,529	29,8

*Tab. 4.12 – Výsledky odpadů cementových bet. z vybraných prací, s betony z fluidních popílků [26][38]*

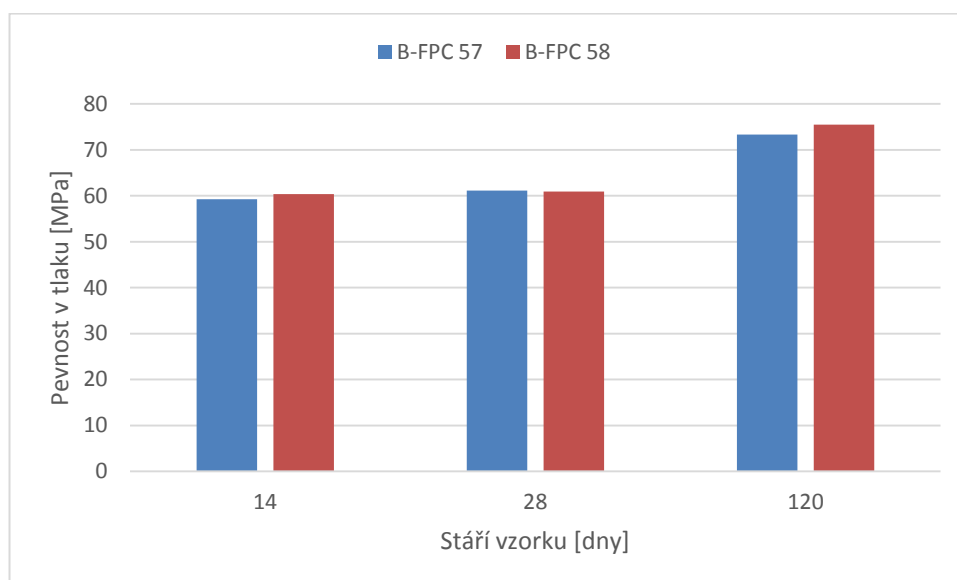
Ze zaznamenaných výsledků je patrné, že nejlepší odolnost proti CHRL vykazují cementové betony s příměsí popílku do 30%. Rozdíl v odpadech je oproti ostatním betonům o řád nižší. Cementové betony bez přidaných přísad a příměsí dosáhly obdobných hodnot jako betony z fluidních popílků.

#### 4.3.1 CHRL - ETH 10

Začneme opět referenčními směsmi, které se lišily pouze vodními součiniteli (Graf 4.6 – Vodní součinitel u sérií B-FPC 57 a B-FPC 58). Z grafu níže (Graf 4.50) je jasně patrné, že série B-FPC 58 s menším vodním součinitelem vykazuje daleko menší odpady než série B-FPC 57 s vyšším vodním součinitelem při zachování téměř shodných pevností (Graf 4.51).

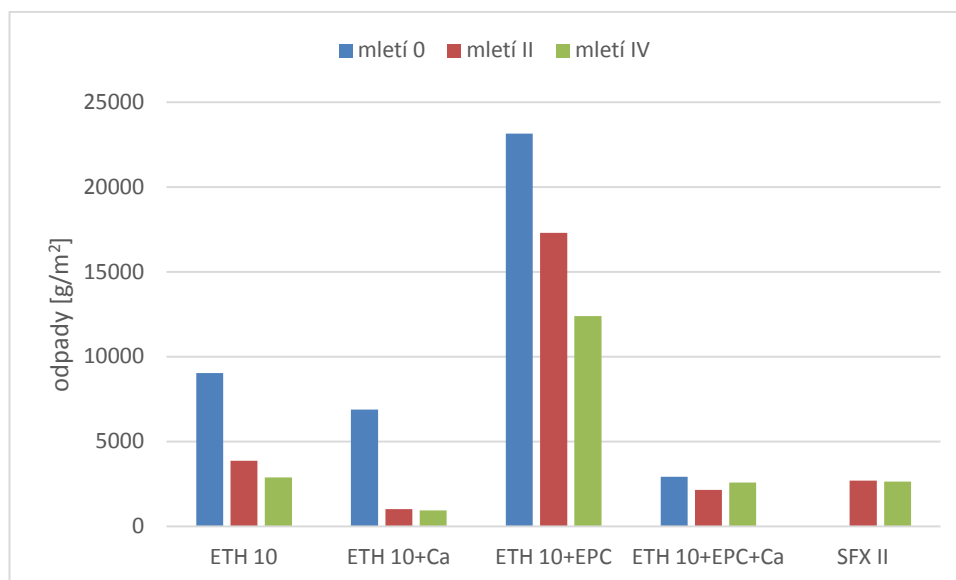


Graf 4.50 – Vliv vodního součinitele na odpady sérií B-FPC 57 a B-FPC 58



Graf 4.51 – Pevnosti mokře uložených sérií B-FPC 57 a B-FPC 58

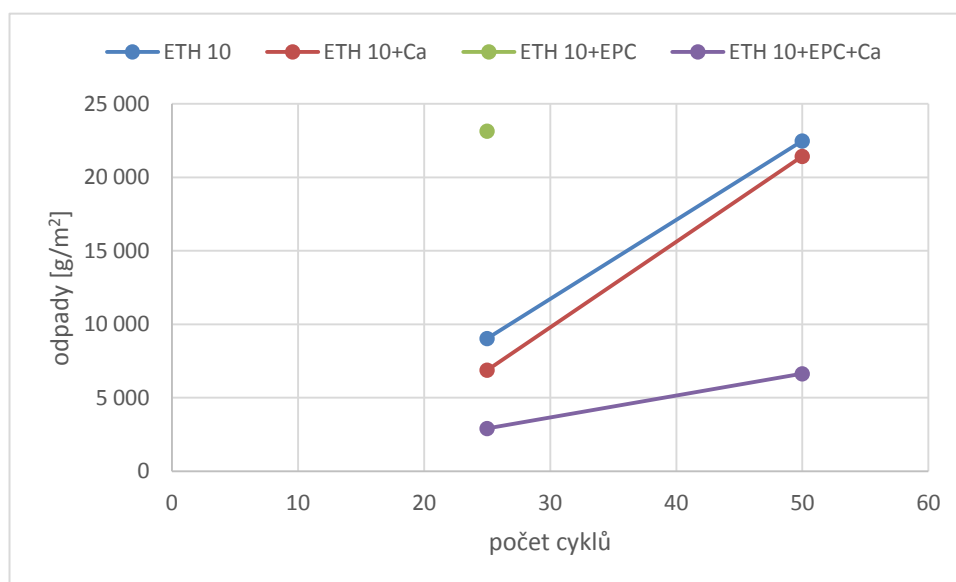
To by naznačovalo, že by odolnost betonů z fluidních popílků nezávisela na pevnosti, ale na vodním součiniteli, potažmo na nasákavosti, kterou vodní součinitel ovlivnil (viz. kap. 4.2 - Nasákavost).



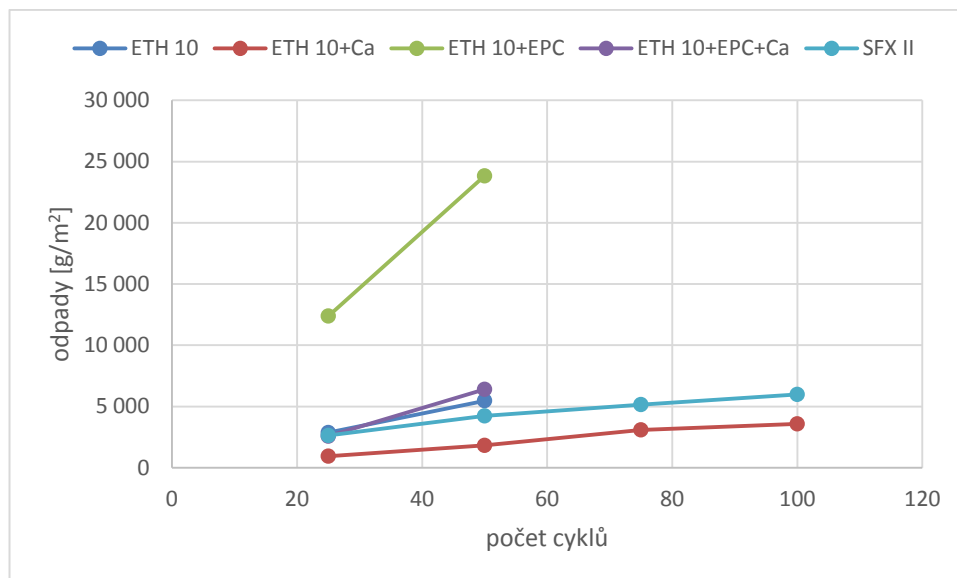
Graf 4.52 – Závislost odpadů (25 cyklů) na složení betonů s ETH 10

Když se podíváme na graf odpadů v závislosti na složení betonů výše (Graf 4.52), můžeme vidět zřetelný vliv přidaného vápna na menší odpady. Také si můžeme povšimnout vyšších odpadů u směsi s vysokoteplotním popílkem EPC.

Zdá se, že pozitivní vliv na odolnost proti CHRL má i úprava popílků mletím, které je patrné při porovnání hodnot z grafů Graf 4.53 a Graf 4.54.

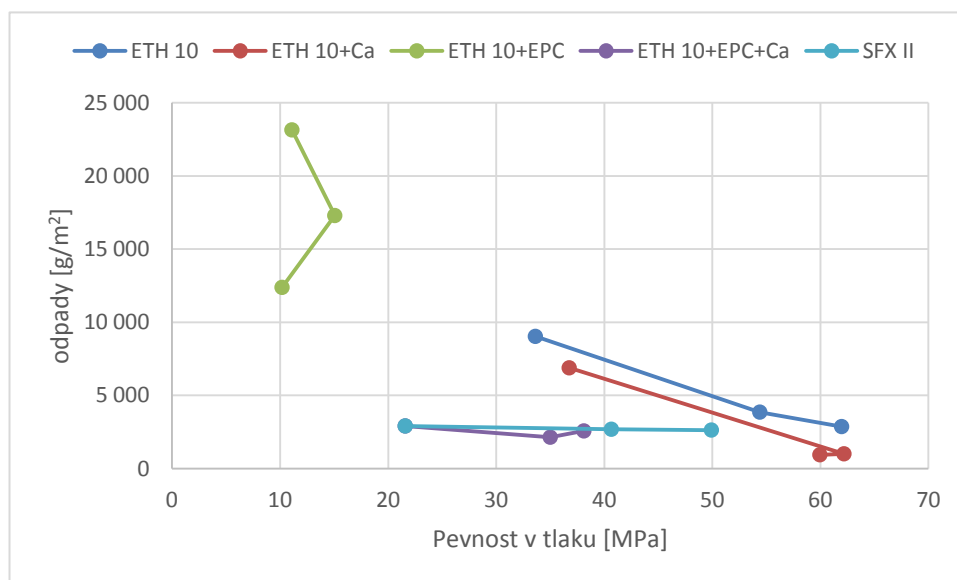


Graf 4.53 – Výsledky odpadů nemletého popílku ETH 10 na odolnost proti CHRL



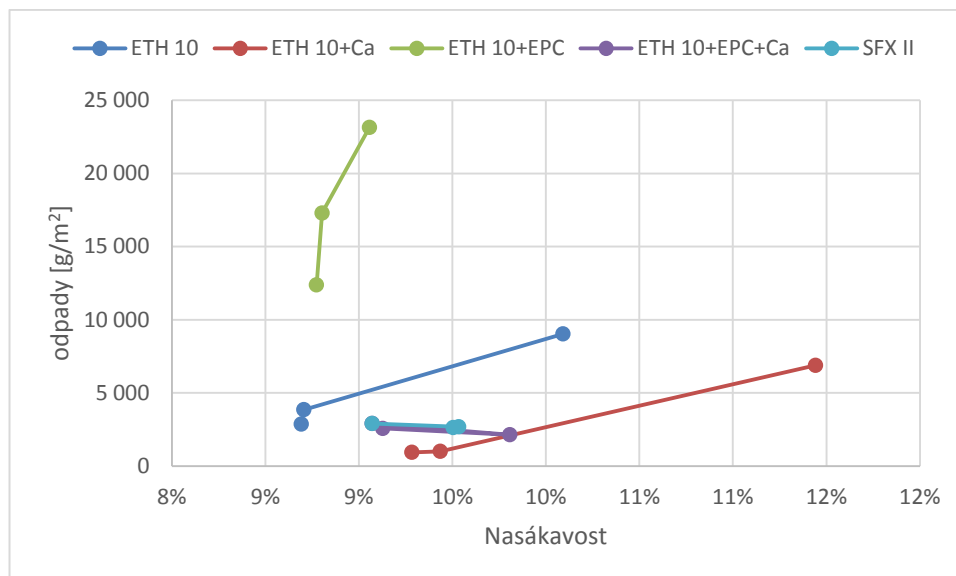
Graf 4.54 – Výsledky odpadů mletého (IV) popílku ETH 10 na odolnost proti CHRL

V následujícím grafu (Graf 4.55) lze naleznout částečné potvrzení teze, že pevnost není hlavní faktor, který by ovlivňoval odolnost FPC betonů proti působení CHRL. Trend rostoucích odpadů s klesající pevností mají pouze dvě série vzorků a to série se samotným popílkem ETH 10 a popílkem ETH 10 s příměsí vápna.



Graf 4.55 – Závislost odpadů na pevnostech různě mletých popílků ETH 10

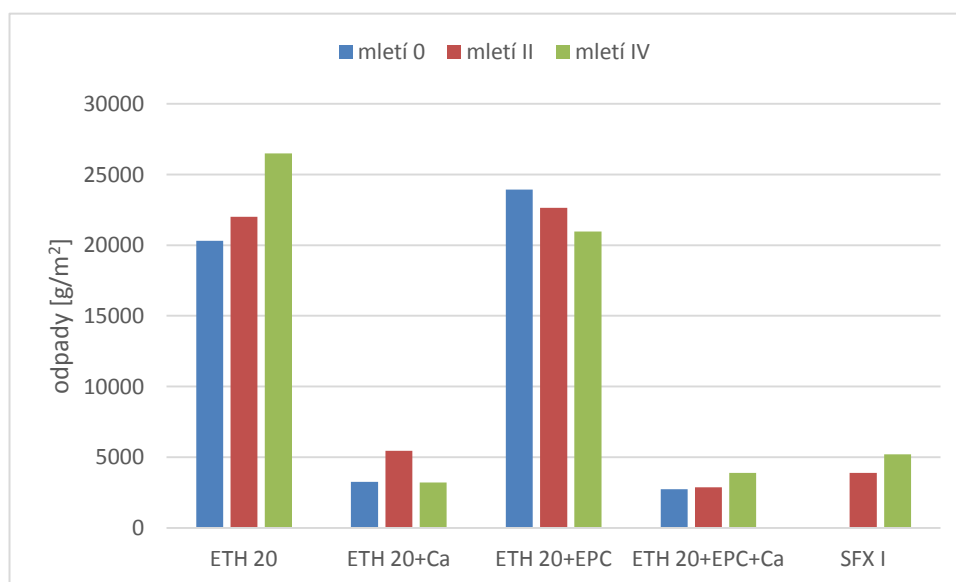
Opět až na dvě série, se samotným popílkem ETH 10 a popílkem ETH 10 s příměsí vápna, se nepotvrzuje ani myšlenka menší odolnosti proti CHRL spolu s větší nasákavostí (Graf 4.56).



Graf 4.56 – Závislost odpadů (25 cyklů) na nasákavosti různě mletých popílků ETH 10

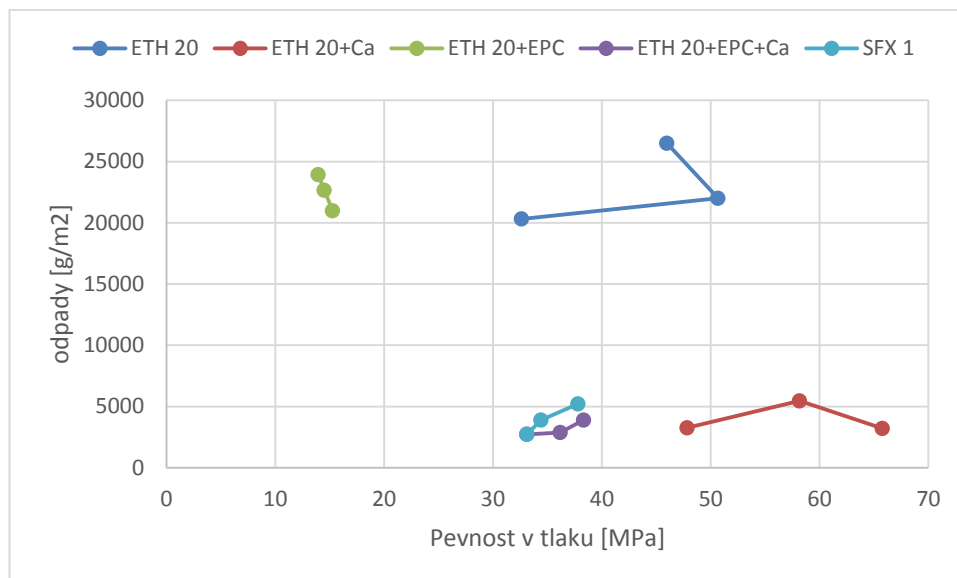
#### 4.3.2 CHRL - ETH 20

U tohoto fluidního popílku se potvrdil extrémně příznivý vliv hydroxidu vápenatého na odolnost FPC betonů proti CHRL. Z grafu (Graf 4.57) není už tak patrná závislost odolnosti na úpravě popílku mletím, což může být způsobeno již jemnější strukturou popílku ETH 20.



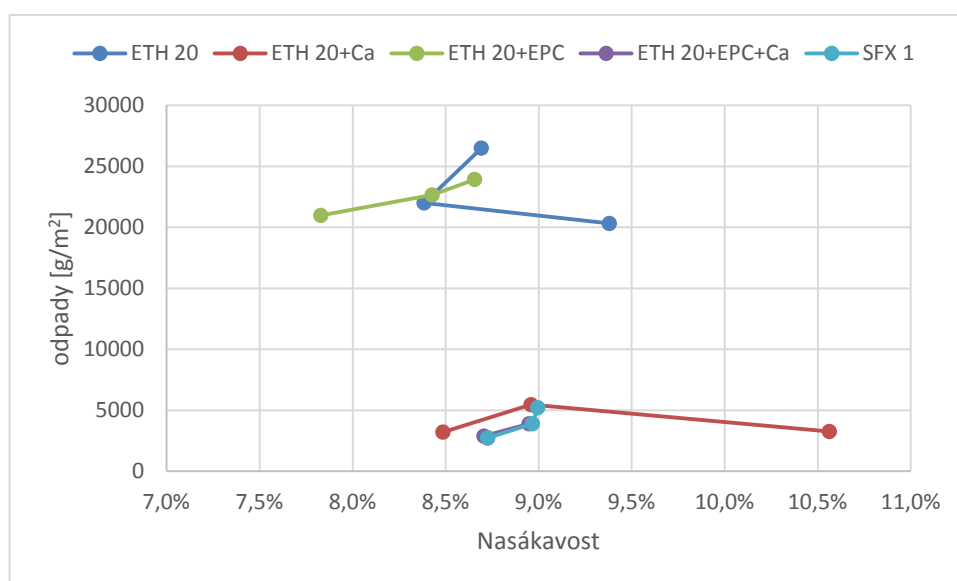
Graf 4.57 – Závislost odpadů (25 cyklů) na složení betonů s ETH 20

Jakákoliv spojitost pevnosti FPC betonů s odolností proti chemickým rozmrazovacím látkám z následujícího grafu (Graf 4.58) nevyplývá. A proto se zdá být tento vztah definitivně vyvrácen.



Graf 4.58 – Závislost odpadů (25 cyklů) na pevnostech různě mletých popílků ETH 20

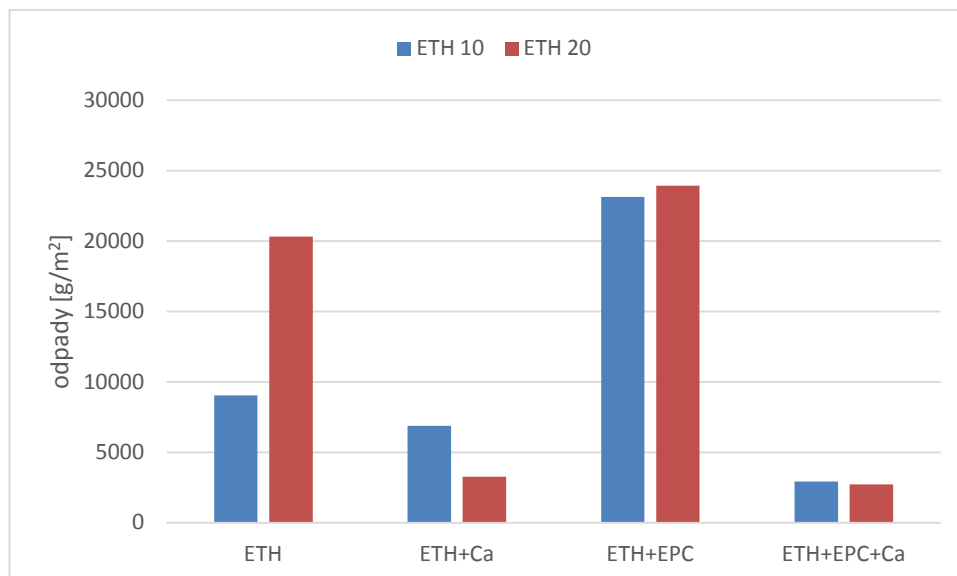
Ani v následujícím případě (Graf 4.59) není patrný jakýkoliv logický rámec, který by poukazoval na souvislost vyšší nasákavosti s vyšším množstvím odpadů.



Graf 4.59 – Závislost odpadů (25 cyklů) na nasákavosti různě mletých popílků ETH 20

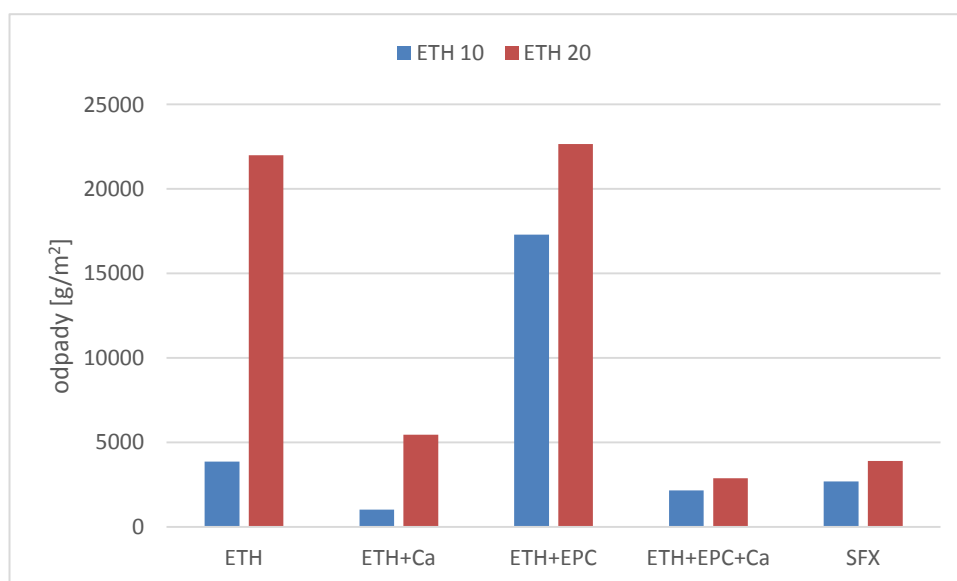
### 4.3.3 CHRL - ETH 10 vs. ETH 20

Při porovnání fluidních popílků můžeme pozorovat lepší výsledky popílku ETH 10, které jsou patrně způsobeny vyšším obsahem CaO v něm obsaženém (Graf 4.60).



Graf 4.60 – Porovnání odpadů (25 cyklů) nemletých fluidních popílků

Extrémně vysoké hodnoty odpadů u směsí popílků ETH 20 bez přidaného vápna lze vysvětlit snad jen morfologií částic tohoto pojiva. Příznivý vliv mletí je patrný při konfrontaci předchozího grafu (Graf 4.60) s Graf 4.61.



Graf 4.61 – Porovnání odpadů (25 cyklů) mletých (II) fluidních popílků

#### 4.4 Karbonatace

Jelikož měla většina zbarvených vzorků rozdílnou hodnotu vzdálenosti fialové hranice od horního okraje oproti okraji dolnímu, bylo přistoupeno k dvojímu měření a zapisování výsledku ve formátu x/y. Kde první údaj „x“ značí hodnotu při horním okraji a druhý „y“ hodnotu při okraji dolním. Hodnota 100 znamená, že



vzorek nejevil známky po fialové barvě, bylo tedy bezbarvých celých 100mm (viz. Kapitola 3.3.4 - Fenolftaleinové zkoušky).

Veškeré výsledky fenolftaleinové zkoušky jsou utříděny v Tab. 4.13. Z naměřených hodnot jasně vyplývá, že u vzorků bez přidaného  $\text{Ca(OH)}_2$  došlo patrně vlivem karbonatace nebo reakcí při tvrdnutí ke ztrátě zásaditého charakteru prostředí. Jedinou výjimkou je vzorek B-FPC 70 C, který byl patrně díky zamezení přístupu oxidu uhličitého slabě nafialovělý.

Také by se mohlo dít to, že je u některých FPC betonů hydroxid vápenatý v jiné formě na kterou fenolftalein nereaguje. To by znamenalo, že bezbarvé vzorky ještě nutně nemusejí vykazovat ztrátu zásaditého prostředí. Tuto tezi by bylo nutné podpořit dalšími zkouškami.

Norma říká, že tato metoda nedokáže rozlišit, zda je ztráta alkality způsobena karbonatací nebo jinou příčinou, jakou může být například vystavení kyselinám nebo kyselým plynům.

To vedlo autora k myšlence, zda nedošlo v laboratoři k vystavení vzorků kyselým plynům. Tato myšlenka je však vyvrácena shodnými výsledky v návaznosti na jiné uložení. Pokud by tedy bylo v laboratoři kyselé plynné prostředí a došlo by tak k ovlivnění vzorků 74B a 78B, neměly by vzorky stejného složení uložené pod vodou (74C a 78C) vykazovat stejný stav karbonatace.

Postupem času bylo vypořazováno, že k rozdílným hloubkám zasažení karbonatací dochází na straně, kterou se krychle dotýkala podložky. Tomuto faktu nahrává i mechanika procesu karbonatace, kdy se  $\text{CO}_2$  do vzorku dostává povrchem tělesa spolu se vzdušnou vlhkostí a rovněž fakt, že rozdílných hodnot bylo naměřeno pouze u suše uložených vzorků s označením B.



Série	Hl. pojivo	Vedl. pojiva	Mletí	FF zk. [mm]
B-FPC 70 B	ETH 20	-	II	100
B-FPC 74 B	ETH 20	-	IV	100
B-FPC 74 C	ETH 20	-	IV	100
B-FPC 78 B	ETH 20	-	0	100
B-FPC 78 C	ETH 20	-	0	100
B-FPC 66 B	ETH 10	EPC	II	100
B-FPC 66 C	ETH 10	EPC	II	100
B-FPC 69 B	ETH 10	EPC	0	100
B-FPC 69 C	ETH 10	EPC	0	100
B-FPC 73 B	ETH 20	EPC	II	100
B-FPC 73 C	ETH 20	EPC	II	100
B-FPC 77 B	ETH 20	EPC	IV	100
B-FPC 77 C	ETH 20	EPC	IV	100
B-FPC 81 B	ETH 20	EPC	0	100
B-FPC 81 C	ETH 20	EPC	0	100
B-FPC 67 B	ETH 10	+Ca	II	3/1
B-FPC 68 B	ETH 10	+Ca	0	3/1
B-FPC 76 B	ETH 20	+Ca	IV	2/2
B-FPC 80 B	ETH 20	+Ca	0	7/2
B-FPC 72 B	ETH 20	+Ca	II	5/3
B-FPC 84 B	SFX II	-	IV	6/3
B-FPC 71 B	ETH 20	EPC+Ca	II	7/4
B-FPC 79 B	ETH 20	EPC+Ca	0	7/4
B-FPC 65 B	ETH 10	EPC+Ca	II	8/5
B-FPC 75 B	ETH 20	EPC+Ca	IV	15/6
B-FPC 85 B	SFX II	-	II	12/8
B-FPC 83 B	SFX I	-	II	9/10
B-FPC 82 B	SFX I	-	IV	10/11
B-FPC 82 C	SFX I	-	IV	0/0
B-FPC 83 C	SFX I	-	II	0/0
B-FPC 84 C	SFX II	-	IV	0/0
B-FPC 85 C	SFX II	-	II	0/0
B-FPC 67 C	ETH 10	+Ca	II	0/0
B-FPC 68 C	ETH 10	+Ca	0	0/0
B-FPC 72 C	ETH 20	+Ca	II	0/0
B-FPC 76 C	ETH 20	+Ca	IV	0/0
B-FPC 80 C	ETH 20	+Ca	0	0/0
B-FPC 65 C	ETH 10	EPC+Ca	III	0/0
B-FPC 71 C	ETH 20	EPC+Ca	II	0/0
B-FPC 75 C	ETH 20	EPC+Ca	IV	0/0
B-FPC 79 C	ETH 20	EPC+Ca	0	0/0
B-FPC 70 C	ETH 20	-	II	0/0 slabá bar.

Tab. 4.13 – Výsledky fenolftaleinových zkoušek



*Obr. 4.1 – Rozdílná hloubka karbonatace u vzorku B-FPC 84 B*

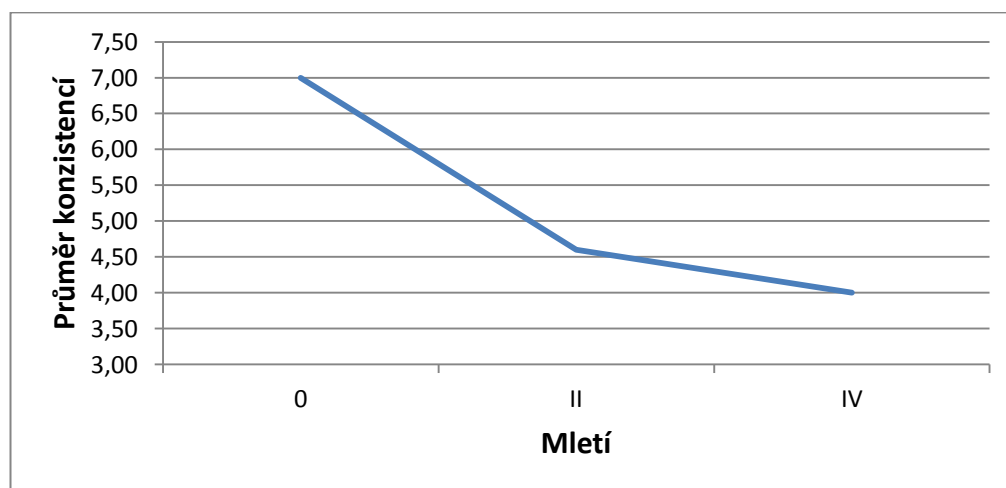
Dle výsledků dochází u FPC betonů ke karbonataci běžně do 10mm s maximy mezi 12-15mm. Což by mohlo být bráno za přijatelnou hodnotu za předpokladu, že by již karbonatace nepostupovala a krycí vrstva výztuže 20mm by byla dodržena u celé konstrukce.

#### **4.5 Konzistence**

Z výsledků konzistencí (Tab. 4.14) a jejich průměrů (Graf 4.62) se zdá být potvrzená spojitost s jemností mletí, kdy překvapivě nemleté směsi vykazovaly horší zpracovatelnost.

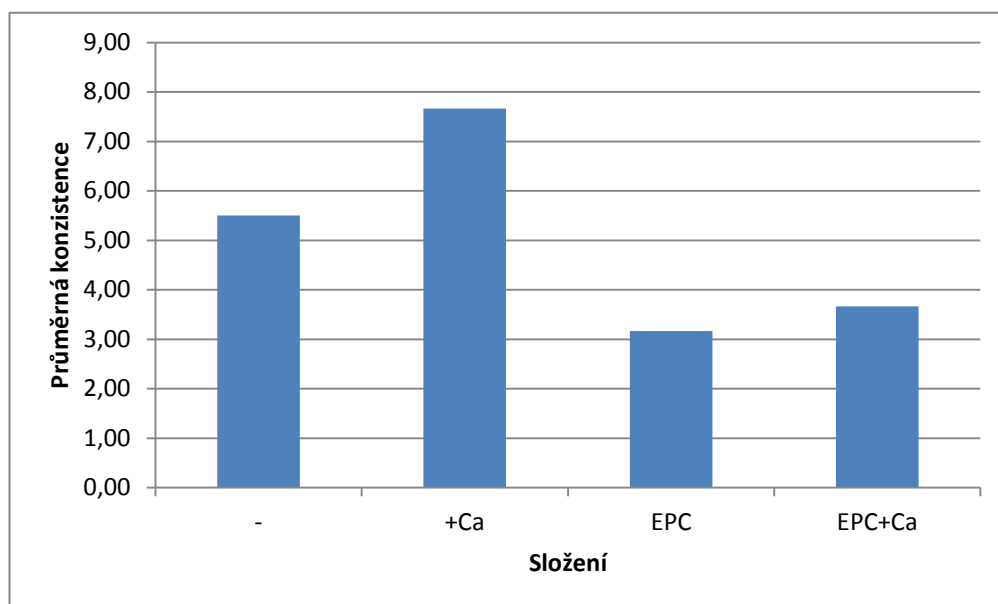
Série	Hl. pojivo	Vedl. pojiva	Mletí	Konzistence	Vod. Souč. v	Nasákavost [%]
B-FPC 60	ETH 10	EPC+Ca	IV	1	0,4600	8,90
B-FPC 63	ETH 10	EPC	IV	1	0,4600	8,53
B-FPC 66	ETH 10	EPC	II	1	0,4600	8,57
B-FPC 77	ETH 20	EPC	IV	1	0,4600	7,63
B-FPC 59	ETH 10	-	0	2	0,4575	9,80
B-FPC 65	ETH 10	EPC+Ca	II	2	0,4600	9,50
B-FPC 73	ETH 20	EPC	II	2	0,4600	8,18
B-FPC 71	ETH 20	EPC+Ca	II	3	0,4600	8,51
B-FPC 75	ETH 20	EPC+Ca	IV	3	0,4600	8,72
B-FPC 57	ETH 10	-	IV	4	0,4575	8,55
B-FPC 61	ETH 10	EPC+Ca	0	4	0,4600	8,85
B-FPC 69	ETH 10	EPC	0	5	0,4600	8,91
B-FPC 74	ETH 20	-	IV	5	0,4600	8,44
B-FPC 82	SFX I	-	IV	5	0,4600	8,79
B-FPC 84	SFX II	-	IV	5	0,4600	9,37
B-FPC 64	ETH 10	-	II	6	0,4600	8,55
B-FPC 70	ETH 20	-	II	6	0,4600	8,32
B-FPC 83	SFX I	-	II	6	0,4600	8,75
B-FPC 85	SFX II	-	II	6	0,4600	9,33
B-FPC 67	ETH 10	+Ca	II	7	0,4600	9,32
B-FPC 68	ETH 10	+Ca	0	7	0,4600	11,31
B-FPC 72	ETH 20	+Ca	II	7	0,4600	8,74
B-FPC 76	ETH 20	+Ca	IV	7	0,4600	8,28
B-FPC 62	ETH 10	+Ca	IV	8	0,4600	9,20
B-FPC 79	ETH 20	EPC+Ca	0	9	0,4650	8,47
B-FPC 81	ETH 20	EPC	0	9	0,4725	8,42
B-FPC 78	ETH 20	-	0	10	0,5488	9,19
B-FPC 80	ETH 20	+Ca	0	10	0,5525	10,35

Tab. 4.14 – Tabulka konzistencí



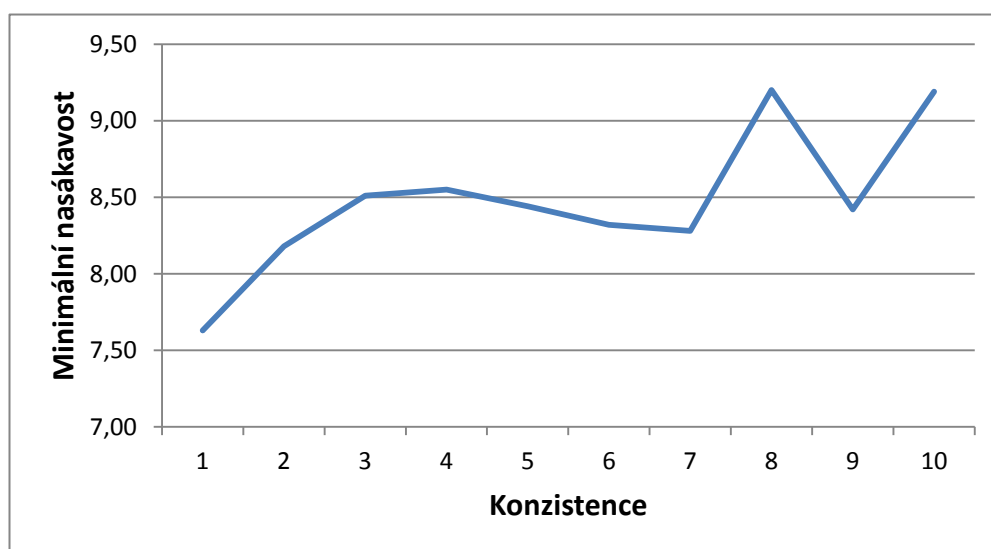
Graf 4.62 – Průměr konzistencí betonů v závislosti na jemnosti mletí

Dále byla příznivější konzistence a tedy i lepší zpracovatelnost spatřována u sérií s přidáním vysokoteplotním popílkem EPC z elektrárny Počeradý. Naopak ke zhoršení docházelo přidáním vápna, což je pochopitelné, jelikož na sebe váže vodu (viz. Graf 4.63).



Graf 4.63 – Průměr konzistencí betonů v závislosti na přidané pojivé složce

Spojitosť mezi konzistencí zpracovávaného betonu a nasákavostí se neprokázala. Data nejevila jakýkoliv logický vzorec, snad jen v případě, kdy byly od daných konzistencí vybrány pouze série s nejnižší nasákavostí (Graf 4.64). Tento logický vzorec je však nevyhovující a na jeho základě nemůže být potvrzená spojitost mezi konzistencí a nasákavostí.



Graf 4.64 – Vývoj minimálních hodnot nasákavostí pro jednotlivou konzistenci

## 4.6 Sumarizace výsledků

Během všech měření vystalo několik faktů, spojitostí a vzorců ve výsledcích, přičemž bylo vyvráceno i několik milných předpokladů.

### 4.6.1 Pevnost

#### **Pevnost ETH 10**

1. Zcela jistě se prokázal příznivý vliv mletí (menší velikosti středního zrna) na celkovou pevnost betonových FPC směsí.
2. Betony s vysokoteplotním popílkem EPC vykazovaly menší pevnosti v řádu několika desítek MPa. Po přidání hydroxidu vápenatého se situace zlepšila avšak jev je stále patrný v řádech pár desítek MPa.
3. Účinek snížení vodního součinitele se prokázal, avšak nárůst pevnosti nebyl takový, jaký by se mohl očekávat.
4. Suché uložení přispívá k vyšším počátečním pevnostem FPC betonů, avšak pokud se ve směsi nenachází vápno tak určitou část této nabyté pevnosti ztrácí.
5. Mokrý uložení, až na výjimky, vždy předčí uložení suché v delším časovém horizontu (120-ti denní pevnosti). Výjimku tvoří dvě nemleté směsi, ETH 10 s vápnem a čisté pojivo ETH 10.
6. Mletím se značně vyrovnají rozdílné hodnoty pevností způsobené rozdílným uložení (suchým/mokrým).
7. Přítomností vápna dochází ke stabilnějšímu a trvalejšímu růstu pevností. Tento účinek má patrně do určité míry také mokré uložení.

#### **Pevnost ETH 20**

1. Zcela jistě se prokázal příznivý vliv mletí II (menší velikosti středního zrna) na celkovou pevnost betonových FPC směsí
2. Betony s vysokoteplotním popílkem EPC vykazovaly menší pevnosti v řádu několika desítek MPa. Po přidání hydroxidu vápenatého se situace zlepšila avšak jev je stále patrný v řádech pár desítek MPa.
3. Mokrý uložení, až na výjimky, většinou předčí uložení suché v delším časovém horizontu (120-ti denní pevnosti). Výjimku tvoří dvě směsi, ETH 20 s vápnem a čisté pojivo ETH 20.
4. Mokrý uložení přispívá k lepším pevnostem, pokud se ve vzorku nachází EPC.

5. Přítomností vápna dochází ke stabilnějšímu a trvalejšímu růstu pevností. Tento účinek má patrně do určité míry také mokré uložení.

#### **Pevnost ETH 10 vs. ETH 20**

1. Samotný popílek ETH 10 nabývá vyšších pevností a prospívá mu delší mletí. Tento fakt je patrně způsoben vyšším obsahem CaO a hrubší granulometrií v nemletém stavu.
2. Popílek ETH 20 analogicky dosahuje vyšších pevností po přidání vápna při žádném nebo jen kratším mletí. Tento fakt je patrně způsoben nižším obsahem CaO a jemnější granulometrií v nemletém stavu.

#### **4.6.2 Nasákavost**

1. Zdá se, že nasákavost mnoho nesouvisí s mletím popílků, což by naznačovalo, že mletí překvapivě neovlivňuje pórovitost FPC betonů. Póry tam patrně tvoří voda, která je zde kvantifikovaná jako vodní součinitel.
2. Směsi s ETH 20 mají nepatrně menší nasákavost oproti vzorkům s ETH 10. Jde však o zanedbatelné číslo, které je nejspíše tvořeno rozdílnou morfologií popílků.
3. Je možné, že opačným procesem oproti normě došlo k přesušení vzorků a tak ke zkreslení výsledných nasákavostí.

#### **4.6.3 CHRL**

1. FPC betony jsou velmi náchylné na degradaci vlivem CHRL.
2. Směsi s vápnem vykazují daleko vyšší odolnost proti CHRL. Pozitivní vliv má nejspíše i vyšší obsah CaO v popílcích.
3. Zdá se, že vysokoteplotní úletový popílek EPC ve směsích zhoršuje odolnost proti CHRL.
4. Odolnost proti CHRL je nejspíše velmi ovlivněná vodním součinitelem směsi.
5. Předpokládaná spojitost mezi pevností a odolností vůči CHRL se nepotvrdila.
6. Výsledné hodnoty odpadů zhruba odpovídají odpadům na klasických cementových betonech.

#### 4.6.4 Karbonatace

1. Dle výsledků dochází u FPC betonů ke karbonataci běžně do 10mm s maximy mezi 12-15mm. Což by mohlo být bráno za přijatelnou hodnotu za předpokladu, že by již karbonatace nepostupovala a krycí vrstva výztuže 20mm by byla dodržena u celé konstrukce.
2. Je možné, že hydroxid vápenatý existuje u vzorků ještě v jiné formě, kterou fenolftaleinová zkouška neodhalí.

#### 4.6.5 Konzistence

1. Konzistenci ovlivňuje složení pojivové báze. EPC pozitivně a vápno negativně.
2. Velký vliv na konzistenci má jemnost mletí popílku. Překvapivě se mletím popílků zpracovatelnost zlepšuje a potřeba vody tak klesá.
3. Neprořádala se spojitost konzistence s nasákavostí.



## 5 Závěr

Obsah této diplomové práce byl věnován bližšímu seznámení se s vlastnostmi elektrárenských popílků, zejména pak těch fluidních. Cílem teoretické části této práce byla rešerše hlavních degradačních vlivů a jejich možné omezení účinků pomocí mechanicky upravených pojiv. Praktická část měla za cíl úpravu pojiv mletím a laboratorní zkoušky fyzikálně-mechanických a chemických vlastností jako je pevnost, zkoušky nasákavosti, CHRL a karbonatace a jejich následné vyhodnocení. Tyto vytyčené cíle byly splněny.

Autor provedl rešerši vlivů ovlivňujících nasákavost, mrazuvzdornost, karbonataci a působení chemických rozmrazovacích látek, jakožto hlavních degradačních vlivů betonu.

Rešerši degradačních vlivů (voda, mráz, chemické rozmrazovací látky a karbonatace) dospěl autor k názoru, že společným jmenovatelem ovlivňujícím rozsah degradace je kvalita provedení betonového povrchu a pórová struktura betonu. A že lze tyto jmenovatele ovlivnit utěsněním struktury betonu úpravou pojiv a ideální konzistencí betonu.

Na základě předchozích výzkumů bylo přistoupeno k úpravě pojiv mletím a pokusům změnit vodní součinitel při zachování dobré zpracovatelnosti betonu. Pozorováním autor dospěl k názoru, že úprava pojiv mletím má velký vliv na zpracovatelnost míchaného betonu. Z toho důvodu bylo ponecháno dávkování vody na původní hodnotě.

Zkouškami pevnosti byl prokázán příznivý vliv jemnějších částic pojiva. Dále se autor domnívá, že přítomností vápna dochází ke stabilnějšímu a trvalejšímu růstu pevností. Mletím se značně vyrovnají rozdílné hodnoty pevností způsobené rozdílným uložením (suchým/mokrým). Suché uložení přispívá k vyšším počátečním pevnostem FPC betonů, avšak v delším časovém horizontu je z hlediska pevností výhodnější uložení mokré. Betony s vysokoteplotním popílkem EPC vykazovaly menší pevnosti v řádu několika desítek MPa a pro lepší vlastnosti vyžadovaly přidání vápna.

Zkouškami nasákavosti se ukázalo, že nasákavost do velké míry nesouvisí s mletím popílků. Což by naznačovalo, že mletí překvapivě neovlivňuje pórovitost

FPC betonů. Póry tam patrně tvoří voda, která je kvantifikovaná jako vodní součinitel. Celkově FPC betony překračovaly hodnoty nasákavosti povolené normou, což mohlo být také částečně způsobeno počátečním přesušením vzorků před ponořením do vody.

Zkouškami odolnosti na CHRL se potvrdila zvýšená náchylnost FPC betonů proti tomuto působení. Srovnáním s klasickými cementovými betony autor dospěl k názoru, že popílkové betony vykazují obdobné hodnoty odpadů jako betony z fluidního popílku. Série byly příznivě usměrňovány přidaným vápnem a naopak nepříznivě ovlivněny vysokoteplotním popílkem EPC. Velký vliv na odolnost proti CHRL má vodní součinitel, na jehož základě se patrně vytváří v FPC betonech pórovitá struktura.

Pro další pokračování výzkumu bude nutná optimalizace vodního součinitele na co nejnižší hodnoty pomocí plastifikátoru. Dále by mohlo být dosaženo lepších výsledků úpravou struktury provzdušněním, spíše než jejím utěsněním, čehož by se dalo docílit optimálním dávkováním provzdušňovacích přísad.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] HUBERTO VÁ, Michala. Trvanlivost lehkého konstrukčního betonu: Beton: technologie - konstrukce - sanace. Praha: Beton TKS, s. r. o., 2012, č. 6, s. 18-21, ISSN 1213-3116. Dostupný také z: [http://www.betontks.cz/sites/default/files/BETON\\_TKS\\_2013-06.pdf](http://www.betontks.cz/sites/default/files/BETON_TKS_2013-06.pdf)
- [2] MATOUŠEK, M., DROCHYTKA, R., *Atmosférická koroze betonu*, vydala IKAS, Praha 1998, ISBN 80-902558-0-9.
- [3] KOVALČÍKOVÁ, Hana. *Vliv změn v pórové struktuře betonu na aktuální trvanlivost ŽB a předpjatých konstrukcí*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Dostupný z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=48902](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=48902)
- [4] ČSN EN 13369 (723001), *Společná ustanovení pro betonové prefabrikáty - příloha G*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2013. Třídící znak 723001.
- [5] DOHNÁLEK, Jiří. *Vliv Mrazuvzdornosti na jeho povrchové úpravy: Beton technologie - konstrukce - sanace*. 3. vyd. Praha: Česká betonářská společnost, 2012, 25-36 s. ISSN 12133116.
- [6] ČSN 731322 (731322), *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 1969. Třídící znak 731322.
- [7] TOPINKOVÁ, Michaela. *Anorganická pojiva*, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava - Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Ostrava, 2013, ISBN 978-80-248-3366-8, Dostupný také z: [http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/02\\_Metalurgicke\\_inzenyrstvi/18\\_Anorganicka\\_pojiva/Topinkova\\_Anorganicka\\_pojiva.pdf](http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/18_Anorganicka_pojiva/Topinkova_Anorganicka_pojiva.pdf)
- [8] SVAZ VÝROBCŮ BETONU, *Druhy cement*, [online]. 2016, [cit. 2016-11-29]. Dostupný z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/druhy-cementu>
- [9] ČSN EN 197-1 ed. 2, *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2012. Třídící znak 722101

- [10] SVOBODA, Luboš a kolektiv. *Stavební hmoty*. 2.vyd. Bratislava: JAGA GROUP, s.r.o. 2007, 192-194 s. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [11] FEČKO, Peter. *Fly ash*. VŠB-Technical University of Ostrava, 2005, ISBN 80-248-0836-6
- [12] VALEČEK, Jan. *Ekonomická analýza k programu B-FPC*. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Praha. 2014.
- [13] KEJÍK, Pavel. *Rozpustnost elektrárenských popílků ve vysoce alkalickém prostředí*. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická, 2010. Dostupný také z: <http://hdl.handle.net/11012/1761>.
- [14] Výzkumný ústav maltovin Praha, spol. s r.o.; Svaz výrobců cementu ČR, *Popílek a jeho použití do betonu*, [Online]. 2002, [cit. 2016-12-02]. Dostupný z: [https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/06/popilek\\_a\\_jeho\\_pouziti\\_do\\_betonu.pdf](https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/06/popilek_a_jeho_pouziti_do_betonu.pdf)
- [15] ČSN 44 7010, *Názvosloví mechanického rozpojování a třídění tuhých látek*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 1976. Třídící znak 4470101
- [16] MALÝ, Pavel. *Strojní zařízení stavebního průmyslu: Díl 1*. Nakladatelství technické literatury. Praha, 1973.
- [17] TOMEK, J., TĚHNÍK V. *Těžba, lomařství a úpravnictví nerostných surovin: 2. díl. 3*. Ediční středisko Vysokého učení technického. Brno, 1985.
- [18] ŠEBOR, Gustav. *Těžba a úprava nerostných surovin*. Ediční středisko Českého vysokého učení technického. Praha, 1983.
- [19] DINTER, Oskar. *Přehled úpravnictví uhlí a rud: Díl 1*. Ediční středisko vysoké školy báňské. Ostrava, 1960.
- [20] VAŠÁK, Martin. *Úprava fyzikálních parametrů popílků ze spalování uhlí*. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Praha. 2016.
- [21] JANČAR, Dalibor. *Zařízení keramických závodů*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Ostrava, 2013. Dostupný také z:

[https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/zarizeni-keramickych-zavodu/Jancar\\_Zarizeni-keramickych-zavodu.pdf](https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/zarizeni-keramickych-zavodu/Jancar_Zarizeni-keramickych-zavodu.pdf)

[22] ŠVEHLA, E., BERNÁTH, V. *Úpravnické stroje a zařízení: učební text pro 4. ročník středních průmyslových škol hornických*. Státní nakladatelství technické literatury. Praha, 1964.

[23] NGUYEN, Cong Han. *Teoretické základy mletí v trubnatém mlýně*. Kandidátská disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Praha, 1986.

[24] SETZER, M. J., AUBERG, R., *Frost Resistance of Concrete*, E&FN SPON, London, 1997, ISBN 0-419-22900-0

[25] VALENZA, J. John II. a SCHERER, W. George. *A review of salt scaling: I. Phenomenology*, Elsevier, [online]. 2007, [cit. 2016-12-16]. Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000737>

[26] VALENZA, J. John II. a SCHERER, W. George. *A review of salt scaling: II. Mechanisms*, Elsevier, [online]. 2007, [cit. 2016-12-16]. Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000713>

[27] ČSN 73 1326+Z1, *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2003. Třídící znak 731326

[28] ČSN EN 1338, *Betonové dlažební bloky – Požadavky a zkušební metody*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2004. Třídící znak 723038

[29] ČSN EN 13630, *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení hloubky zasažení karbonatů v zatvrdlém betonu pomocí fenolftaleinové metody*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2008. Třídící znak 732154

[30] CHROMÁ, Markéta. *Studium a modelování karbonatace betonu*. Autoreferát Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Brno. [Online]. 2012. [cit. 2016-12-20] Dostupný z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12542/Chroma\\_autoreferat.pdf?sequence=1](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12542/Chroma_autoreferat.pdf?sequence=1)

- [31] MOŽÍŠ, Zdeněk. *Přísady a příměsi pro FPC betony*. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Praha. 2015.
- [32] PRCHAL, Jan. *Laboratoř rentgenové difraktometrie a spektrometrie*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [Online]. 2016. [cit. 2016-12-21] Dostupný z: <http://clab.vscht.cz/rtg>
- [33] FORMÁČEK, Petr. *Využití popílků ze spalování uhlí*. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Praha. 2014.
- [34] ŠKVÁRA, F., SNOPEK R., ŠULC R., ZLÁMALOVÁ CÍLOVÁ Z., PETEROVÁ A., KOPECKÝ L. *Fluidní sulfovápenatý popílek*. Sborník recenzovaných přednášek II. Mezinárodní konference: Popílků ve stavebnictví. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015.
- [35] Vápenka Čertovy schody a.s. *Prohlášení o vlastnostech CL 90-S*. Prohlášení o vlastnostech. [online]. Březen 2014, [cit. 2016-12-17]. Dostupný z: [http://www.lhoist.com/sites/lhoist/files/pov\\_-\\_cl\\_90-s.pdf](http://www.lhoist.com/sites/lhoist/files/pov_-_cl_90-s.pdf)
- [36] BASF STAVEBNÍ HMOTY ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. *Glenium ACE 40*. Technický list. č. 630. srpen 2010.
- [37] ČSN EN 12390-3 (731302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha. 2009. Třídící znak 731302.
- [38] BLAŽEK, Michal. *Možnosti hodnocení trvanlivosti povrchové vrstvy betonu stavebních konstrukcí*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Dostupný z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/30438>

## Seznam obrázků

Obr. 2.1 – Závislost osmotického tlaku ve stěně póru na koncentraci roztoku. Pevnost betonu v tahu bude překročena při rozdílu koncentrace v solném roztoku okolo 14% [26] .....	17
Obr. 2.2 – Mechanismus Glue-Spall [26] .....	18
Obr. 2.3 – Kulové mlýny podle způsobu vynášení rozemletého materiálu [20].....	27
Obr. 2.4 – Kulové mlýny podle tvaru mlecí nádoby [17] .....	28
Obr. 2.5 – Tvar hladiny náplně v mlýnu pro různé otáčky [23].....	29
Obr. 2.6 – Pohyb mlecích těles v kulovém mlýně [17].....	30
Obr. 3.1 – Omílací buben OM 20f .....	40
Obr. 3.2 – Rozdělení velikosti částic –nemleté frakce –EPC Silo A .....	43
Obr. 3.3 – Porušený povrch krychle ze série B-FPC 69 .....	46
Obr. 3.4 – Porušený povrch krychle ze série B-FPC 77 .....	47
Obr. 3.5 – Uložení vzorků čerstvých sérií.....	47
Obr. 3.6 – „Výbušné porušení“ [37] zkoušky pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 .....	53
Obr. 3.7 – Vysoušení vzorků.....	54
Obr. 3.8 – Zkouška nasákavosti: Dle ČSN min. hladina 2cm (3cm na obr.).....	54
Obr. 3.9 – Zkouška nasákavosti: Dodržení minimálních předepsaných vzdáleností.	55
Obr. 3.10 – Neznámá bílá hmota .....	55
Obr. 3.11 – Vzorek B-FPC 58 C2 po zkoušce CHRL .....	56
Obr. 3.12 – Označení hodnotou 100mm – bezbarvý vzorek B-FPC 74 B1.....	58
Obr. 3.13 – Označení hodnotou 15/6mm – vzorek B-FPC 75 B1 .....	58
Obr. 3.14 – Označení hodnotou 0/0mm – zcela zbarvený vzorek B-FPC 71 C1.....	58
Obr. 4.1 – Rozdílná hloubka karbonatce u vzorku B-FPC 84 B .....	99

## Seznam grafů

Graf 3.1 – Prvkové složení popílku Tisová ETH 10 z 9. 3. 2015 .....	32
Graf 3.2 – Prvkové složení popílku Tisová ETH 20 z 8. 4. 2015 .....	33
Graf 3.3 – Prvkové složení popílku Počerady-Silo A z 27. 2. 2015 .....	34
Graf 3.4 – Prvkové složení SORFIX I .....	35
Graf 3.5 – Prvkové složení SORFIX II.....	36
Graf 3.6 – Propady jednotlivých frakcí kameniva z lokality Dobříň + Zbraslav.....	38
Graf 3.7 – Zrnitostní křivka výsledného dávkování kameniva z lokality Dobříň+Zbraslav .....	39
Graf 3.8 – Rozdělení velikosti částic –zastoupení frakcí –ETH 10 .....	42
Graf 3.9 – Rozdělení velikosti částic –zastoupení frakcí –ETH 20 .....	42
Graf 3.10 – Rozdělení velikosti částic –zastoupení frakcí –SFX I .....	43
Graf 3.11 – Rozdělení velikosti částic –zastoupení frakcí –SFX II.....	43
Graf 3.12 – Grafické vyhodnocení odolnosti na CHRL vzorků B-FPC 57 a 58 .....	57
Graf 4.1 – Rozdílné hodnoty vodního součinitele v (voda/všechny suché složky) ...	60
Graf 4.2 – Pevnost B-FPC 57, 59 a 64 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků.....	60
Graf 4.3 – Vliv uložení na nemletou sérii vzorků B-FPC 59.....	61
Graf 4.4 – Vliv uložení na mletou sérii (II) vzorků B-FPC 64 .....	61
Graf 4.5 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 57.....	62
Graf 4.6 – Vodní součinitel u sérií B-FPC 57 a B-FPC 58 .....	62
Graf 4.7 – Pevnosti na suchu uložených sérií B-FPC 57, 58 s rozdílným množstvím vody.....	63
Graf 4.8 – Pevnosti mokře uložených sérií B-FPC 57, 58 s rozdílným množstvím vody.....	63



Graf 4.9 – Pevnost B-FPC 62, 67 a 68 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků.....	64
Graf 4.10 – Vliv uložení na nemletou sérii vzorků B-FPC 68.....	65
Graf 4.11 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 62.....	65
Graf 4.12 – Pevnost B-FPC 63, 66 a 69 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků.....	66
Graf 4.13 – Vliv uložení na nemletou sérii vzorků B-FPC 69.....	67
Graf 4.14 – Vliv uložení na mletou sérii (II) vzorků B-FPC 66.....	67
Graf 4.15 – Pevnost B-FPC 60, 61 a 65 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků.....	68
Graf 4.16 – Vliv uložení na nemletou sérii vzorků B-FPC 61.....	69
Graf 4.17 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 60.....	69
Graf 4.18 – Pevnost B-FPC 61 a SFX II-II a SFX II-IV v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků.....	70
Graf 4.19 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 84.....	71
Graf 4.20 – Pevnost suše uložených nemletých ETH 10 s jednotlivými příměsemi .	71
Graf 4.21 – Pevnost suše uložených mletých (II) ETH 10 s jednotlivými příměsemi .....	72
Graf 4.22 – Pevnost suše uložených mletých (IV) ETH 10 s jednotlivými příměsemi .....	72
Graf 4.23 – Pevnost mokře uložených mletých (IV) ETH 10 s jednotlivými příměsemi.....	73
Graf 4.24 – Vodní součinitel v (voda/všechny suché složky) u sérií B-FPC 70, 74 a 78.....	74
Graf 4.25 – Pevnost B-FPC 70, 74 a 78 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků.....	74
Graf 4.26 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 74.....	75

Graf 4.27 – Pevnost B-FPC 72, 76 a 80 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků.....	76
Graf 4.28 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 76.....	76
Graf 4.29 – Pevnost B-FPC 73, 77 a 81 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků.....	77
Graf 4.30 – Vliv uložení na mletou sérii (II) vzorků B-FPC 73 .....	78
Graf 4.31 – Pevnost B-FPC 71, 75 a 79 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků.....	79
Graf 4.32 – Vliv uložení na mletou sérii (II) vzorků B-FPC 71 .....	79
Graf 4.33 – Vliv uložení na nemletou sérii vzorků B-FPC 79.....	80
Graf 4.34 – Pevnost B-FPC 79, 82 a 83 v závislosti na jemnosti materiálu a stáří vzorků.....	81
Graf 4.35 – Vliv uložení na mletou sérii (IV) vzorků B-FPC 82.....	81
Graf 4.36 – Pevnost suše uložených nemletých ETH 20 s jednotlivými příměsemi .	82
Graf 4.37 – Pevnost suše uložených mletých (II) ETH 20 s jednotlivými příměsemi .....	82
Graf 4.38 – Pevnost suše uložených mletých (IV) ETH 20 s jednotlivými příměsemi .....	83
Graf 4.39 – Pevnost mokře uložených mletých (IV) ETH 20 s jednotlivými příměsemi.....	83
Graf 4.40 – Pevnosti na suchu (28 dní) nemletých fluidních popílků .....	84
Graf 4.41 – Pevnosti na suchu (28 dní) mletých (II) fluidních popílků.....	84
Graf 4.42 – Pevnosti na suchu (28 dní) mletých (IV) fluidních popílků .....	85
Graf 4.43 – Hodnoty nasákavostí u vzorků B-FPC 57 a B-FPC 58.....	85
Graf 4.44 – Nasákavost ETH 10 v závislosti na jemnosti mletí .....	86
Graf 4.45 – Nasákavost ETH 10 v závislosti na složení .....	86
Graf 4.46 – Vodní součinitelé sérií s fluidním popílkem ETH 10 .....	87
Graf 4.47 – Nasákavost ETH 20 v závislosti na jemnosti mletí .....	87

Graf 4.48 – Nasákavost ETH 20 v závislosti na složení .....	88
Graf 4.49 – Vodní součinitelé sérií s fluidním popínkem ETH 20 .....	88
Graf 4.50 – Vliv vodního součinitele na odpady sérií B-FPC 57 a B-FPC 58 .....	91
Graf 4.51 – Pevnosti mokře uložených sérií B-FPC 57 a B-FPC 58 .....	91
Graf 4.52 – Závislost odpadů (25 cyklů) na složení betonů s ETH 10 .....	92
Graf 4.53 – Výsledky odpadů nemletého popínku ETH 10 na odolnost proti CHRL	92
Graf 4.54 – Výsledky odpadů mletého (IV) popínku ETH 10 na odolnost proti CHRL .....	93
Graf 4.55 – Závislost odpadů na pevnostech různě mletých popínků ETH 10 .....	93
Graf 4.56 – Závislost odpadů (25 cyklů) na nasákavosti různě mletých popínků ETH 10.....	94
Graf 4.57 – Závislost odpadů (25 cyklů) na složení betonů s ETH 20 .....	94
Graf 4.58 – Závislost odpadů (25 cyklů) na pevnostech různě mletých popínků ETH 20.....	95
Graf 4.59 – Závislost odpadů (25 cyklů) na nasákavosti různě mletých popínků ETH 20.....	95
Graf 4.60 – Porovnání odpadů (25 cyklů) nemletých fluidních popínků .....	96
Graf 4.61 – Porovnání odpadů (25 cyklů) mletých (II) fluidních popínků.....	96
Graf 4.62 – Průměr konzistencí betonů v závislosti na jemnosti mletí.....	100
Graf 4.63 – Průměr konzistencí betonů v závislosti na přidané pojivé složce.....	101
Graf 4.64 – Vývoj minimálních hodnot nasákavostí pro jednotlivou konzistenci...	101

## Seznam tabulek

Tab. 2.1 – Zatřídění povrchů zkušebních ploch [27] .....	20
Tab. 2.2 – Požadavek na betonové kce. dle ČSN EN 1338 po 28 cyklech [28] .....	20
Tab. 3.1 – Prvkové složení popílku Tisová ETH 10 z 9. 3. 2015 .....	32
Tab. 3.2 – Prvkové složení popílku Tisová ETH 20 z 8. 4. 2015 .....	33
Tab. 3.3 – Prvkové složení popílku Počerady-Silo A z 27. 2. 2015 .....	34
Tab. 3.4 – Prvkové složení SORFIX I .....	35
Tab. 3.5 – Prvkové složení SORFIX II .....	36
Tab. 3.6 – Prvkové složení hašeného vápna z lokality Čertovy schody [35].....	37
Tab. 3.7 – Hodnoty výsledků síťového rozboru kameniva Dobříň + Zbraslav .....	38
Tab. 3.8 – Hodnoty mletí pojiv .....	44
Tab. 3.9 – Číselný popis konzistence .....	51
Tab. 4.1 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 57, 59, 64 ..	59
Tab. 4.2 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 57, 59, 64 ..	64
Tab. 4.3 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 63, 66, 69 ..	66
Tab. 4.4 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 60, 61, 65 ..	68
Tab. 4.5 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 61, 84, 85 ..	70
Tab. 4.6 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 70, 74, 78 ..	73
Tab. 4.7 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 72, 76, 80 ..	75
Tab. 4.8 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 73, 77, 81 ..	77
Tab. 4.9 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 71, 75, 79 ..	78
Tab. 4.10 – Tabulka pozorovaných složek a číselných údajů v sériích č. 79, 82, 83 ..	80
Tab. 4.11 – Tabulka výsledků CHRL .....	89
Tab. 4.12 – Výsledky odpadů cementových bet. z vybraných prací, s betony z fluidních popílků [26][38] .....	90

Tab. 4.13 – Výsledky fenolftaleinových zkoušek .....	98
Tab. 4.14 – Tabulka konzistencí .....	100