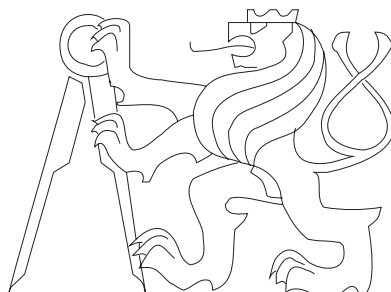


**České vysoké učení technické v Praze**

**Kloknerův ústav**



**HVFAC – betony s vysokým podílem popílku  
pro stavební praxi**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Ing. Stanislav Řeháček**

Doktorský studijní program: P 3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: Nauka o nekovových materiálech a stavebních hmotách

Školitel: Ing. Ivo Šimůnek, CSc.

Praha, leden 2021

## **PROHLÁŠENÍ:**

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně a obsah práce nebyl předložen k jiným akademickým nebo profesním řízením. Prohlašuji, že tato disertační práce byla vytvořena v souladu se všemi závaznými pravidly a že jsem řádně uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Prohlašuji, že práce vznikla jako součást doktorského studia, do kterého jsem řádně zapsán.

V Praze, 15. ledna 2021

Ing. Stanislav Řeháček

## **PODĚKOVÁNÍ:**

Poděkování patří zejména technickým pracovníkům Experimentálního oddělení Kloknerova ústavu pod vedením doc. Ing. Jiřího Kolíska, Ph.D., kteří se významnou měrou podíleli na přípravě a realizaci celé řady zkoušek. Dále děkuji svému školiteli Ing. Ivo Šimůnkovi, CSc. za odborné vedení, připomínky a užitečné rady, které mi poskytoval v průběhu celého doktorského studia. V neposlední řadě bych rád poděkoval také své rodině za celoživotní podporu a poskytnuté studijní a životní možnosti. Celá řada zkoušek byla provedena s přispěním grantových projektů TIP FR-TI3/747, FW01010539 a grantové soutěže ČVUT v rámci projektu SGS OHK1-064/12.

## **ABSTRACT**

The abbreviation HVFAC is therefore High Volume Fly Ash Concrete - concrete with a high content of fly ash was probably used as the first by prof. Malhotra in the late 1980s in the USA. Concrete marked as HVFAC is characterized by a relatively low water coefficient and usually at least 50% replacement of cement with fly ash classified according to ASTM in class F. In these concretes, thanks to the use of superplasticizers, the workability can be settled by cone at 150-200 mm. In situations where high compressive strengths and higher processability are not required, the use of consistency improvers can be reduced to some extent.

HVFACs are said to have good workability, low heat of hydration, lower initial strengths, but high strength in old age. They also have low shrinkage, high durability and can basically be classified as high-quality concrete [1].

In general, HVFAC can be talked about from replacing 30% of cement with fly ash, depending on the location in which the HVFAC was used. Abroad, HVFAC is used in ready-mixed concrete, especially in strength classes C16 / 20 to C30 / 37, typical uses are monolithic structures such as foundation structures, columns, slabs, girders, retaining walls, concrete walkways, etc.

The main benefit of concretes with a high dose of fly ash is, in addition to very good workability in the fresh state, also the durability of hardened concrete. Specifically, it is a higher resistance of hardened concrete to corrosion caused by aggressive environments and frost. HVFACs represent a very good prevention of sulphate and alkali-silica type expansion reactions. Due to the high content of fly ash, the width of microcracks is reduced and thus the reliability in terms of serviceability limit states is increased.

An indisputable and not insignificant advantage of HVFAC concrete is the ecological aspect, as such concretes can be described as so-called "green concretes". If we add the economic aspect to the above advantages, it is not surprising that the use of HVFAC is developing dynamically worldwide, both in the USA and Canada, as well as in China, India, Russia and Western Europe.

**Klíčová slova:** beton, popílek, HVFAC, příměs a přísada

**Keywords:** concrete, fly ash, HVFAC, admixture and additive

**OBSAH**

<b>A</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>- 7 -</b>
<b>B</b>	<b>CÍL PRÁCE .....</b>	<b>- 8 -</b>
<b>C</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>- 9 -</b>
1	HVFAC.....	- 9 -
1.1	ÚVOD .....	- 9 -
1.2	POPÍLEK .....	- 11 -
1.2.1	ÚVOD.....	- 11 -
1.2.2	ROZDĚLENÍ POPÍLKŮ PODLE ZPŮSOBŮ SPALOVÁNÍ .....	- 11 -
1.2.3	VLASTNOSTI POPÍLKŮ.....	- 11 -
1.2.4	CHEMICKÉ A MINERALOGICKÉ SLOŽENÍ POPÍLKŮ .....	- 11 -
1.2.5	VÝBĚR POPÍLKU PRO BETONY VYSOKOHODNOTNÉ .....	- 11 -
1.2.6	PROBLEMATIKA VYUŽITÍ POPÍLKŮ DO BETONU V ČR.....	- 11 -
1.2.7	REKAPITULACE ADMIN. OMEZENÍ PRO VYUŽITÍ POPÍLKŮ V BETONU .....	- 11 -
1.3	HVFAC VE SVĚTĚ A V ČR.....	- 32 -
1.3.1	DEFINICE.....	- 11 -
1.3.2	POUŽITÍ.....	- 11 -
1.3.3	PŘÍKLADY POUŽITÍ HVFAC .....	- 11 -
1.4	POPÍLKY S OBSAHEM AMONIAKU .....	- 36 -
1.4.1	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ.....	- 11 -
1.4.2	CHEMICKÉ VLASTNOSTI .....	- 11 -
1.4.3	LIMITY.....	- 11 -
<b>D</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>- 45 -</b>
2	POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ POPÍLKŮ .....	- 45 -
2.1	VÝBĚR POPÍLKŮ .....	- 45 -
2.2	VYHODNOCENÍ CHEMICKÉHO SLOŽENÍ POPÍLKŮ.....	- 46 -
2.3	VYHODNOCENÍ ZRNITOSTI POPÍLKŮ .....	- 48 -
2.4	VYHODNOCENÍ VODONÁROČNOSTI POPÍLKŮ.....	- 52 -
2.5	VYHODNOCENÍ REAKTIVITY POPÍLKŮ.....	- 55 -
2.6	VYHODNOCENÍ TECHNOLOGICKÉHO CHOVÁNÍ POPÍLKŮ.....	- 56 -
2.7	VYHODNOCENÍ NEJLEPŠÍHO ČESKÉHO POPÍLKU .....	- 62 -
3	NÁVRH RECEPTUR PRO HVFAC .....	- 63 -
3.1	OPTIMALIZACE OBJEMU CEM. TMELU V POPÍLKOVÉM BETONU.....	- 63 -
3.2	ZHODNOCENÍ PROVEDENÝCH LABORATORNÍCH TESTŮ BETONŮ.....	- 67 -
3.3	PRVNÍ PROVOZNÍ OVĚŘOVACÍ ZKOUŠKY V BETONÁRNĚ V HULÍNĚ .....	- 68 -
3.4	ZHODNOCENÍ PRVNÍ OVĚŘOVACÍ ZKOUŠKY V BETONÁRNĚ V HULÍNĚ ...	- 71 -
3.5	DRUHÉ PROVOZNÍ OVĚŘOVACÍ ZKOUŠKY V BETONÁRNĚ V HULÍNĚ .....	- 72 -
3.5.1	VÝVOJ TEPLŮ BĚHEM POČÁTEČNÍ HYDRATACE .....	- 11 -

3.5.2	STANOVENÍ OBJEMOVÝCH ZMĚN BETONU S VYSOKÝM OBSAHEM POPÍLKU .....	- 11 -
3.5.3	STANOVENÍ HLOUBKY PRŮSAKU TLAKOVOU VODOU BETONŮ S VYSOKÝM OBSAHEM POPÍLKU .....	- 11 -
3.5.4	STANOVENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI KARBONATACI, ANALÝZA PÓROVÉ STRUKTURY BETONU .....	- 11 -
4	TESTY POPÍLKŮ NA OBSAH NO <sub>x</sub> .....	- 85 -
4.1	ÚVOD .....	- 85 -
4.2	VÝBĚR POPÍLKŮ .....	- 86 -
4.3	METODY .....	- 87 -
4.4	MĚŘENÍ PŘÍSTROJEM DRÄGER ACCURO .....	- 88 -
4.5	MĚŘENÍ PŘÍSTROJEM DRÄGER NH <sub>3</sub> PAC 8000.....	- 90 -
4.5.1	VLIV VODNÍHO SOUČiniteLE.....	- 11 -
4.5.2	ZKOUŠKA POUŽITÍ ROZTOKU NaOH .....	- 11 -
4.5.3	METODIKA STANOVENÍ AMONIAKU VE VZORKU POPÍLKU PŘED VPUŠTĚNÍM DO SILA BETONÁRNY .....	- 11 -
4.5.4	SLEDOVÁNÍ POPÍLKU MĚLNÍK DLE METODIKY POPSANÉ V 4.5.3 .....	- 11 -
4.6	ZHODNOCENÍ PROVEDENÝCH MĚŘENÍ .....	- 102 -
<b>E</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>- 104 -</b>

## A ÚVOD

Zkratku HVFAC tedy High Volume Fly Ash Concrete – beton s vysokým obsahem popílku použil pravděpodobně jako první prof. Malhotra koncem osmdesátých let 20. století v USA. Beton označený jako HVFAC se vyznačuje relativně malým vodním součinitelem a zpravidla minimálně 50% náhradou cementu popílkem zatříděným dle ASTM do třídy F. U těchto betonů je díky použití superplastifikátorů zpracovatelnost sednutím kužele na úrovni 150-200 mm. V situacích, kdy nejsou požadovány vysoké pevnosti v tlaku a vyšší zpracovatelnost, lze do jisté míry použití přísad zlepšujících konzistenci omezit.

U HVFAC se uvádí, že mají dobrou zpracovatelnost, malý vývin hydratačního tepla, nižší počáteční pevnosti, ale vysoké pevnosti ve vysokém stáří. Rovněž mají malé smrštění, vysokou trvanlivost a v podstatě je můžeme zařadit do vysokohodnotných betonů [1].

Obecně lze říci, že o HVFAC lze mluvit od náhradě 30% cementu popílkem v závislosti na tom, v jaké lokalitě byl daný HVFAC použit. V zahraničí se HVFAC uplatňuje u transportbetonu a to především u tříd pevnosti C16/20 až C30/37. Typickým použitím jsou monolitické konstrukce, jako např. základové konstrukce, sloupy, desky, průvlaky, opěrné stěny, betonové chodníky atd.

Hlavním přínosem betonů s vysokou dávkou popílku je kromě velmi dobré zpracovatelnosti v čerstvém stavu také trvanlivost ztvrdlého betonu. Konkrétně se jedná o vyšší odolnost ztvrdlého betonu vůči korozi způsobené agresivním prostředím a mrazem. HVFAC představují velmi dobrou prevenci expanzních reakcí sulfátového a alkalicko-křemičitého typu. Díky vysokému obsahu popílku dochází k omezení šířky mikrotrhlin a tím zvýšení spolehlivosti z hlediska mezních stavů použitelnosti.

Nespornou a nezanedbatelnou výhodou HVFAC betonu je ekologické hledisko, neboť takové betony lze označit jako takzvané „green concretes“.

Přidáme-li k výše uvedeným výhodám hledisko ekonomické, nelze se divit, že se využití HVFAC dynamicky celosvětově rozvíjí, a to jak v USA a Kanadě, tak i v Číně, Indii, Rusku a západní Evropě.

## B CÍL PRÁCE

Cílem práce je nalezení vhodné kombinace složek běžně dostupných v ČR pro betony typu HVFAC a to tak, aby tento beton byl uplatnitelný ve stavební praxi, zejména v oblasti transportbetonu. Navržené betony s vysokým obsahem popílku mají mít takové vlastnosti v čerstvém a ztvrdlém stavu, které umožní jejich bezproblémové užití v běžných konstrukcích, zejména základových. Na základě výše uvedených skutečností byly cíle disertační práce stanoveny takto:

- a) Rekapitulace administrativního omezení používání popílku.
- b) Porovnání vlastností popílků běžně dostupných v ČR s cílem vybrat vhodné typy pro návrh HVFAC.
- c) Vlastní návrh HVFAC s vybranými popílky, stanovení základních parametrů v čerstvém a ztvrdlém stavu.
- d) Optimalizace receptur a vytvoření „systému“ pro usnadnění navrhování HVFAC v podmínkách ČR.
- e) Testy popílků na obsah NO<sub>x</sub>



## C TEORETICKÁ ČÁST

### 1 HVFAC

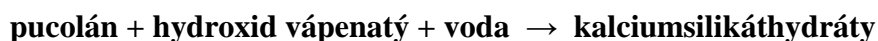
Zkratku HVFAC, tedy High Volume Fly Ash Concrete – beton s vysokým obsahem popílku, použil pravděpodobně jako první prof. Malhotra koncem osmdesátých let 20. století v USA. Beton označený jako HVFAC se vyznačuje relativně malým vodním součinitelem a zpravidla minimálně 50% náhradou cementu popílkem zařazeným dle ASTM do třídy F. U těchto betonů je díky použití superplastifikátorů zpracovatelnost sednutím kužele na úrovni 150-200 mm. U HVFAC se uvádí, že mají dobrou zpracovatelnost, malý vývin hydratačního tepla, nižší počáteční pevnosti ale vysoké pevnosti ve vysokém stáří. Rovněž mají malé smrštění, vysokou trvanlivost a v podstatě je můžeme zařadit do vysokohodnotných betonů [1].

#### 1.1 ÚVOD

Příměsi jsou práškovité látky přidávané do betonu za účelem zlepšení některých vlastností nebo k docílení některých zvláštních vlastností a dělí se na dva typy:

- **inertní příměsi (typ I)** – do tohoto typu se řadí mleté horniny, moučky (filer) a pigmenty,
- **pucolány nebo latentně hydraulické látky (typ II)** – sem zařazujeme létavý popílek, křemičité úlety, granulovanou vysokopecní moučku, metakaolin, mikromletý vápenec a další.

Využití různých příměsí může být výhodné nejen z ekonomického hlediska, ale rovněž z pohledu reologie a rovněž je třeba zvážit ekologický přínos. Většina příměsí má jeden společný rys: obsahují nějakou formu křemičitanů skelné povahy (pucolánů), které v přítomnosti vody mohou i za pokojové teploty tvořit s vápnem kalcium-silikát-hydráty stejného typu, jaké vznikají během hydratace portlandského cementu. **Pucolánová reakce** se dá vyjádřit následujícím způsobem [2-4]:



Za pokojové teploty bývá tato reakce velmi pomalá a může probíhat několik měsíců. Její rychlost narůstá s jemností a s obsahem pucolánového podílu v příměsi.

Během hydratace portlandského cementu se uvolňuje velké množství hydroxidu vápenatého ( $\text{Ca(OH)}_2$  neboli portlanditu) jako výsledek hydratace  $\text{C}_3\text{S}$  a  $\text{C}_2\text{S}$ . Vznikající portlandit přispívá velmi málo k pevnosti zatvrdlé cementové pasty a může způsobovat problémy s trvanlivostí betonu, poněvadž může být velmi snadno vyluhován. Toto vyluhování má za následek růst porozity cementové pasty. Jediným pozitivním rysem  $\text{Ca(OH)}_2$  v betonu je zajištění vysokého pH, které zvyšuje stabilitu zoxidované vrstvy, která chrání a pasivuje výztuž.

Když jsou při výrobě cementu použity pucolány v adekvátním množství (20 - 30%), může být teoreticky veškerý hydroxid vápenatý vznikající při hydrataci cementu navázán do C-S-H gelu. Zjednodušeně to lze vyjádřit následovně [2-4]:



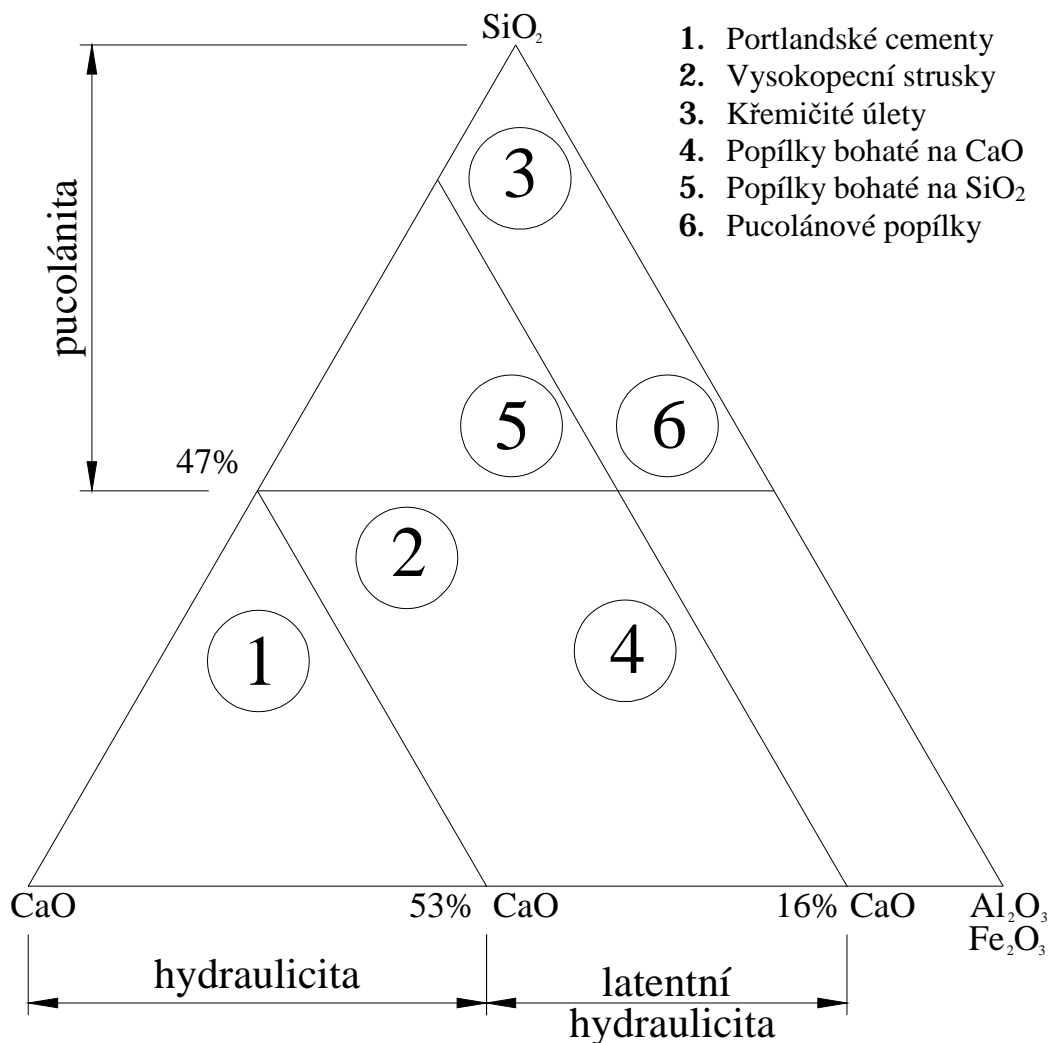
Ovšem podmínky v betonu jsou obvykle velice vzdáleny od tohoto ideálního stavu a pucolánová reakce není nikdy úplná.

Ačkoliv jsou v některých zemích jako Itálie, Řecko, Chile nebo Mexiko stále používány přírodní pucolány, nebyvají užívány ve speciálních betonech. Většina pucolánů, které se používají při výrobě speciálních betonů, jsou vedlejší průmyslové produkty. Mezi ty, které jsou užívány v největších objemech, lze zařadit popílek a křemičité úlety. Struska, která není pucolánovým materiálem, ale vyznačuje se latentní hydraulitou, bývá při přípravě vysokohodnotných betonů používána také. Všechny tyto materiály se v odborné literatuře označují jako minerální příměsi [5].

**Latentní hydraulita** je schopnost látky reakcí s  $\text{Ca(OH)}_2$  za normální teploty tvrdnout ve vodním prostředí. Podobné vlastnosti mají pucolánové látky, které se vyznačují vysokým obsahem aktivního  $\text{SiO}_2$  v množství nad 47%. Podmínkou těchto chemických reakcí je tzv. budič hydraulicity, což může být alkalické prostředí vytvářené v roztoku i jinými chemickými sloučeninami. Podmínkou aktivity příměsí je velký měrný povrch, který bývá přibližně stejný jako měrný povrch cementu. Velmi reaktivní křemičité látky však mají měrný povrch i větší jak  $25\,000\text{ m}^2/\text{kg}$  [5].

Pozice hydraulických a pucolánových látek lze znázornit v  $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$  ternárním diagramu (viz obr. 1). Poněvadž tyto materiály jsou vedlejší průmyslové produkty, je jejich chemické složení mnohem hůře definovatelné než složení

portlandského cementu, což vysvětluje velké plochy, které příměsi v ternárním diagramu zabírají. [5-8].



Obr. 1 Pozice hydraulických a pucolánových látek v ternárním diagramu [5].

## 1.2 POPÍLEK

### 1.2.1 ÚVOD

Při řešení problematiky likvidace průmyslových odpadů je jednou z nejnaléhavějších otázka velkého množství energetických odpadů, které vznikají v tepelných elektrárnách, v teplárnách i v jiných oborech výroby. Ve všech těchto závodech vzniká při spalování uhlí popel jako minerální podíl zbylých popelovin po „dokonalém“ spálení. Tento zachycený popel sestává zejména ze škváry, strusky a popílku [9-11].

**Škvára** je tuhý zbytek paliva a je produktem roštových kotlů z menších provozů, struska a popílek vznikají v ohništích granulačních, kterými jsou vybaveny větší a moderní provozové. Množství a vlastnosti produkované škváry, strusky a popílku se v poslední době velmi mění s podstatnou modernizací průmyslových topenišť. Starší kotelní zařízení s roštovým ohništěm, při němž odpadá velký podíl škváry, se totiž postupně nahrazují zařízeními s ohništěm granulačním nebo tavícím, při němž jediným odpadem je struska a popílek. Současné moderní technologie spalování využívají tzv. fluidní spalování, kdy vzniká jemnější popílek [9-11].

**Popílký** jsou drobné částičky popela unášené z ohniště korunou komína do ovzduší nebo zachycované v odlučovačích. Ve většině velkých provozů v ČR jsou již instalovány granulační kotle produkující 10-20% strusky a 80-90% jemného popílku, který je zachycován v mechanických nebo elektrických odlučovačích a jehož hromadění vyvolává stále větší problémy [9-11].

Rostoucí spotřebu elektrické energie česká energetika v nejbližší budoucnosti zabezpečuje stále ještě výrobou elektřiny v elektrárnách spalujících uhlí, i když převážná část přírůstku výroby je zabezpečována rozvojem jaderné energetiky. Základním zdrojem naší energetiky je přitom hnědé uhlí těžené v severočeském regionu, i když jeho těžba je stále omezoována. Právě vysoká spotřeba a spalování nízkokalorického a vysoce popelnatého uhlí způsobuje, že produkované množství popela je vysoké. Objemy zachycovaného popela rostou ještě rychleji než dosud také proto, že s postupnou modernizací a zdokonalováním techniky odlučovacího zařízení se zvyšuje množství nejjemnější popelové frakce – popílků. Popílký zachycené v mechanických a elektrických odlučovačích se buď dopravují systémem suchého odběru do expedičních zásobníků, nebo se v mokřém stavu splavují trubním systémem do odkališť [9-11].

Likvidace popela a popílků z elektráren a tepláren se u nás provádí většinou hydraulickým způsobem do dočasných nebo trvalých odkališť. Někde se také ukládají do báňských výsypek a do hlubinných dolů. Ukládání popílků v mokřém stavu do odkališť snižuje sice negativní důsledky jejich prašnosti, avšak v řadě oborů výroby způsobuje technologické potíže s jejich využitím, nebo ho přímo znemožňuje. V poslední době je s ohledem na zvýšený zájem betonářů zabezpečováno i skládkování popílku suchého [9-11].

Vlastnosti popílku závisí také na energetickém zdroji a jsou proto velmi různorodé, což podstatně ztěžuje jejich hromadné využití v různých oblastech národního hospodářství. Fyzikální vlastnosti popílků jsou velmi proměnlivé, neboť závisí na druhu paliva, typu kotlů, způsobu spalování, režimu elektrárny a odlučovacího zařízení.

U popílků odebraných přímo za odlučovacím zařízením se sušina pohybuje od 99 do 99,95% a u popílků ze složiště klesá na cca 85%. Vysoký obsah sušiny je příčinou velké prašnosti popílků. U sypné objemové hmotnosti se projevují rozdíly způsobené spalováním a účinností odlučovacího zařízení. U starších elektráren, které mají horší spalování, byla zjištěna nižší sypná hmotnost než u elektráren nového typu [9-11].

Měrná hmotnost elektrárenských popílků se pohybuje v rozsahu 1900 až 2500 kg/m<sup>3</sup> a do značné míry závisí na druhu spalovaného uhlí. V zrnitostním složení popílků jsou také značné rozdíly, např. sítem 0,05 mm propadá u některých popílků pouze 0,2% celkového množství, u jiných i přes 50%, čímž se potvrzují závislosti velikosti zrn na způsobu spalování. U popílků odebíraných ze složiště dochází k přesunu velikosti zrn k zrnitosti 0,8 mm. Z řady výzkumných prací vyplývá, že jednou z nejdůležitějších vlastností popílku je právě jeho zrnitost, která rozhoduje o možnosti jeho využití jako náhrady cementu, či vysokopecní strusky do různých cementových kompozitů.

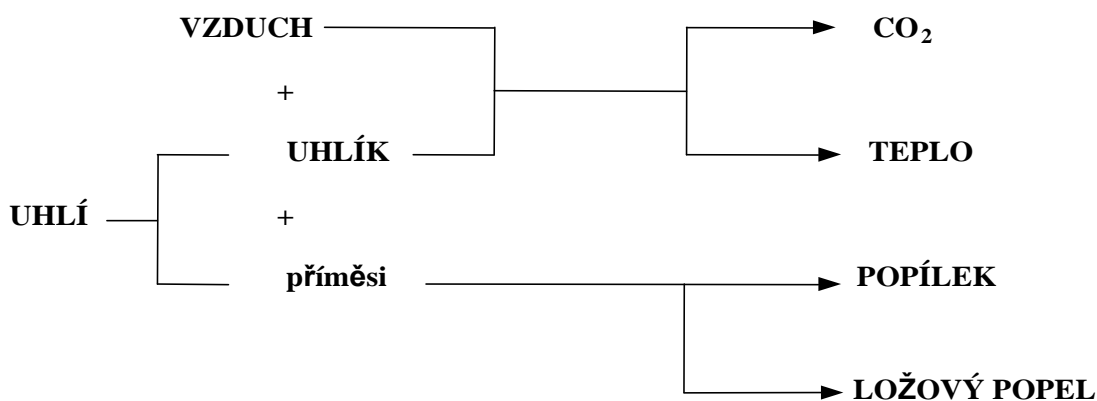
Nasákavost je rozdílná a může dosáhnout až 60% mezi popílků jednotlivých elektráren a téměř 10% u jedné elektrárny. Nejvyšší nasákavost mají popílků z elektráren s roštovým topením a nejnižší popílků z elektráren s granulačním topením [9-11].

Chemické vlastnosti popela a popílků jsou různé. Z uhlí jednotlivých dolů i téže uhelné pánve vznikají popílků odlišného chemického složení v závislosti na způsobu spalování, tj. systému kotle, teplotě spalování a rychlosti ochlazení popílkových zrn. Kromě toho některé závody používají směsi paliv, které nejsou homogenní a mění se během provozu. Různorodé chemické a fyzikální vlastnosti popílků ovlivňují možnosti a způsoby jejich využití. Vyžadují proto podrobné rozborů a výzkumná řešení, která se u nás i v ostatních zemích sledují již řadu let.

Požadované vlastnosti popílků jsou pro různé způsoby využití předepisovány příslušnými technickými normami, jejichž výčet je uveden v kapitole 2.

### 1.2.2 ROZDĚLENÍ POPÍLKŮ PODLE ZPŮSOBŮ SPALOVÁNÍ

Popílek lze definovat jako nerostný zbytek po spalování tuhých paliv v jemně mletém stavu. V současné době využívají tepelné elektrárny dvou odlišných technologií spalování tuhých paliv. Pracují buď v režimu vysokoteplotního spalování, případně využívají spalování paliva ve vlnosku, tzn. fluidního režimu spalování. Původ popílků, resp. technologie, při které vzniká jako odpad, má zásadní vliv na chemické a především mineralogické složení popílků, a tím ovlivňuje vlastnosti popílku a možnosti jeho uplatnění ve stavebních hmotách. Vyjma rozdělení elektrárenských popílků dle jejich původu, tj. na popílky pocházející z „klasického“ způsobu spalování a popílky z fluidních kotlů, lze jednotlivé typy elektrárenských popílků rozdělovat dle místa, ve kterém jsou zachycovány. V případě popílků z fluidních kotlů vzniká jednak popel ložový a jednak popílek, který je zachycován v elektrofiltrech. U popílků, které vznikají spalováním paliv „klasickým“ způsobem, lze dle typu odlučovače rozdělit popílek na hrubší, který je získáván v mechanických odlučovačích nebo na jemnější z elektrofiltrů [9-11]. Na obrázku 2 je uvedeno schéma vysvětlující vznik popílku. V této práci je analyzována možnost využití popílků z elektrofiltrů elektráren pracujících „klasickým“ způsobem.



Obr. 2 Schéma vzniku popílku [11].

#### Klasický popílek

Mineralogické složení popílků je ovlivněno především původem, chemickým a mineralogickým složením spalovaného uhlí a také podmínkami a průběhem spalovacího procesu. Při „klasickém“ způsobu spalování paliva (teploty cca 1400 až 1600°C) vznikají popílky, které obsahují 5,2 až 12,6%  $\beta$ -křemene, 2,0 až 29,3% mullitu ( $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ) a 56,2 až 84% skelné fáze, která zásadním způsobem ovlivňuje

reaktivitu popílků. Mullit se zúčastňuje reakce pouze ve velmi malé míře výhradně za hydrotermálních podmínek.

Popílek z černého uhlí má menší variabilitu vlastností než popílek hnědouhelný. Černouhelné popílký většinou obsahují skelná kulová zrna velikostí blížká zrnům cementu. Kulový tvar zrn zajišťuje lepší zpracovatelnost cementových kompozitů vyrobených z tohoto druhu popílku než při použití popílků s nepravidelným tvarem zrna. Zrna hnědouhelného popílku mají nepravidelný tvar, a oproti stejně velkým kulovým zrnům černouhelného popílku mají u zrn stejné velikosti vyšší specifický povrch, tj. větší reakční plochu.

Na použitých odlučovačích je závislá zrnitost popílku. Z mechanických odlučovačů je popílek hrubší (zrna větší než 0,09 mm jsou obsažena nad 20%, sypaná hmotnost je 900 až 1200 kg/m<sup>3</sup>) než z elektrostatických odlučovačů (zrna nad 0,09 mm do 20 %, sypaná hmotnost asi 800 kg/m<sup>3</sup>).

#### **Základními požadovanými technickými parametry jsou tedy:**

- nízká hodnota ztráty sušením - pod 1%,
- ztráta žíháním pod 4%,
- obsah SiO<sub>2</sub> nejméně 40%,
- obsah celkové síry do 3% a chloridů do 0,1%,
- dodržení limitní hranice obsahu radioaktivních nuklidů < 150 Bq/kg a přítomnosti toxických látek a těžkých kovů ve vodních výluzích.

#### **Reakce popílků v cementovém systému**

Popílek sám o sobě není hydraulický, tj. není schopen reagovat s vodou. V přítomnosti Ca(OH)<sub>2</sub>, např. z cementu, reaguje a vytváří stejné produkty, jaké vznikají při reakci cementu s vodou. Tato reakce se liší dle typu a druhu popílku a je označována jako pucolánová reakce. V popílku, který byl skladován delší dobu ve vlhku, může být pucolánový účinek porušen.

Při hodnocení pucolánové aktivity popílků je nutno brát v potaz nejen schopnost vázat Ca(OH)<sub>2</sub>, ale i časový průběh reakce mezi popílkem a hydroxidem vápenatým. Podle Venuata se pucolánová reakce začíná projevovat přibližně okolo 28. dne při podmínkách normálního zrání, přičemž pevnosti získané na vzorcích betonů s přídavkem popílku byly podstatně vyšší po 90. dnech normálního zrání.

Jednou z nevýhod použití popílků jako náhrady části cementu je snížení pevnosti malty v raném období. Vhodnou alternativou, kterou lze odstranit tuto nevýhodu je použití vyššího množství popílku než je množství nahrazovaného cementu. V rámci rozsáhlého výzkumu zaměřeného na využití popílku ve stavebnictví se uvádí, že popílků nahrazující část cementu jsou vhodné jen do takových kompozitů, kde je zabezpečeno dostatečné množství vody potřebné na hydrataci kvalitním ošetřováním. Jen za těchto okolností může dojít k vyrovnání, resp. zvýšení pevnosti kompozitů s popílků proti pevnosti kompozitů porovnávacích.

### **Fluidní popílek**

Některé z elektráren a tepláren používají technologii fluidního spalování za atmosférického tlaku. Mleté palivo s přísadou vápence, příp. dolomitu, se spaluje v cirkulující vrstvě při teplotě 850°C. V průběhu disociačního procesu se váže z paliva uvolňovaný SO<sub>2</sub> na CaSO<sub>4</sub>, což má značný význam z ekologického hlediska, neboť v opačném případě, v důsledku oxidu siřičitého v atmosféře, vznikají velmi škodlivé tzv. kyselá deště. V těchto zmodernizovaných provozech vznikají pevné odpady v podobě ložového popela a popílků z elektrofiltrů (odlučovačů). Výsledným produktem je pak směs popela z původního paliva, nezreagovaného odsiřovacího činidla (CaO s případnými zbytky CaCO<sub>3</sub>), síranu vápenatého, produktů reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. Vzhledem k tomu, že teploty spalování jsou při fluidních procesech nižší než při klasickém spalování, je nezreagovaný CaO přítomen ve formě tzv. měkce páleného vápna a je tedy reaktivní. Pro fluidní popílků je též charakteristický nízký obsah taveniny.

V důsledku transportu kouřových plynů z prostoru ohniště dochází k separaci jednotlivých frakcí této směsi. Jemné podíly jsou odnášeny spalinami ve formě úletu a hrubší zůstávají ve spalovacím prostoru. Úlet tuhých látek je z kouřových plynů odstraňován běžnými technologickými postupy (cyklóny, filtry). Každá fluidní spalovací jednotka proto zpravidla produkuje fluidní popílků dvojího druhu: popílek z prostoru ohniště (označovaný např. ložový) a popílek získaný z úletu (označuje se cyklónový, filtrový apod.). Vlastnosti obou těchto popílků se výrazně liší jak ve fyzikálních vlastnostech (granulometrie, měrný povrch, hustota, sypaná hmotnost), tak v chemickém a mineralogickém složení, i když pocházejí z téhož technologického procesu fluidního spalování a odsiřování. Stejně jako u popílku klasického se i u fluidních popílků obou druhů projevuje nevýhoda kolísavých vlastností, zejména



chemického složení, měrné hmotnosti a ostatních parametrů způsobených nestabilitou spalovacího procesu a variabilitou vlastností vstupních komponentů (uhlí a odsiřovacího činidla).

Pro zkoušení fluidních popílků jako jedné z přísad do cementu zatím neexistují normové předpisy. Fluidní popílky obsahují, na rozdíl od popílků klasických, vyšší množství měkce páleného reaktivního vápna (15 až 35%) a mají poměrně vysoký obsah  $\text{SO}_3$  (7 až 18%), jenž může způsobit v pojivu vznik rozpínavého ettringitu ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$ ).

Na rozdíl od klasických popílků, které se v cementářském průmyslu používají při výrobě některých cementů (viz. ČSN EN 197-1), nejsou dosud s fluidními popílky v českém cementářském průmyslu významnější zkušenosti a ani žádná z českých cementáren tento typ popílku nevyužívá.

### 1.2.3 VLASTNOSTI POPÍLKŮ

Částice jednotlivých druhů popílků se navzájem částečně odlišují, obecně však lze konstatovat, že majoritní podíl popílků je tvořen, pokud popílky vznikaly z dostatečně tekuté taveniny, sklovitými částicemi kulovitěho tvaru o průměru 1 až 100  $\mu\text{m}$ , čemuž přibližně odpovídá měrný povrch podle Blaina 200 až 300  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Částice popílků obsahují křemen, malé jehlicovité úlomky mullitu a malé množství hematitu a magnetitu. Některé z velkých částic popílků jsou duté kuličky s otvory, které obsahují rovněž sférické částice.

Výsledky různých měření měrné hmotnosti popílků prováděné v USA, Japonsku a Velké Británii prokázaly hodnoty v intervalu 2100  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  až 2400  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Nejmenší zjištěná hodnota měrné hmotnosti popílku byla 1960  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , nejvyšší hodnota měrné hmotnosti popílku byla zaznamenána 2790  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Měrná hmotnost se zvyšuje se zvyšujícím se obsahem  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Sypná hmotnost popílků je poměrně proměnlivým parametrem, který se pohybuje v intervalu 550  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  až 900  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Tento parametr je závislý především na druhu uhlí, jeho jemnosti a provozních podmínkách při spalování.

#### 1.2.4 CHEMICKÉ A MINERALOGICKÉ SLOŽENÍ POPÍLKŮ

Mineralogické složení popílků je závislé především na anorganických složkách ve spalovaném uhlí a podmínkách spalování. Obecně lze popílků vznikající klasickým způsobem spalování, z hlediska chemického složení, považovat za směs oxidu křemičitého, který se vyskytuje převážně ve sklovité fázi, a oxidu hlinitého, jenž je obsažen v mullitu a ve skelné fázi. Mineralogické složení popílků je ovšem velmi proměnné a závisí na původu, druhu a jemnosti práškového uhlí, podmínkách spalování a dalších faktorech. Dle některých autorů lze, z hlediska hydraulické aktivity, jednotlivé složky popílků dělit na:

##### Aktivní složky

- hydraulické amorfní ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),
- hydraulické krystalické (metakaolin, hlinitany vápenaté),
- nehydraulické (anhydrit,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ),
- budiče (alkalické soli).

##### Neaktivní složky

- nespálené uhlí,
- krystalické složky (magnetit, mullit, křemen).

Z hlediska chemického je majoritní složka popílků přibližně z 80 % tvořena oxidem křemičitým a oxidem hlinitým v přibližném poměru 2:1. Třetí podstatnou složkou popílků je zpravidla oxid železitý, jehož obsah činí cca 10 %. Mezi další oxidy, jejichž obsah v popílku je většinou nižší než 5%, patří  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ . Jako stopové prvky se v popílcích mohou dále vyskytovat  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_3$ , apod. Popílků většinou dále obsahují jistý podíl spalitelných látek a část nespalitelných látek, jejichž obsah závisí na druhu spalovacího agregátu, kvalitě a jemnosti mletí uhlí. Chemické složení popílků z jednotlivých tepelných elektráren spalujících uhlí jsou uvedeny v tabulce 1 [12].

Tabulka 1 Popílek Chvaletice, Mělník, Opatovice a Dětmorovice [9].

Složka	Chvaletice	Mělník	Opatovice	Dětmorovice
	Obsah [% hmotnostní]			
SiO <sub>2</sub>	56,82	55,9	51,9	52,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,93	29,3	27,6	24,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,18	4,7	5,15	6,4
FeO	nestan.	0,4	1,60	0,3
TiO <sub>2</sub>	2,02	1,7	1,57	1,0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nestan.	nestan.	< 0,1	< 0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	nestan.	0,1	0,2	0,4
CaO	1,79	2,2	2,07	4,0
MgO	1,31	1,4	1,03	2,8
MnO	0,03	< 0,1	< 0,1	0,1
K <sub>2</sub> O	1,79	1,6	1,82	2,8
Na <sub>2</sub> O	0,32	< 0,1	0,26	0,3
C	--	0,8	0,44	4,5
S	0,2	0,1	0,095	0,8
Ztráta žháním	0,74	1,05	4,84	3,37

Popílký se mohou vzájemně výrazně lišit také z fyzikálního pohledu. Jejich částice se mohou jevit jako jednoduché kulovité částice (obrázek 3) s křivkou zrnitosti podobnou portlandskému cementu, ale může jít také o duté koule. Někdy mohou mít částice hranatý tvar (obrázek 4).

Po chemické stránce mohou být různé popílký zařazeny do širokých skupin, například ASTM rozeznávají dva typy popílků, které mohou být použity jako minerální příměsi v betonu z portlandského cementu: třída F a třída C. Popílký třídy F jsou obvykle produkovány v elektrárnách spalujících antracit nebo extrakty, například ve východní části USA. Na druhé straně popílký třídy C vznikají při spalování lignitu nebo bitumenů, například na jihu a západě USA. Tyto popílký se vyznačují vysokým obsahem vápníku.

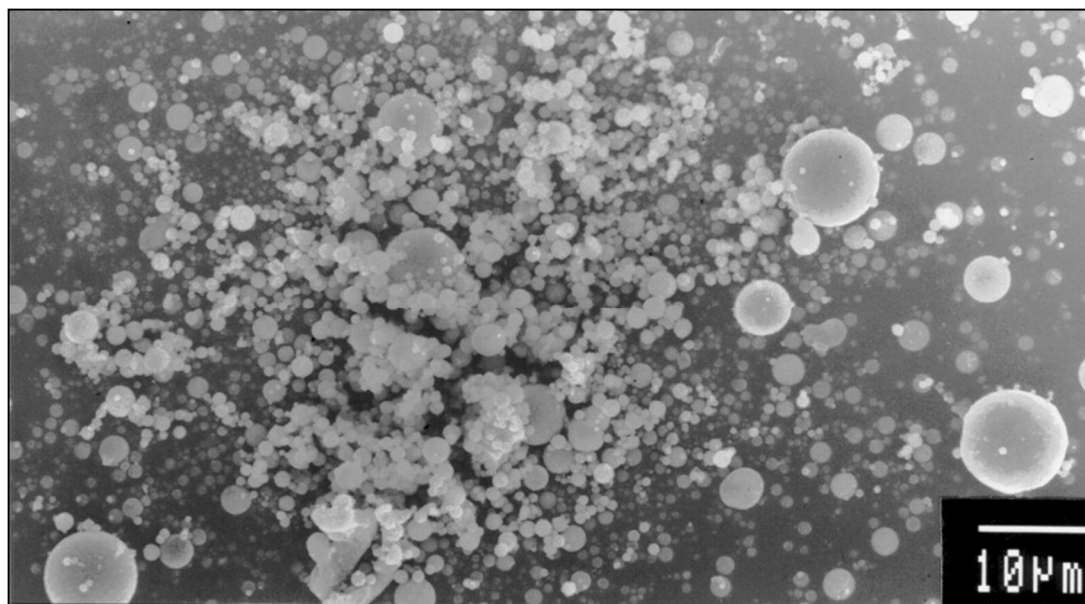
Tabulka 2 Chemické složení některých popílků v USA a Kanadě [1].

	Třída F1	Třída F2	Třída C	-	-
SiO <sub>2</sub>	59,4	47,4	36,2	24,0	13,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,4	21,3	17,4	18,5	5,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,9	6,2	6,4	17,0	3,5
CaO	2,6	16,6	26,5	24,0	59,0
MgO	1,3	4,7	6,6	1,0	1,8
Na <sub>2</sub> O ekvivalent	2,2	0,4	2,2	0,8	-
SO <sub>3</sub>	2,4	1,5	2,8	8,0	15,1
Ztráta žiháním	2,0	1,5	0,6	-	-
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90,7	74,9	60,0	59,5	22,5
Volné vápno	-	-	-	-	28,0

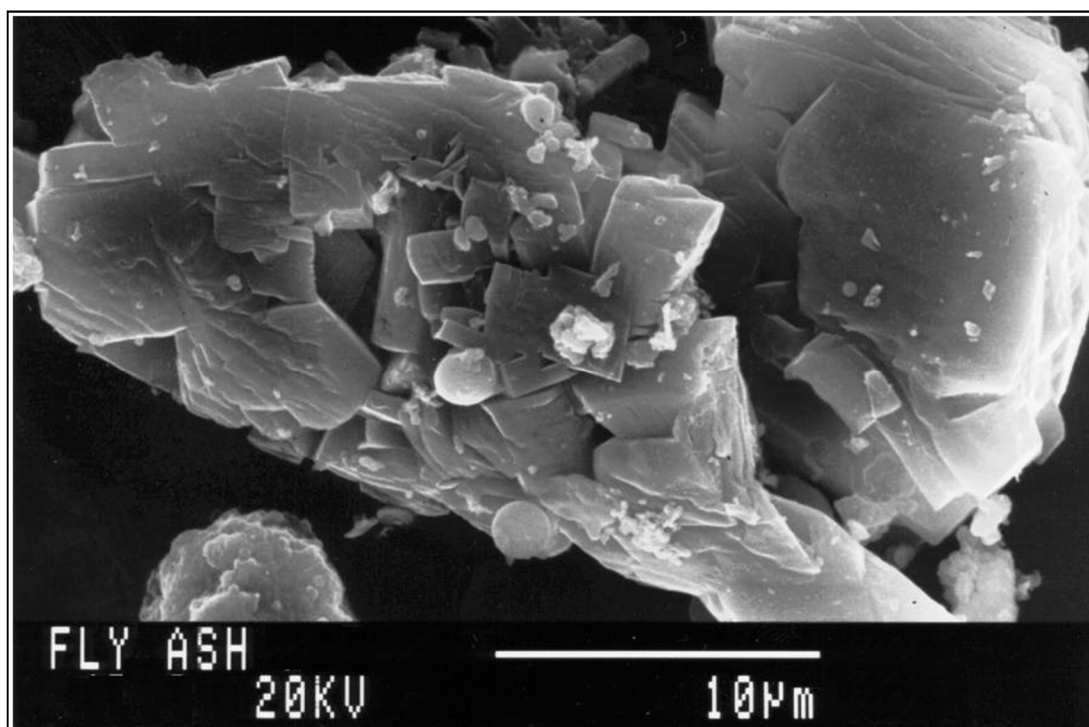
Ve Francii jsou popílký rozděleny do tří skupin: siliko-aluminátové skupina, která odpovídá hlavně třídě F podle ASTM, silikokalcitová skupina, která většinou odpovídá třídě C a sulfokalcitová skupina která se vyznačuje vysokým obsahem síry a vápníku současně.

Nehledě na výhody těchto třídění není vždy snadné zařadit daný popílek do určité kategorie a předpovědět jeho pucolánové vlastnosti. Většina popílků jsou pucolánové materiály, ale některé nemusejí mít pucolánové vlastnosti a některé jsou polohydraulické.

V každém případě pro podílení se na pucolánové reakci musí popílek obsahovat výrazné množství skelné fáze. To lze nejlépe zjistit rentgenovou difrakční analýzou, jak je uvedeno na obrázku 5.



Obr. 3 Kulovitá zrna popílku [2].



Obr. 4 Nepravidelný tvar částic popílku [13].

### 1.2.5 VÝBĚR POPÍLKU PRO BETONY VYSOKOHODNOTNÉ

Již bylo uvedeno, že hlavním problémem při použití popílku je, že termín popílek je všeobecné označení produktu, který se může měnit v širokých mezích. Veškerá zobecnění, týkající se popílků, musí být tedy vyslovena velmi opatrně. Kvůli jednoduchosti bude nadále užíváno rozdělení podle ASTM, které rozděluje popílky podle jejich chemického složení do dvou kategorií. Třída F zahrnuje popílky s nízkým obsahem vápníku (nízkovápenaté), zatímco třída C zahrnuje popílky s vysokým obsahem vápníku (vysokovápenaté) [1].

Kdykoliv je nalezen popílek, se kterým jsou zaznamenány dobré vlastnosti běžného betonu, je možné jej použít i pro přípravu vysokohodnotného betonu třídy I podle ASTM (od 50 do 75 MPa), protože zkušenosti ukazují, že není problém s dosažením patřičných pevností. Navíc ekonomika v tomto případě jasně mluví pro aplikaci popílku.

Případ vysokohodnotného betonu třídy II (od 75 do 100 MPa) už není tak jasný. Hodnota 75 MPa se dosud velmi často jeví jako horní limita pro většinu směsí s popílky. Existují ovšem případy, kdy byly popílky úspěšně použity i do betonů s pevností 90 nebo dokonce 100 MPa (Aïtcin a Neville, 1993). V těchto specifických případech je ovšem obtížné určit, proč je popílek tak účinný. Chybí totiž příslušné údaje o jeho fyzikálně-chemických vlastnostech [3].

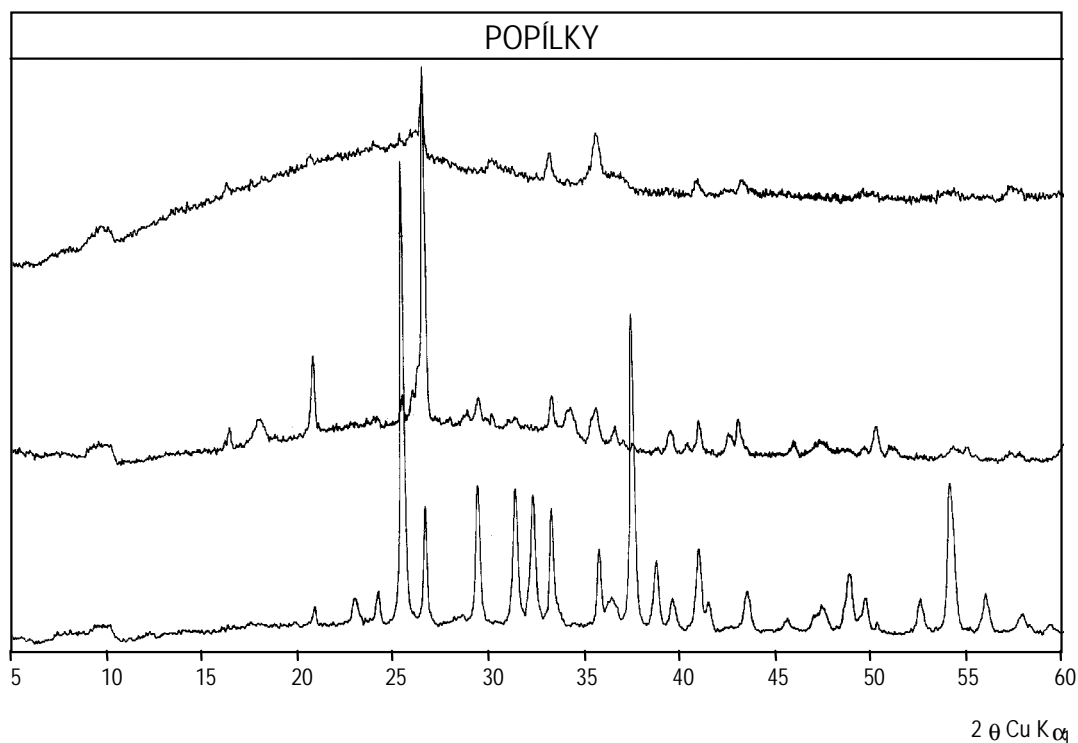
Na tomto místě můžeme poznamenat, že velmi perspektivní cestu pro popílek ve vysokohodnotném betonu nastoupily a sledují v laboratořích CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology). Touto cestou je použití vysokých dávek popílku a současné výrazné snížení vodního součinitele, což umožňuje vyrábět vysokohodnotné betony tříd I a II [3].

#### **Kontrola kvality popílků**

Je velmi důležité kontrolovat kvalitu popílku při výrobě vysokohodnotného betonu, neboť se patrně jedná o nejproměnlivější materiál v betonové směsi. Kontrola kvality a stejnoměrnosti složení popílku začíná chemickou analýzou. Důležité jsou zejména obsahy  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ , alkálií, uhlíku a  $\text{SO}_3$ . Kontrola obsahu  $\text{SO}_3$  je nutná u popílku z elektráren, kde je kvůli regulaci  $\text{SO}_3$  ve spalinách k uhlí nebo lignitu přidáván vápenec, jejichž reakcí pak vzniká síran vápenatý. Pokud síran vápenatý nezhoršuje kompatibilitu cementu a superplastifikátoru, nemusí být jeho

obsah až tak škodlivý. Jestliže ji ovšem ovlivňuje, můžeme s těmito popílků očekávat vážné reologické problémy [1].

Dále je nutné měřit měrný povrch podle Blaina. Ten musí být kontrolován pravidelně, aby se zachytilo kolísání v granulometrii a v obsahu uhlíku. Za třetí, velmi důležitá je pravidelná rentgenová difrakční analýza, kvůli zjištění změn ve skelné fázi. Čím více je v popílků skelné fáze, tím lépe. Z tohoto důvodu je také velmi užitečný petrografický rozbor na tenkých výbrusech, který pomůže v určení skutečného množství skelné fáze a mineralogického složení. Například popel z výbuchu sopky Svate Heleny nevykázal žádnou pucolánovou reakci, poněvadž je téměř zcela krystalický. Studium tenkých výbrusů také poskytuje dobrou představu o tvaru částic a rozložení fází co se týká granulometrie. Bohužel je tento druh průběžného zkoušení zřídka používán, ačkoliv může prakticky vyloučit riziko nákladných problémů v praxi [1].



Obr. 5 Rentgenové difraktogramy různých popílků [14].

### 1.2.6 PROBLEMATIKA VYUŽITÍ POPÍLKŮ DO BETONU V ČR

Popílký nacházejí široké upotřebení ve výrobě stavebních hmot a to ve výrobě maltovin, betonu, umělého lehkého kameniva, cihlářského a keramického zboží a také při výrobě injektážních malt a litých podlahových vrstev, ve výrobě vysokohodnotných a samozhutnitelných betonů či betonů vytvrzovaných alkalickým vytvrzovacím procesem.

Z ekonomického hlediska je velmi výhodné jejich zpracování přímo na stavbách, např. při budování silnic, železnic a při různých zemních pracích, při výrobě speciálních betonů s definovanými vlastnostmi. V našich podmínkách je problém využívání popílků velmi důležitý, ovšem i složitější než v jiných zemích, neboť spalování vysoce popelnatého a sirnatého hnědého uhlí vyvolává vysokou produkci méněhodnotných popílků.

Ve zpracování popílků zaostáváme za zahraničím a místo jeho využívání musíme investovat do budování zařízení na jeho složiště a odkaliště. Širšímu využívání popílků v našem stavebnictví brání, kromě zmíněných chemických a fyzikálních vlastností, ještě řada dalších překážek, které je nutno postupně překonat. Těžiště problematiky je nejenom v oblasti technické a technologické, ale i organizační a ekonomické a ve sladění resortních zájmů. Podmínky pro využívání popílků je nutné vytvářet nejenom u jejich odběratelů a uživatelů, ale i u jejich producentů a v ostatních resortech, kterých se tato problematika dotýká.

Již při vzniku a zachycování popílků v elektrárnách a jiných tepelných provozech spalujících tuhá paliva je také třeba zabezpečit, aby se vhodným řízením procesu spalování dokonale využívalo hořícího paliva tak, aby vznikající popelové zbytky neobsahovaly žádná, nebo jen zanedbatelná množství nespálených uhlíkových komponentů. Vzniklý popílek musí vyhovovat příslušné platné technické normě. Další problémy, které doposud komplikují využívání elektrárenských popílků, lze shrnout takto [15]:

- Jedná se především o to, že pro většinu způsobů využití popílků je nutná možnost odběru suchého popílku, která ovšem v našich elektrárnách vždy není, neboť popílký se převážně skladují v mokřém stavu v odkalištích. Odběr mokřého popílku z odkališť vyhovuje ve stavebnictví pouze při využití pro různé zemní práce, vylučuje však nebo alespoň komplikuje řadu dalších možností jeho zpracování. Ve většině elektráren chybí nejen odběrové zařízení, ale často i přístupové komunikace pro odběr popílku z odkališť.



- Popílek často vychází z energetických závodů společně se škvárou a jinými popelovinami a pro jeho využití by bylo nutné nákladné a obtížné třídění.
- Jakost popílků je časově a místně nerovnoměrná, u téhož závodu kolísá a jeho potřebná homogenizace v elektrárnách není možná. Žádný z našich producentů není schopen zajistit stálou kvalitu popílku vzhledem k velice kolísavé kvalitě uhlí a časté změně v původu spalovaného uhlí.
- Dobře propálený jemný popílek, zachycený v elektrofiltrech, se často zachycuje v zásobnících společně s mnohem hrubšími frakcemi, které byly zachyceny v mechanických odlučovačích a obsahují větší množství nespálených látek.
- Popílek má nízkou objemovou hmotnost, takže jeho přeprava na větší vzdálenosti je nevhodná. Je proto důležitá vzdálenost zdroje popílku od místa jeho spotřeby a způsobu dopravy, které rozhodují o celkové ekonomii využití popílků.
- U některých stavebních podniků je stále ještě nedůvěra k popílku, který je relativně novým materiálem, jehož výhody použití nejsou dosud dostatečně prezentovány.

### **Výroba běžných betonů**

Při výrobě běžných betonů se využívá popílek jako náhrada jemných frakcí kameniva. Dále se popílek využívá i jako náhrada cementů. Protože rozhodující složkou betonu je pro svoje vlastnosti a vysokou energetickou náročnost cement, hledají se cesty, které by umožnily snížit celkovou spotřebu cementu na 1 m<sup>3</sup> hotového betonu. V betonu, u něhož se nevyžaduje rychlé dosažení pevnosti, může náhrada cementu popílkem činit 20-30% (i více). Při dávkování 50 kg popílku na 1 m<sup>3</sup> betonu se uvádí úspora 20 kg cementu.

Jako částečné náhrady cementu při výrobě betonu lze ovšem využívat pouze jemnější popílky z elektrických odlučovačů, které mají vliv na konečné pevnosti betonů a druhotně též na úsporu cementu.

Popílek není jen výplňový materiál, ale má i funkci zlepšovat kvalitu betonu. Přejímá funkci jemné frakce a svými pucolánovými vlastnostmi působí na vývoj počáteční a konečné pevnosti. Působí také omezeně na tvoření trhlin, zmenšuje

dotvarování, zlepšuje odolnost proti mrazu a odolnost vůči agresivním vlivům, a tím zvyšuje i trvanlivost staveb.

Různé stavby pozemní, dopravní, vodní a kanalizační postavené z betonu s obsahem popílku se osvědčily i po mnohaletém vystavení těžkým provozním podmínkám. Např. velké betonové konstrukce v Severním moři, postavené z betonu s obsahem popílku  $60 \text{ kg/m}^3$ , byly po 16 letech v lepším stavu, než mladší stavby z betonu bez popílku, ale s větším obsahem cementu. Podobné případy se dají nalézt i u nás.

Popílký také vhodně ovlivňují zpracovatelnost betonu a jeho čerpatelnost, a tím jeho odolnost proti rozmrzení. Tyto vlastnosti příznivě ovlivňují dopravu betonové směsi v automobilových domíchávacích a možnost ukládání betonu pomocí čerpadel. Zvláště aktuální je to u transportbetonu, kde se plasticity směsi často dosahuje zvýšením dávek cementu.

Zpracování popílku nevyžaduje úpravu míšícího zařízení a vzhledem k lepší zpracovatelnosti směsí s popílkem se spotřebuje méně energie při jejich ukládání. Betony s příměsí popílku se také snadněji odbedňují, jejich povrch je hladší a stejnoměrnější. Příměs popílku zamezuje také odměšování vody z betonové směsi, a proto nedochází při jejím zhuťování k vytváření cementové vrstvičky na povrchu betonu, což má vliv na jeho odolnost vůči atmosférické korozi.

Optimální přídavek popílku zlepšuje nepropustnost betonu s malým objemem jemných frakcí. Udává se, že nahrazením 30% cementu popílkem se propustnost betonu sníží o jednu pětinu a nahrazením 50% cementu o jednu dvanáctinu. Zvýšená konečná pevnost betonů s popílkem a zmenšené smršťování má velký význam pro použití betonů při stavbě vozovek a dalších zvláště masivních konstrukcí.

Použití betonových směsí s popílkem je vhodné u všech běžných konstrukcí staveb bytových, občanských a inženýrských. Vhodnost se posuzuje v každém případě podle konstrukčních požadavků a z hlediska ekonomie výroby betonu. Ekonomický přínos se projeví zejména v úspoře cementu a někdy též kameniva. Závisí na kvalitě dodávaného popílku, nákladech na jeho dopravu, využití betonárny a dopravních prostředků. U čerpatelných směsí betonu se počítá s úsporou 20 až 30% portlandského cementu a u ostatních směsí s 15 až 20% cementu.

Betonové směsi s popílkem jsou výhodné především pro masivní konstrukce, jako jsou přehrady, mohutné základy nebo mosty apod. Přitom dávkování popílku je závislé na vyráběném druhu betonu a může se pohybovat v rozmezí 30 až 90 kg na

1 m<sup>3</sup> betonové směsi. Využití popílku při stavbě masivních konstrukcí přehrad je již běžné a popílek se zde používá jako částečná náhrada cementu. Snížení množství cementu má za následek malý vývin hydratačního tepla v masivním betonu, a tím omezení tvorby trhlin během smršťování.

V zahraničí existuje celá řada aplikací popílkových betonů do náročných betonových konstrukcí vystavených agresivním podmínkám s požadavky na jejich dlouhodobou trvanlivost a spolehlivost. V ČR byl popílek s úspěchem použit např. na stavbě přehrady Orlík ke snížení hydratačního tepla a zvýšení kvality betonu. Při dávkování 50 kg popílku na 1 m<sup>3</sup> betonu se dosáhlo značné úspory investičních nákladů, neboť nebylo nutné zavést výrobu speciálního cementu s nízkým hydratačním teplem, a dále úspory 60 000 tun cementu, byla přitom dosažena lepší kvalita betonu.

Velké výhody poskytuje příměs popílku při betonování vodních a podzemních objektů v agresivním prostředí, zejména pro zakládání komínů elektráren, kde poskytuje vyšší pevnost a odolnost proti účinkům síranů. V dnešní době je používání popílku jako složky betonu jednou z perspektivních cest pro zlepšení určitých vlastností betonu, eventuálně k získání jeho nových definovaných vlastností speciálního charakteru.

Ve smyslu dnes platné normy na popílek ČSN EN 450 *Popílek do betonu. Definice, požadavky a kontrola jakosti* bylo potvrzeno, že popílek jako neaktivní příměs typu I může vhodným způsobem přispět k optimalizaci granulometrie kameniva a v případě pucolánových vlastností může za jistých definovaných podmínek efektivně nahradit i určitou část cementu jako příměs typu II [2, 3, 14, 16].

### **Využití pro výrobu samozhutnitelných betonů (SCC)**

V posledním období se velice rozšiřuje uplatnění tzv. samozhutnitelných betonů, což představuje jeden z progresivních typů betonů s tzv. řízenými či definovanými vlastnostmi. Samozhutnitelný beton (SCC) patří ke speciálním vysokohodnotným betonům, který se vyznačuje ve fázi výroby vynikající zpracovatelností a nevyžaduje použití zhutňovacích zařízení při jeho ukládání. Vyznačuje se velkou odolností proti rozměšování a segregaci hrubších složek kameniva, umožňuje vyplnění i husté armatury bez potřeby vibrace.

Jeho použití představuje snížení pracnosti při provádění betonářských prací, urychluje významně jejich postup, zvyšuje se produktivita práce a zlepšují pracovní

podmínky (absence hluku z vibrace). Samozhutnitelný beton je složen z běžných složek, jako jsou cement, kamenivo s maximálním zrnem 8 mm (16 mm), jemná příměs zabezpečující stabilizaci čerstvého betonu, dále superplastifikační přísada a voda. Jako stabilizační příměsi se používají popílky, křemičitý úlet, mikromletý vápenec a podobné druhy mikroplniv. Používané superplastifikační přísady jsou na bázi polykarboxylátů, což představuje plastifikační přísady tzv. „nové generace“. Využívání SCC se v posledních letech začíná velice uplatňovat i v podmínkách ČR, neboť máme k dispozici kvalitní potřebné složky pro jeho výrobu a rozvinutou výzkumně-vývojovou základnu [2, 3, 14, 16].

### **1.2.7 REKAPITULACE ADMINISTRATIVNÍCH OMEZENÍ PRO VYUŽITÍ POPÍLKŮ V BETONU**

S použitím popílku do betonu, je spojena řada legislativních opatření, předpisů a norem, jejichž cílem je zabezpečit jakost samotného popílku pro jednotlivé oblasti použití a také jakost výrobků a konstrukcí pro jejichž výrobu je popílek použit. Popílek jako jedna ze vstupních surovin pro výrobu betonu musí v první řadě splňovat kvalitativní kritéria harmonizovaných technických norem, jejichž splnění musí výrobce doložit certifikátem vystaveným příslušným certifikačním orgánem.

#### **Dokumenty**

Popílek dodávaný jako vstupní surovina pro výrobu betonu, i když ve formě svého vzniku je v podstatě odpadním produktem, je nutno považovat za výrobek podle Zákona č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů v platném znění a NV č. 190/2002 Sb. Popílek jako výrobek musí být v souladu se směrnicí 89/106/EHS ve znění směrnice 93/68/EHS Rady Evropského společenství.

Bezpečnost popílku z hlediska obsahu přírodních radionuklidů musí být prokázána podle vyhlášky SÚJB č. 307/2002 Sb. ve znění vyhlášky č. 499/2002 Sb. o radiační ochraně.

Technické parametry popílku jako latentní hydraulické příměsi druhu II pro výrobu betonu určuje ČSN EN 450-1 Popílek do betonu – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Způsob hodnocení shody určuje ČSN EN 450-2 Popílek do betonu – Část 2: Hodnocení shody. Specifické zkušební postupy pro zkoušení popílku uvádí ČSN EN 451-1 Metody zkoušení popílku – Část 1: Stanovení obsahu volného oxidu

vápenatého a ČSN EN 451-2 Metody zkoušení popílku – Část 2: Stanovení jemnosti proséváním za mokra.

Technické parametry popílku v případě použití do betonu jako téměř inertní příměsi druhu I musí odpovídat požadavkům ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu.

Použití popílku jako příměsi druhu I a II pro výrobu betonu upravuje zejména česká technická norma ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Další požadavky pro použití popílku do betonu dopravních staveb jsou obsaženy ve směrnici Ministerstva dopravy ČR Technické kvalitativní podmínky staveb dopravních komunikací (TKP), kap. 18 Beton pro konstrukce.

### **Požadavky**

- Požadavky na vlastnosti popílku do betonu jako **příměsi druhu II podle ČSN EN 450 - 1** zahrnují požadavky na chemické složení – ztrátu žháním, obsah chloridů (Cl<sup>-</sup>), obsah oxidů (SO<sub>3</sub>, CaO, SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), obsah alkálií (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), obsah fosforečnanů (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) a na fyzikální vlastnosti samotného popílku a pojivové pasty s popílkem – jemnost, měrnou hmotnost, objemovou stálost, náročnost na vodu a průběh tuhnutí pojivové pasty a index účinnosti v maltě
- Požadavky na kvalitu popílku do betonu jako **příměs druhu I podle ČSN EN 12620** zahrnují především požadavky na granulometrii, obsah chloridů (Cl<sup>-</sup>) a obsah síry (jako SO<sub>3</sub> i celkově).

Použití vhodného popílku druhu II do betonu upravuje ČSN EN 206+A1 zejména s ohledem na poměr popílku a cementu v pojivu a s tím související výpočtové parametry betonu (minimálního množství cementu v betonu a maximální hodnoty vodního součinitele) předepsané pro příslušný stupeň vlivu prostředí (SVP) v tabulce NA. F.1 a NA.F2. normy.

Jedná se o koncepci k-hodnoty, která umožňuje vzít v úvahu pro výpočet ekvivalentního vodního součinitele (hmotnostní poměr voda/cement) upravený vztah ve formě  $\text{voda/cement} + k \times \text{příměs}$ , respektive umožňuje výpočet sníženého doporučeného minimálního obsahu cementu. Parametry k-hodnoty lze použít pro beton s cementem portlandským (CEM I), portlandským struskovým (CEM II/A, B - S) a vysokopecním (CEM III/A) podle ČSN EN 197-1. Použití koncepce k-

hodnoty s jinými druhy cementů se přitom nevylučuje za podmínky, že bude prokázána jejich vhodnost pro určité prostředí.

Maximální množství popílku jako příměsi druhu II, které je možno použít při výpočtu s k-hodnotou, musí vyhovovat hmotnostnímu poměru: popílek/cement  $\leq 0,33$ . Další množství popílku použitého v betonu nad tento limit již nelze zahrnout do výpočtu ekvivalentního vodního součinitele ani minimálního množství cementu pro daný SVP. Pro beton obsahující cement CEM I 32,5, CEM II/A, B-S a CEM III je dovoleno použít hodnoty  $k = 0,2$  a pro beton obsahující cement CEM I 42,5 a vyšší je dovoleno použít hodnoty  $k = 0,4$ .

Při úpravě skladby betonu zavedením k-hodnoty lze snížit doporučený minimální obsah cementu pro příslušný SVP maximálně o množství  $k \times$  (minimální obsah cementu – 200)  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , avšak celkové množství pojiva (cement + popílek) nesmí být menší než je minimální obsah cementu požadovaný v tab. NA. F.1 pro dané prostředí.

Koncepce k-hodnoty se nedoporučuje použít pro beton obsahující kombinaci popílku se síranuvzdorným cementem CEM I pro stupně vlivu prostředí XA2 a XA3 se síranovým působením a nesmí se použít pro stupně vlivu prostředí XF2 a XF4.

### **Z výše uvedeného plyne:**

- při použití popílku jako náhrady cementu v podílu vyšším než je 25 % hm., tj. při poměru popílek/cement  $> 0,33$ , nelze použít do výpočtu ekvivalentního vodního součinitele ani minimálního množství cementu celou dávku popílku,
- použitím pouze předepsaných hodnot součinitele  $k$  (0,2 a 0,4) je v závislosti na druhu cementu skokově omezen průmět použitého množství popílku do výsledné hodnoty vodního součinitele .

Vyšší hodnoty kalkulovaného ekvivalentního vodního součinitele pak neumožňují zejména u náročnějších stupňů vlivu prostředí (XC4, XD2-3, XA2-3) použití jinak technicky vyhovujícího betonu (pevnost, vodonepropustnost, trvanlivost).

Použití vhodného popílku druhu II do betonu upravuje TKP ŘSD, kap. 18, které nad rámec požadavků v ČSN EN 206+A1 omezují použití popílku pocházejícího ze spalování u hnědého uhlí.

V TKP Staveb Českých drah, v TKP Staveb Ředitelství vodních cest ČR a ČSN 736123 Stavba vozovek – Cementobetonové kryty žádné další omezující podmínky pro použití popílku do betonu uvedeny nejsou a tyto předpisy odkazují na ČSN EN 450-1 a ČSN EN 206+A1 případně se odvolávají na již zmíněné TKP ŘSD.

### **Přehled „popílkových“ norem pro beton, malty a maltoviny:**

- ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- ČSN P 73 2404 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplňující informace
- ČSN EN 450 Popílek do betonu. Definice, požadavky a kontrola jakosti
- ČSN EN 450-1+A1 Popílek do betonu - Část 1: Definice, spec. a kritéria shody
- ČSN EN 450-2 Popílek do betonu - Část 2: Hodnocení shody
- ČSN EN 197-1 Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití
- ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu
- TNI CEN/TR 15677 Popílek ze spalování - Zpráva o situaci v Evropě
- ČSN 72 2071 Popílek pro stavební účely - Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení
- ČSN 72 2072-1 Popílek pro stavební účely - Část 1: Popílek jako aktivní složka maltovin
- ČSN 72 2072-2 Popílek pro stavební účely - Část 2: Popílek jako příměs při výrobě malt
- ČSN 72 2072-3 Popílek pro stavební účely - Část 3: Popílek pro výrobu popílkových směsí
- ČSN 72 2080 Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely - Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení
- ČSN P 72 2081-3 Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely - Část 3: Fluidní popel a fluidní popílek pro výrobu vibrovaných a vibrolisovaných výrobků
- ČSN P 72 2081-13 Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely - Část 13: Fluidní popel a fluidní popílek pro výrobu maltovin

## 1.3 HVFAC VE SVĚTĚ A V ČR

### 1.3.1 DEFINICE

Termín HVFAC – beton s vysokým obsahem popílku použil Malhotra koncem osmdesátých let 20. století. Tento beton se vyznačuje malým vodním součinitelem a min 50% náhradou cementu popílkem zařazeným dle ASTM do třídy F. Díky nízkému vodnímu součiniteli a použití superplastifikátorů je zpracovatelnost sednutím kužele na úrovni 150-200 mm. V situacích, kdy nejsou požadovány vysoké pevnosti v tlaku a vyšší zpracovatelnost, lze do jisté míry použití přísad zlepšujících konzistenci omezit.

U HVFAC se uvádí, že mají dobrou zpracovatelnost, malý vývin hydratačního tepla, nižší počáteční pevnosti, ale vysoké pevnosti ve vysokém stáří. Rovněž mají malé smrštění, vysokou trvanlivost a v podstatě je můžeme zařadit do vysokohodnotných betonů [1].

#### **V literatuře [1] se uvádí následující vlastnosti definující HVFAC:**

- Min. 50% náhrada cementu popílkem (jiné zdroje mluví o náhradě od 30%).
- Malý obsah vody, obvykle pod  $130 \text{ kg/m}^3$ .
- Dávka cementu kolem  $200 \text{ kg/m}^3$ .
- Pevnost v tlaku ve stáří 28 dní 30 MPa nebo vyšší, sednutí kužele vyšší jak 150 mm a vodní součinitel na úrovni 0,3 (voda/pojivo včetně popílku). Vlastnosti jsou dosaženy díky použití velkého množství superplastifikátorů případně dalších přísad.
- U betonů odolných proti mrazu a působení CHRL se používají provzdušňující přísady.
- Betony s nižšími pevnostmi (pod 30 MPa) ve stáří 28 dní mají vodní součinitel (voda/pojivo včetně popílku) kolem hodnoty 0,4, obvykle se nepoužívají superplastifikátory a sednutí kužele je nižší jak 150 mm.

### 1.3.2 POUŽITÍ

Obecně lze říci, že o HVFAC lze mluvit od náhrad 30% cementu popílkem v závislosti na tom, v jaké lokalitě byl daný HVFAC použit. V zahraničí se HVFAC uplatňuje v transportbetonu a to především u tříd pevnosti C16/20 až C30/37, typickým použitím jsou monolitické konstrukce jako např. základové konstrukce, sloupy, desky,



průvlaky, opěrné stěny, betonové chodníky atd. Další uplatnění HVFAC je u předepjatých nosníků a okrajově i u stříkaného betonu.

Hlavním přínosem betonů s vysokou dávkou popílku je kromě velmi dobré zpracovatelnosti v čerstvém stavu také trvanlivost ztvrdlého betonu. Konkrétně se jedná o vyšší odolnost ztvrdlého betonu vůči korozi způsobené agresivním prostředím a mrazem. HVFAC představují velmi dobrou prevenci expanzních reakcí sulfátového a alkalicko-křemičitého typu. Díky vysokému obsahu popílku dochází k omezení šířky mikrotrhlin a tím zvýšení spolehlivosti z hlediska mezních stavů použitelnosti.

Nespornou a nezanedbatelnou výhodou HVFAC betonu je ekologické hledisko, neboť takové betony lze označit jako takzvané „green concretes“. Přidáme-li k výše uvedeným výhodám hledisko ekonomické, nelze se divit, že se využití HVFAC dynamicky celosvětově rozvíjí, a to jak v USA a Kanadě, tak i v Číně, Indii, Rusku a západní Evropě.

### 1.3.3 PŘÍKLADY POUŽITÍ HVFAC

V literatuře lze nalézt celou řadu receptur použitých pro HVFAC. Typické složení betonů v závislosti na jejich pevnosti po 28 dnech je uvedeno v tabulce 3. Poměr vody k pojivu (cement+popílek) se pohybuje v dostupných recepturách mezi hodnotami 0,33 – 0,44. Pevnosti v tlaku, zejména krátkodobé závisí na konkrétním složení. Pevnosti v tlaku ve stáří 7 dní se pohybují potom ve velmi širokém rozmezí 11 – 36 MPa.

V odborných publikacích např. [1] je uvedena celá řada příkladů použití HVFAC a to zejména v zahraničí. Některé příklady jsou uvedeny na obrázcích 6 - 8. Z realizací v ČR stojí zejména za zmínku přehrada Orlík, kde bylo větší množství popílku použito ke snížení hydratačního tepla a zvýšení kvality betonu. Při dávkování 50 kg popílku na 1 m<sup>3</sup> betonu se dosáhlo značné úspory investičních nákladů, neboť nebylo nutné zavést výrobu speciálního cementu s nízkým hydratačním teplem, a dále úspory 60 000 tun cementu, který byl nahrazen právě popílkem. O dosažené kvalitě betonu informoval prof. Bittnar v článku Orlická přehrada – beton s příměsí popílku po 50 letech.

Tabulka 3 Složení HVFAC v závislosti na pevnosti v tlaku v  $\text{kg/m}^3$  [1].

Složení HVFAC v závislosti na pevnosti v tlaku v $\text{kg/m}^3$			
Složka	Pevnost betonu ve stáří 28 dní [MPa]		
	20	30	40
voda	120-130	115-125	115-120
CEM typ I nebo II dle ASTM	125-130	155-160	180-200
popílek	125-130	215-220	220-225
DTK	cca 1170	cca 1200	cca 1110
HK do 22 mm	cca 800	cca 750	cca 750
superplastifikátor	v závislosti na požadované konzistenci		
provzdušňující přísada	v závislosti na požadovaném obsahu vzduchu		



Obr. 6 Přehrada Orlík – použití popílkobetonů z důvodu snížení vývinu hydratačního tepla, 1956 - 1961 [17].



Obr. 7 Park Lane Hotel - užití HVFAC na vyztužené sloupky, Canada, 1988 [18].



Obr. 8 Wurster Hall, University of California – HVFAC byl použit na pilíře a základy, USA, 2001 [19].

## 1.4 POPÍLKY S OBSAHEM AMONIAKU

### 1.4.1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Výroba betonu s přidavkem elektrárenského popílku vznikajícího při selektivní nekatalytické redukci oxidů dusíku SNCR (reakce redukčních činidel např. močoviny nebo čpavkové vody), při které se odštěpují čpavek s oxidem dusnatým (NO) a oxidem dusičitým (NO<sub>2</sub>), manipulace s ním, aplikace a následné emise amoniaku do vnitřního prostředí staveb vyvolávají otázku rizika překročení hygienických limitů pro koncentraci amoniaku v ovzduší (ČSN EN 4502-1 v čl. 5.4.2 uvádí “Popílek nesmí obsahovat látky, které by po uvolnění z betonu byly nebezpečné pro zdraví, hygienu a životní prostředí”, což amoniak je). Je pak otázkou, jak vysoké koncentrace amoniaku v ovzduší jsou, zda jsou “nebezpečné pro zdraví, hygienu a životní prostředí”. Vedle těchto otázek jsou otázky technologické tzn. kvalita takovýchto popílků z pohledu vlivu na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Výsledkem je nejistota bezpečného využívání takovýchto popílku na straně výrobce betonu. V konečném důsledku tak dochází k omezování používání takovýchto popílků, neboť potenciální riziko (neexistence limitů) při používání popílku jako částečné náhrady cementu převyšuje možnou úsporu plynoucí z nižší ceny této pucolánové příměsi (kterou jistě i kontaminovaný popílek stále je).

Rok 2016 přinesl závazně nové legislativní opatření upravující emisní limity produkovaných spalin [20]. Nároky na kvalitu produkovaných spalin jsou poslední roky neustále zpřísňovány, proto jsou zejména výrobci elektrické energie, pocházející z energetických jednotek spalujících uhlí, nuceni zavádět dodatečné ekologizační technologie. Nejvíce nová legislativa zpřísňuje kontrolu produkce emisí oxidů dusíku, které ještě v nedávných dobách stály zcela mimo stranu zájmů. Bylo proto vyvinuto několik způsobů nových ekologizačních technologií v rámci zkvalitnění redukce oxidů dusíku, které se od sebe zásadně liší zejména nutností zásahu do spalovacího procesu nebo do konstrukce celého spalovacího agregátu. Většina tepelných elektráren a spaloven na území České a Slovenské republiky se však zejména z ekonomických důvodů ubírá jednotnou cestou, zavedením selektivní nekatalytické redukce oxidů dusíku (dále jen SNCR).

Zmíněná metoda je založená na redukci oxidů dusíku pomocí vstřikování roztoku močoviny nebo čpavkové vody do spalovací komory agregátu. Po vstřiku činidel dochází k velkému množství chemických reakcí redukcí škodlivé NO<sub>x</sub> až

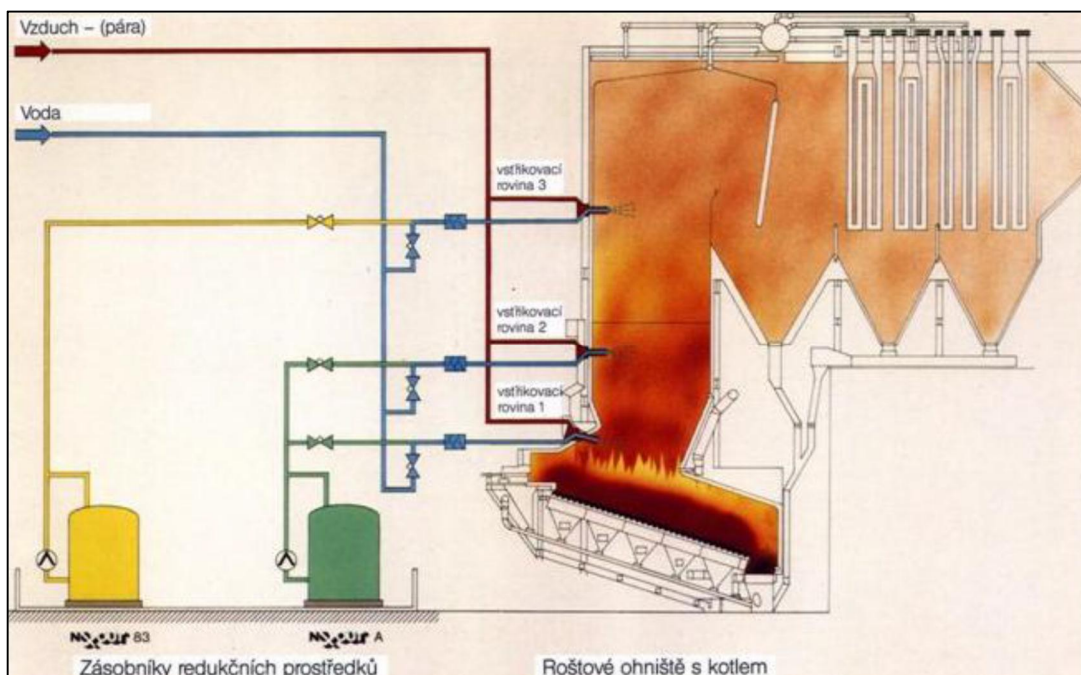
na dusík a vodu [21]. Princip viz obrázek 9. Zachytávaný zájmový popílek je tak přímo ve styku s vstříkovaným činidlem. Přímý styk vysokoteplotního úletového popílku se vstříkovaným médiem vede ke skutečnosti, že popílký, které prošly popsáním mechanismem SNCR obsahují zvýšené množství amonných solí. Amonné soli obsažené v popílku poté velice rychle reagují s látkou alkalické povahy, jako je například vápno nebo cement za úniku  $\text{NH}_3$ , který je spojen s velice nepříjemným zápachem a v tudíž s hygienickými limity při užívání [22].

Z některých tuzemských i zahraničních článků je patrné, že proces SNCR přináší i další negativní dopady na produkovaný úletový popílek, jako je například jiná morfologie jeho zrn spojená s dopadem na následné reologické chování betonů. Otázkou je i vlastní účinnost přísad do betonu, kterou lze vyřešit jejich správnou modifikací při zachování účinku obdobného jako při nedávném používání popílků bez SNCR.

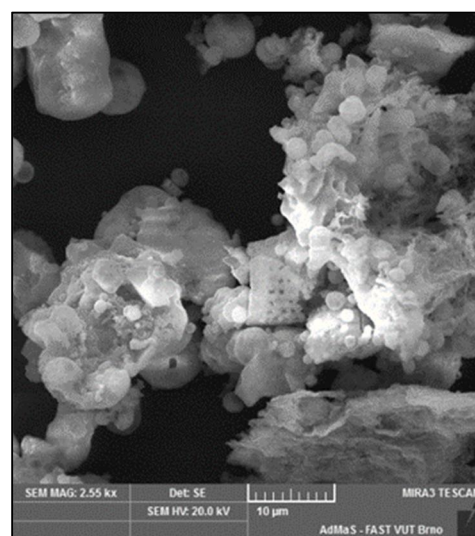
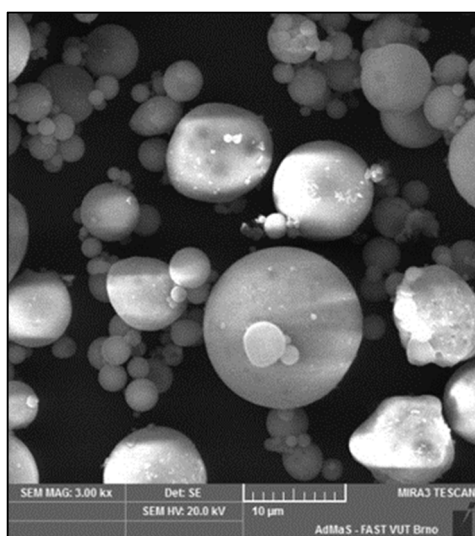
Obecně je klasický vysokoteplotní popílek spojován s několika pozitivními přínosy při jeho použití pro výrobu betonové směsi. Jmenovat lze zejména jeho pozitivní dopad na reologii cementové pasty (platí pouze pro některé lokality popílků) díky jeho vhodné morfologii zrn, regulaci vývinu hydratačních teplot a pucolánovou reakci s pozitivním dopadem na mechanické parametry kompozitu [23].

Vysokoteplotní úletový popílek je téměř vždy spojován s pozitivním dopadem na reologii cementové pasty vyrobené za jeho použití. Tato skutečnost je dána výhodnou morfologií zrn, které jsou téměř kulovité povahy a disponují z velké části zeskelněným povrchem. Taková zrna v kompozitu dokáží působit jako „kuličková ložiska“ [24]. Vznik těchto zrn je dán zejména vysokou teplotou spalování a principem jejich separace ze spalin během pozvolnějšího chlazení.

Je-li však do systému spalování aplikována navíc technologie SNCR, během které je redukční činidlo nejčastěji vstříkováno přímo do prostor spalovací komory o teplotě 900 až 1100 °C, lze očekávat změnu morfologie popílku unášeného spalinami během takového náhlého teplotního šoku. Náhlý teplotní šok by mohl způsobit až explozi a rozpadavost zrn popílku a následné shlukování těchto drobných částecek. Tato skutečnost byla prokázána například v [23] viz obrázek 10 a obrázek 11.



Obr. 9 Schéma tepelné elektrárny se systémem SNCR [37].



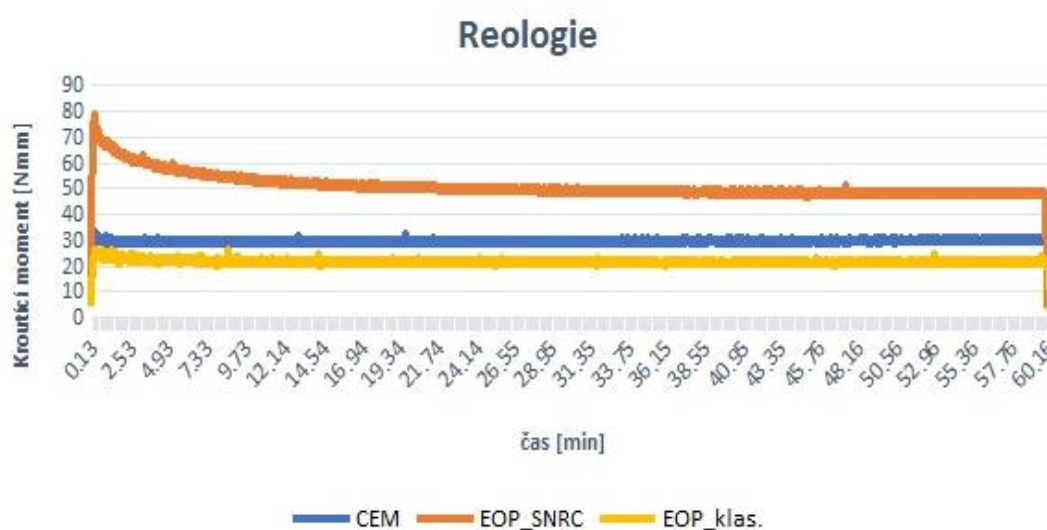
Obr. 10 Popílek bez SNCR 3000x zvětšeno. Obr. 11 Popílek po SNCR 3000x zvětšeno.

Změna v morfologii nutně vede ze změně reologie cementového kompositu. Z grafického průběhu zkoušky reologie je patrné, že mezi popílkem, který prošel SNCR a mezi popílkem, který nebyl SNCR podroben, je patrný značný rozdíl z hlediska jejich dopadu na reologii cementové pasty. Dle očekávání a obecně platných úsudků, popílek, který neprošel SNCR působí pozitivně na konzistenci cementové pasty a snižuje tak kroučící moment z hlediska provedené zkoušky. Naopak popílek, který prošel SNCR, reologii cementové pasty ztlačně zhoršuje, viz obrázek 12. Potvrzuje

se tak, že zrna nepravidelného tvaru, popřípadě shluky vytvořené nejspíše z úlomků rozpadlých zrn popílku po SNCR jsou značně porézní a vodonáročnější.

Pro dosažení stejného stupně konzistence cementové pasty by bylo nutné navýšit vodní součinitel takového kompozitu. Každé navýšení vodního součinitele však může působit negativně na výsledné mechanické parametry kompozitu [23].

S využitím nově koncipovaných přísad do betonu, které s tímto efektem budou uvažovat, lze docílit zmírnění nebo zamezení zvyšování vodonáročnosti a v konečném důsledku tedy i vodního součinitele betonu. Nedílnou součástí řešení ale musí být nově koncipovaný návrh složení betonové směsi.



Obr. 12 Reologie analyzovaných popílků [23].

Dalším kritériem, které je nutné vzít v úvahu při využití popílků po SNCR, je vliv na pevnostní charakteristiky betonu a to např. pomocí indexu účinnosti tak, jak bylo publikováno např. ve [23]: *Výsledky indexů účinnosti zcela nepotvrzují závěry publikované některými výzkumníky, že SNCR je prakticky bez dopadu na mechanické parametry kompozitů modifikovaných těmito popílky. Kontaminované popílky amonnými solemi po SNCR vykazují výrazně vyšší indexy účinnosti v počátečních dnech zrání kompozitu. Po delší době zrání tyto směsi dosahují mírně nižší hodnoty indexu účinnosti než popílky, které SNCR neprošly. Zde se projevuje pravděpodobně vliv kyseliny mravenčí, která je používá jako urychlovač.*

Opět je tedy patrné, že při bezpečně nastavených limitech pro volbu popílku lze nalézt technické řešení, které umožní vytvoření vhodných receptur betonu pro

aplikaci v transportbetonu a to v kombinaci nově navržených přísad, které umožní eliminovat nevýhody denitifikovaných popílků.

#### 1.4.2 CHEMICKÉ VLASTNOSTI

Při redukci  $\text{NO}_x$  ve spalínách metodami SNCR resp. SCR dochází ke kontaminaci popílku amoniakem, samozřejmě v různých formách. Vzniká tak tzv. amoniakální popílek. V [23] je uvedeno, cituji:

*Při selektivní nekatalytické redukci malá část amoniaku zůstává v kouřových plynech, hovoříme zde o tzv. čpavkovém skluzu. Amoniak se pak váže na popílek, respektive dále následnými reakcemi dochází k přeměně na další amonné produkty, které v popílku zůstávají. Jako klíčové pro porozumění interpretace přítomnosti amoniaku v popílcích je nutné zmínit, že v českých podmínkách je amoniak v popílku vázán zcela majoritně v podobě amonných solí, což bude stručně popsáno v další kapitole. Případy chemisorpce plynného amoniaku jsou reálné pouze při velkých čpavkových skluzech, které nejsou v ČR běžné (zpravidla 1-5 mg/m<sup>3</sup>). Standardně se v popílcích stanovuje amoniak, kdy tento je ale analyticky alkalickou reakcí převáděn z přítomných amonných solí. Koncentrace amoniaku vázaného v popílku závisí na koncentraci amoniaku v kouřových plynech v poměru 50 : 1. Jestliže je koncentrace amoniaku v kouřových plynech vyšší než 2 ppm, pak amoniakální popílek obsahuje většinou více než 100 ppm amoniaku. Při selektivní nekatalytické redukci je v koncových kouřových plynech obvyklá hodnota amoniaku 5–20 ppm a amoniakální popílek pak obsahuje v některých případech (zejména v provozech USA) až 1 000 ppm amoniaku. Při katalytické redukci koncové kouřové plyny obsahují 0–5 ppm amoniaku a amoniakální popílek poté obsahuje 0–250 ppm amoniaku [25, 26].*

Z citátu vyplývá, že se vlivem zavedení technologie SNCR resp. SCR objevuje v popílku nová chemická látka, amoniak v různých formách, která není specifikována v ČSN EN 450-1, kapitola 5.2. Požadavky na chemické vlastnosti.

Zcela logicky tedy není zdánlivě stanoven žádný konkrétní limit obsahu amoniaku v popílku do betonu a neexistuje tedy ani konkretizovaný požadavek na případnou kontrolu jeho obsahu. Podíváme-li se však podrobněji na ustanovení normy [28], nalezneme v ní v článku 8. Kritéria shody v tabulce pod číslem 18 požadavek na kontrolu vlastnosti „Nebezpečné látky a radioaktivní záření“. Radioaktivní látky v popílku jsou monitorovány v rámci platné legislativy vydané SUJB. Ostatní



nebezpečné látky by měly být kontrolovány v souvislosti s ustanovením normy [28], článek 5.4.2 Uvolňování nebezpečných látek a radioaktivní záření, ve kterém je výslovně uvedeno, cituji:

*Popílek nesmí obsahovat látky, které by po uvolnění z betonu byly nebezpečné pro zdraví, hygienu a životní prostředí (viz příloha A).*

V příloze A [27] je uvedeno, cituji:

*Materiály používané ve výrobcích nesmí uvolňovat žádné nebezpečné látky v nadměrném množství, které je větší než přípouští maximální dovolené hodnoty uvedené v příslušných Evropských normách pro tyto materiály nebo dovolené v národních předpisech členského státu určení.*

#### 1.4.2 LIMITY

V okamžiku smíchání cementu, vody a amoniakálního popílku dojde k reakci mezi amonnými solemi a tvořícím se  $\text{CaOH}_2$  za současného vývinu amoniaku uvolňujícího se do okolí.

V ČR nacházíme limity obsahu  $\text{NH}_3$  v ovzduší v národním předpisu Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. [29]. Koncentrace amoniaku, kterou smí být zdravý člověk při práci vystaven při vdechování je v tomto předpisu stanovena jako:

- Přípustný expoziční limit (expoze max. 8 hodin = pracovní směna) je  $14 \text{ mg.m}^{-3}$  (20 ppm).
- Nejvyšší přípustná koncentrace (expoze max. 15 minut) je  $36 \text{ mg.m}^{-3}$  (50 ppm).

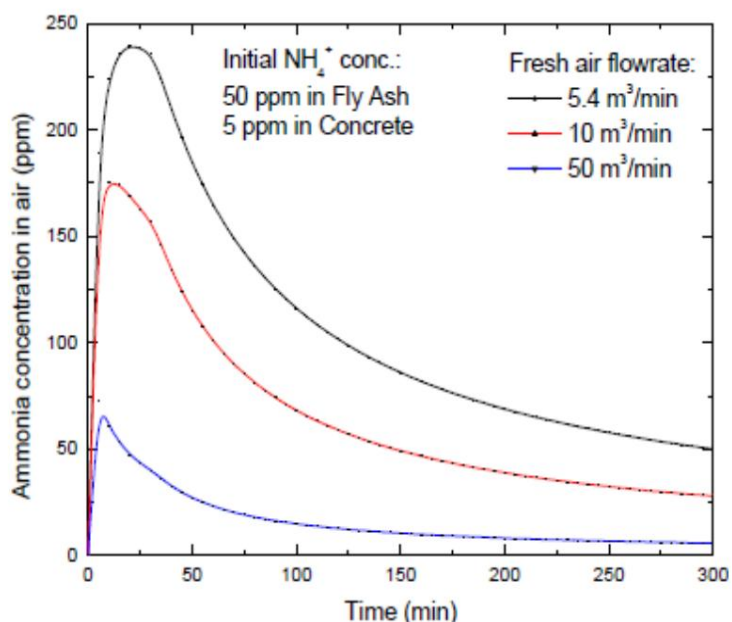
Navíc k uvolňování amoniaku nedochází jen ve fázi výroby, dopravy a ukládání betonu. Jak je uvedeno v [30] cituji:

*Z betonu s použitím amoniakálního popílku se uvolní 15 % amoniaku do 40 minut po míchání. Během měsíce po uložení betonu množství uvolněného amoniaku klesá, ale více než 50 % amoniaku je stále v betonu navázáno. V dalším časovém období vývoj amoniaku silně klesá v důsledku vytváření silného difúzního odporu v zatvrdlém betonu.*

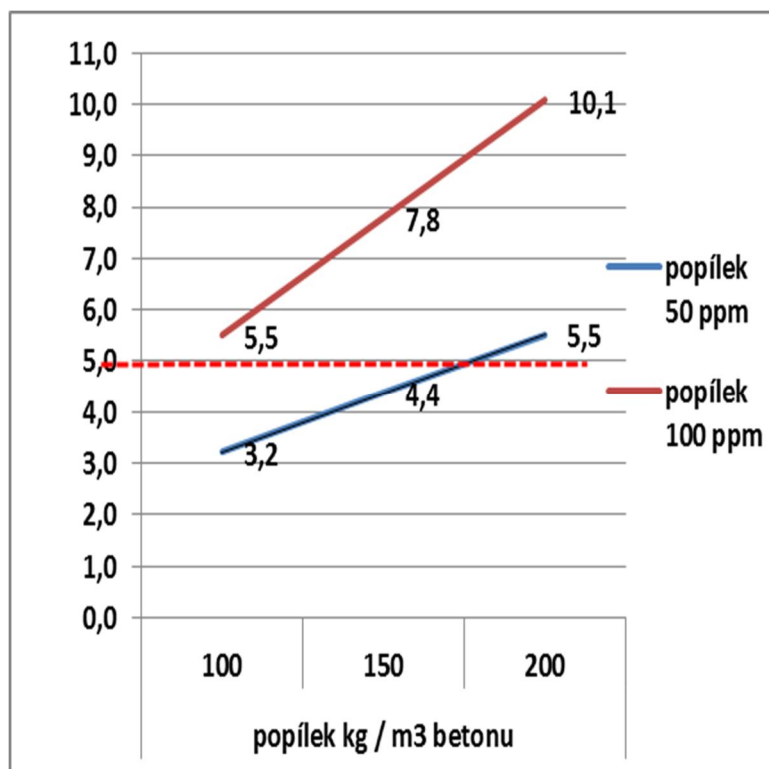
Jak je naznačeno v citovaném dokumentu, není zcela vyloučeno, že může dojít k emisi čpavku i ze ztvrdlého betonu, byť je tato možnost omezena vzrůstajícím difúzním odporem tvrdnoucího betonu. Tato možnost vzrůstá u betonů nižších

pevnostních tříd s vyšší pórovitostí v souvislosti s vysokým vodním součinitelem použitého betonu. Autorovi je znám případ překročení limitů koncentrace amoniaku v obytném prostoru rodinného domu, způsobený obsahem močoviny v kamenivu nebo případ podlimitní, přesto měřitelné emise čpavku ve veřejné budově. Pro prostředí obytných prostor (byty, domy, veřejné budovy) je v ČR stanoven limit ve vyhlášce č. 6/2003 [26]. V tomto právním dokumentu je limit pro amoniak stanoven na  $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Pokud se týká subjektivních vjemů - nepříjemný zápach - není samozřejmě žádný limit stanoven. V [23] je uveden „čichový práh“ v rozmezí 1 - 50 ppm.

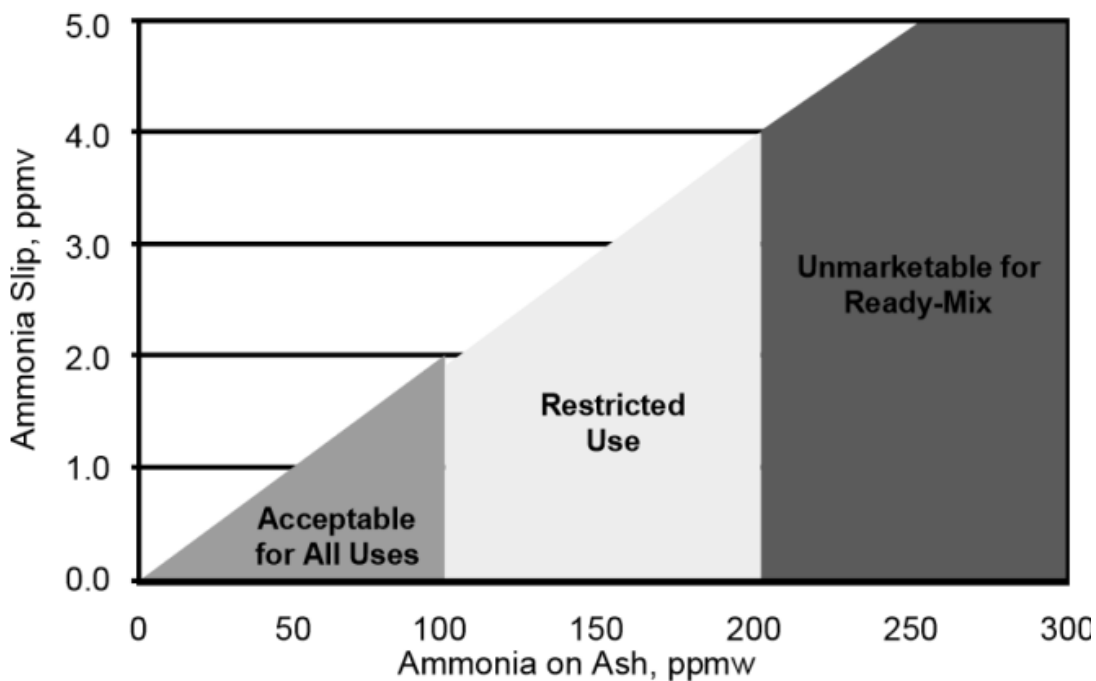
Z údajů zjištěných v zahraničí a uvedených v [23] je například zřejmé, že i při použití amoniakálního popílku obsahujícího koncentraci 50 ppm amoniakálních solí do betonu, který následně obsahuje koncentraci 5 ppm těchto solí, se může uvolnit takové množství amoniaku, jehož koncentrace i při intenzivní ventilaci může překročit NPK a při průměrné ventilaci překračuje PEL viz obrázek 13. Ke koncentraci 5 ppm amoniakálních solí v  $\text{m}^3$  betonu s průměrnou dávkou cementu 300 kg může dojít při dávce 200 kg popílku s obsahem 50 amoniaku ppm. Při použití popílku s obsahem 100 ppm amoniaku je hodnota 5 ppm v betonu překročena již při jeho dávce  $100 \text{ kg}/\text{m}^3$  jak je uvedeno na obrázku 14.



Obr. 13 Graf koncentrací amoniaku ve vzduchu po betonáži za použití popílku s obsahem amoniaku (ppm) při rychlosti ventilace  $5,4 \text{ m}^3/\text{min}$ ,  $10 \text{ m}^3/\text{min}$  a  $50 \text{ m}^3/\text{min}$  [22].



Obr. 14 Graf - modelový výpočet obsahu amoniaku v betonu při dávce cementu 300 kg a 100,150 a 200 kg popílku s 50 a 100 ppm amoniaku.



Obr. 15 Hranice obsahu amoniaku v popílku pro komerční použití [31].

V ČR nebyla dosud provedena relevantní rozsáhlá měření. Měření obsahu  $\text{NH}_3$  v popílku se postupně zavádí na jednotlivých energetických zdrojích a proběhla ojedinělá měření ve výrobnách betonu a na stavbách. Nastala tak situace, kdy v procesu redukce  $\text{NO}_x$  metodami SNCR resp. SCR dochází ke kontaminaci popílku do betonu amoniakem především ve formě amonných solí. Limity pro takovou kontaminaci neexistují. Při použití amoniakálního popílku pro výrobu betonu se vyvíjí toxický amoniak v nekontrolovatelném množství v závislosti na obsahu solí v popílku a na dávce popílku v betonu. Výrobce betonu je tak postaven do role přihlížejícího diváka a je jen na souhře okolností (náhodě) zda se na betonárně, při dopravě a ukládání betonu či v období hydratace někde vyskytnou nadlimitní koncentrace toxické látky, znamenající vážné ohrožení zdraví.

**Pro odběratele popílku vychází v zásadě z cílů tohoto projektu následující logické kroky k umožnění bezpečné a ekonomické výroby z popílků s redukcí  $\text{NO}_x$ :**

- Monitoring pro stanovení skutečných hodnot amonných iontů v popílcích na vstupu – nalezení metodiky provádění.
- Identifikování extrémních hodnot s aplikací na provozování technologie SNCR spojené s pracovní kázní – měřicí přístroj přímo v mísícím jádru betonárny.
- Minimalizovat expedování popílků nad hodnoty 100 ppm  $\text{NH}_4^+$  ke koncovým odběratelům a provádění analýz při nakládkách materiálu – mobilní mísicí přístroj.
- Metodika výpočtových modelů pro technology betonáren s ohledem na zajištění bezpečného pracovního prostředí zpřesnit na základě souborů měření.
- Experimentální plnohodnotné testy spojené s průkazními zkouškami nezávadnosti koncových výrobků – proměnlivé receptury betonu dle aktuální „kontaminace“ popílku.
- Vývoj vhodných přísad/y pro tento typ betonu, pravděpodobně na bázi PCE.

## D EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 2 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ POPÍLKŮ

#### 2.1 VÝBĚR POPÍLKŮ

- Hnědouhelný popílek z elektrárny Ledvice – popílek Ledvice (ozn. L).
- Hnědouhelný popílek z elektrárny Chvaletice – popílek Chvaletice (ozn. C).
- Hnědouhelný popílek z elektrárny Mělník – popílek Mělník (ozn. M).
- Hnědouhelný popílek z elektrárny Opatovice – popílek Opatovice (ozn. O).
- Černouhelný popílek z elektrárny Dětmarovice – popílek Dětmarovice (ozn. D).

Tyto popílků patří mezi nejčastěji používané popílků do betonu v ČR. Jako referenční popílek byl vybrán popílek Dura-Pozz Lethabo, Jihoafrická republika.

- Černouhelný popílek Dura-Pozz z elektrárny Lethabo, Jihoafrická republika (ozn. J).

Tento popílek se vyznačuje rovnoměrnou kvalitou, deklarovanou vysokou jemností a řadí se mezi vysoce kvalitní popílků v Jihoafrické republice. Zcela běžně se používá do betonů jako náhrada cementu v množství často přesahujících 30 % hm [32]. Srovnání českých popílků s tímto referenčním popílkem bylo provedeno z důvodu posouzení kvality českých popílků ve světovém měřítku. Snahou není hledat řešení HVFAC s popílkem z Jihoafrické republiky, ale poznat v jakých charakteristikách složení mají české popílků rezervy.

Celkem bylo podrobně analyzováno šest různých popílků a dva vybrané cementy CEM II/A-LL 42,5 R Hranice (ozn. HRA) a CEM I 42,5 R Radotín (ozn. RAD). Na základě výsledků, které byly při analýzách získány, byl vybrán „nejlepší český popílek“ jako popílek vhodný pro využití v betonech s vysokou náhradou cementu popílkem (nad 30 % hm.).

**Provedeny byly tyto analýzy a zkoušky popílků a cementů:****1) Vyhodnocení chemického složení popílků**

- Klasická chemická analýza provedená v laboratoři Gematest.
- XRF – rentgenfluorescenční spektrometr Spectroscan MAKC-GVII.

**2) Vyhodnocení zrnitosti popílků**

- Vyhodnocení nadsítného na síť 0,045 mm a 0,063 mm proséváním za sucha.
- Granulometrický rozbor na laserovém granulometru.
- Měrný povrch podle Blaine.

**3) Stanovení vodonáročnosti**

- Podle EN 450-1, příloha B (požadavek na množství vody).

**4) Stanovení reaktivity popílků (index účinnosti)**

- Podle ČSN 722071 (EN 196-1).

**5) Vyhodnocení technologického chování popílků**

- Nenormové postupy.

**2.2 VYHODNOCENÍ CHEMICKÉHO SLOŽENÍ POPÍLKŮ**

Výsledky z klasické chemické analýzy jsou uvedeny v tabulce 4. Hodnoty z klasické chemické analýzy se liší od hodnot získaných z XRF analýzy v případě minoritních sloučenin minimálně, v případě majoritních sloučenin existují rozdíly v rozmezí 1 až 3 %, jedná se však o rozdíly stejného charakteru, tj. obsah CaO a SiO<sub>2</sub> je vždy vyšší, obsah Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> vždy nižší a obsah Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> je srovnatelný nebo nižší u klasické chemické analýzy než u XRF-analýzy. V tabulce 4 jsou shrnuty výsledky klasické chemické analýzy.

Tabulka 4 Chemické složení popílků a cementu CEM II/A-LL 42,5 R Hranice a CEM I 42,5 R Radotín a jejich objemová hmotnost a index pucolánového potenciálu.

Složení v %	popílek						cement	
	L	M	C	O	D	J	HRA	RAD
Ztráta žháním	0,59	0,84	1,11	0,68	1,78	1,84	5,52	3,24
CaO	4,21	2,50	4,77	2,00	5,61	3,2	61,3	63,4
SiO <sub>2</sub>	52,8	55,1	50,3	57,7	55,0	54,4	18,2	19,61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,9	31,5	25,8	29,5	24,7	33,1	6,15	4,68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,72	4,76	13,17	4,26	5,63	4,10	3,09	2,67
K <sub>2</sub> O	1,19	1,65	1,21	2,09	2,76	0,70	1,04	0,76
Na <sub>2</sub> O <sub>ekv.</sub>	0,32	0,29	0,46	0,31	0,65	0,29	0,13	0,14
CaO <sub>vol.</sub>	0,11	< 0,1	0,11	< 0,1	0,10	0,17	-	-
SO <sub>3</sub>	0,4	0,2	0,6	0,2	0,2	0,15	2,63	2,35
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	89,42	91,36	89,27	91,46	85,33	89,17	27,40	26,96
PPI	0,37	0,52	0,47	0,71	1,12	0,21	--	--
OH (kg/m <sup>3</sup> )	1930	1850	1930	2015	2300	2380	3090	3080
Vlhkost (%)	0,26	0,28	0,32	0,23	0,27	0,24	--	--

České popílký patří podle klasifikace uvedené v [1] mezi nízkovápenaté popílký (kategorie F podle ASTM 6618). Jak ukazují data v tabulce 4, mez popílký nejsou extrémní rozdíly v obsahu stanovených oxidů. Jedinou výjimku představuje popílek Chvaletice, který se vyznačuje vysokým obsahem Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Všechny popílký mají velmi nízkou ztrátu žháním. Ztráta žháním zachycuje podíl organického uhlíku. Čím je obsah organického uhlíku vyšší, tím větší má popílek potřebu vody a tím hůře se beton vyrobený s tímto popílkem provzdušňuje. Proto je požadováno, aby velikost ztráty žháním (LOI) u kvalitních popílků byla co nejnižší.

V práci [42] byl pro hodnocení obsahu pucolánových fází odvozen tzv. index pucolánového potenciálu (PPI = Pozzolanic Potential Index). Tento index hodnotí schopnost popílků účastnit se pucolánové reakce vedoucí k nárůstu dlouhodobých pevností. Při odvození PPI se vycházelo z toho, že v jílových nečistotách obsažených

ve spalovaném uhlí jsou různé podíly illitu a kaolinitu. Zatímco se při spalování uhlí vytváří z kaolinitu mullit, z illitu převážně vzniká díky obsahu  $K_2O$ , jenž působí jako tavidlo, skelná fáze (pucolán). Molární poměr mezi  $K_2O$  a  $Al_2O_3$  odráží relativní poměr mezi illitem a kaolinitem a je přímo úměrný obsahu skelné fáze v popílku. Vypočte se ze vztahu:

$$\text{Index PPI} = 10 \cdot \text{obsah } K_2O / \text{obsah } Al_2O_3 = 10 \cdot K/A \quad (1)$$

Autoři práce [32] rozeznávají na základě velikosti PPI tři třídy popílků:

Tabulka 5 Třídy popílku dle velikosti PPI

<b>Třída 1</b> Popílky s vysokým PPI ( $K/A \cdot 10 > 1.0$ )
<b>Třída 2</b> Popílky se středním PPI ( $0,5 < (K/A) \cdot 10 < 1.0$ )
<b>Třída 3</b> Popílky s nízkým PPI ( $K/A \cdot 10 < 0.5$ )

Index PPI je uveden v tabulce 4. Nejvyšší hodnotu PPI má popílek Dětmárovice (třída 1), nejnižší pak popílek Dura-Pozz (třída 3), z českých popílků má nejhorší PPI popílek Ledvice.

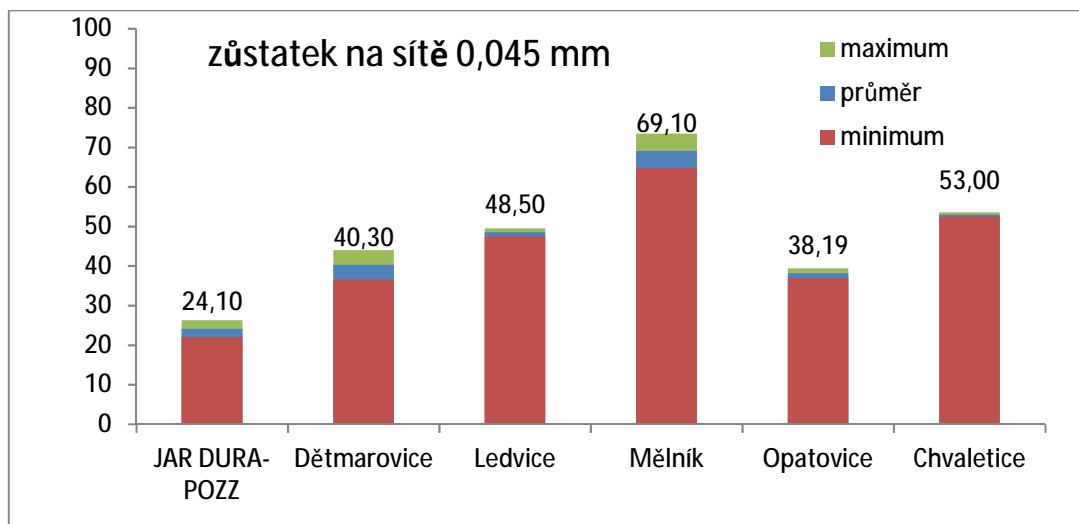
## 2.3 VYHODNOCENÍ ZRNITOSTI POPÍLKŮ

Zrnitost popílků, hodnocená jako zůstatek na síť 0,045 mm, se zkouší podle normy EN 451-2 proséváním za mokra. Podle zůstatku na síť 0,045 mm jsou v normě EN 450-1 klasifikovány dvě kategorie popílků:

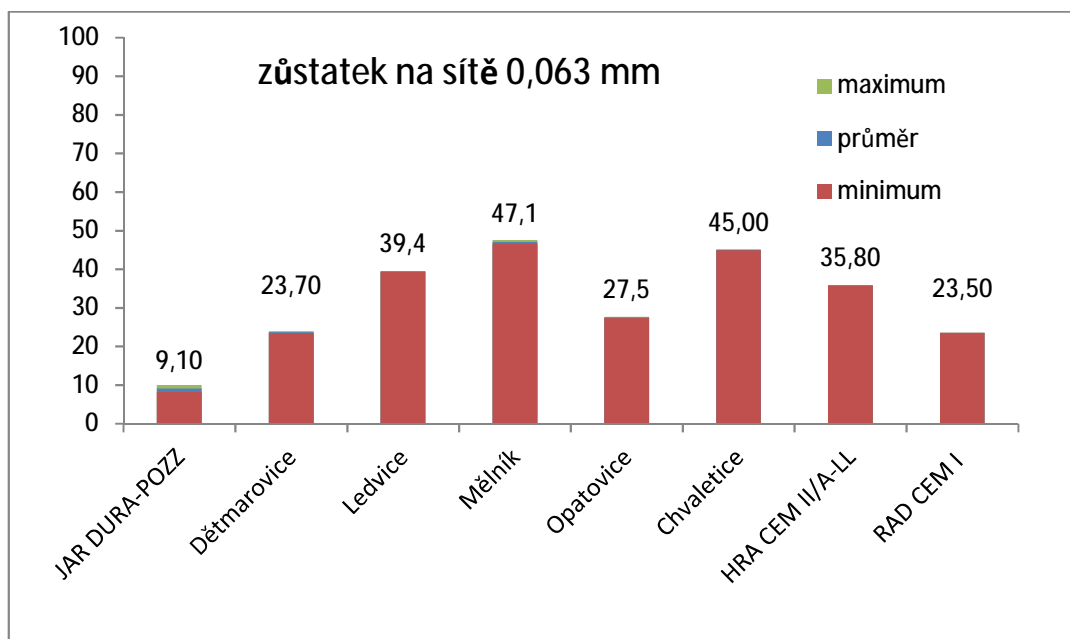
- Kategorie N – maximální zůstatek na síť 40 %
- Kategorie S – maximální zůstatek na síť 12 %

Výsledky uvedené na obrázku 16 byly získány odlišným postupem, než který je uveden v normě EN 451-2. Prosévání bylo provedeno za sucha, doba prosévání činila 60 minut, zkušební síto bylo opatřeno víkem proti úniku jemných částic. U každého popílku byla provedena dvě stanovení, vyhodnocena průměrná hodnota a chyba měření. Byl stanoven zůstatek jak na síť 0,045 mm, tak i na síť 0,063 mm.





Obr. 16 Stanovení jemnosti popílků – zůstatek na síť 0,045 mm – prosévání za sucha.



Obr. 17 Stanovení jemnosti popílků - zůstatek na síť 0,063 mm - za sucha. Doplněna jemnost cementu CEM II/A-LL 42,5 R Hranice a CEM I 42,5 R Radotín.

Ačkoliv se zvolený zkušební postup lišil od normového postupu, lze tvrdit, že všechny české popílky vyhovují pouze kategorii N a popílek Dura-Pozz je výrazně jemnější než české popílky. V tabulce 6 jsou uvedeny výsledky stanovení měrného povrchu popílků podle Blaine (ČSN EN 196-6). Hodnoty měrného povrchu cementů jsou převzaty ze statistiky kvality, kterou uveřejňují výrobci cementu na svých internetových stránkách.

V tabulce 7 jsou vybrány dílčí četnosti zastoupení jednotlivých částic popílku resp. cementu, které byly získány měřením v laserovém granulometru a je zde vyhodnocena střední velikost částic (D50). Grafické vyhodnocení zrnitosti je uvedeno na obrázcích 18 a 19. Granulometrické rozbory z laserového granulometru ukazují, že jihoafrický popílek má zrnitost podobnou testovaným cementům. České popílky jsou výrazně hrubší a o jak velký rozdíl se jedná, je dobře patrné ze střední velikosti částic D50.

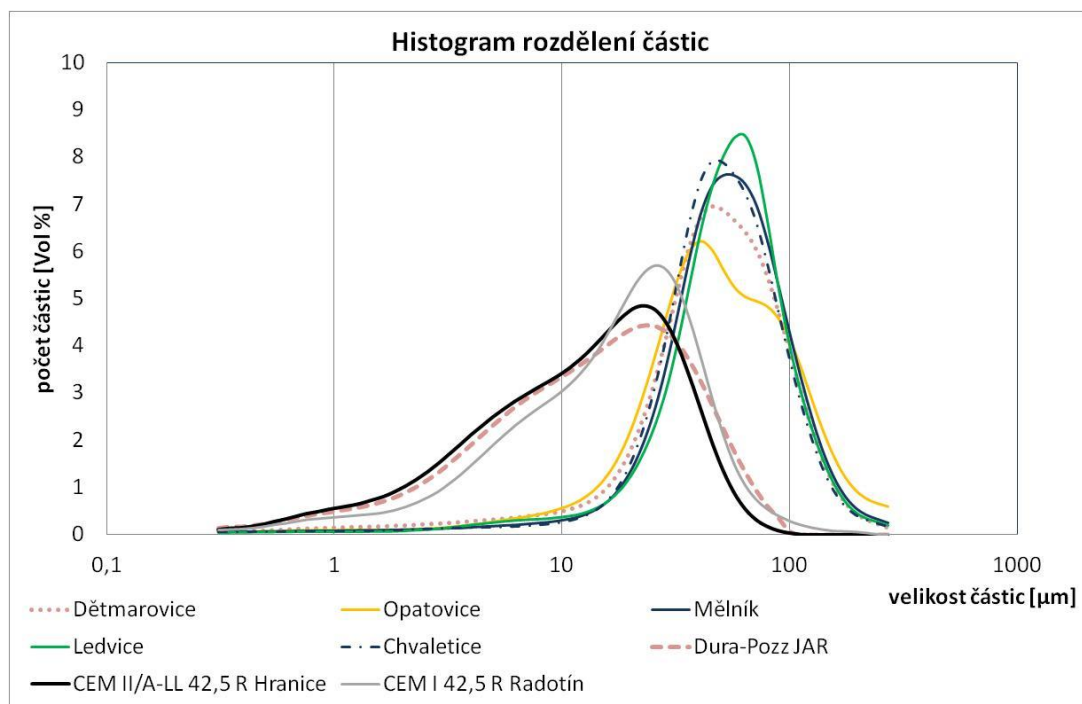
Tabulka 6 Měrný povrch popílků a cementu v m<sup>2</sup>/kg. Měrný povrch popílků je průměr ze 4 dílčích stanovení.

popílek						cement	
L	M	O	C	D	J	HRA	RAD
230	191	225	213	285	367	420	333

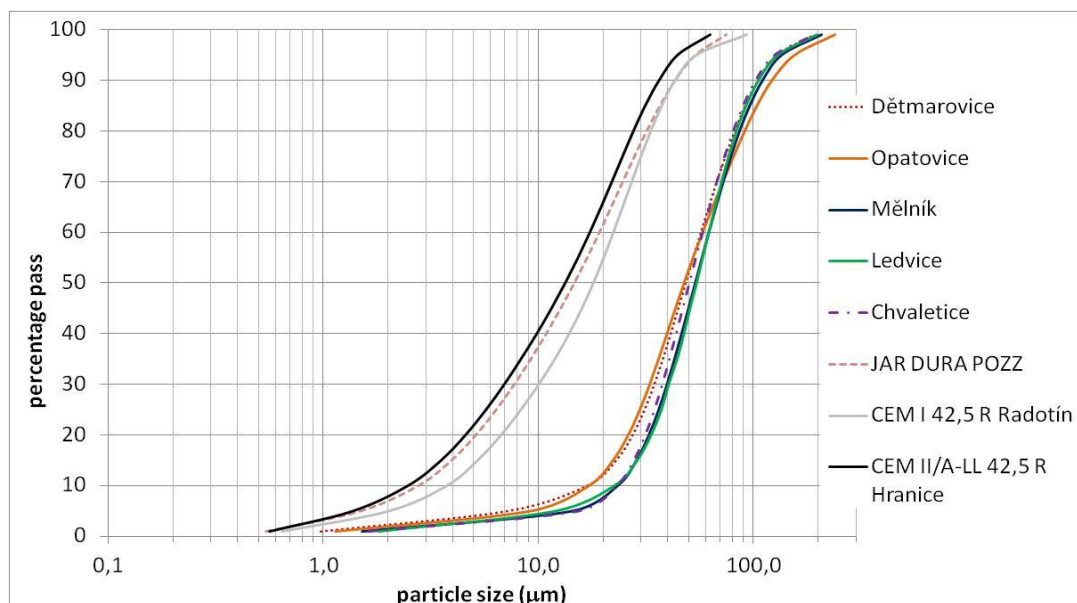
Ze zhodnocení všech provedených granulometrických analýz plyne, že mezi českými popílky nejsou výrazné rozdíly. Přesto lze mezi českými popílky rozlišit dvě skupiny zrnitosti. Nejméně jemný je popílek Mělník a společně s popílkem Chvaletice tvoří skupinu popílků s nízkou jemností. Popílek Dětmárovice a Opatovice patří mezi nejjemnější české popílky. Mezi oběma skupinami se nachází popílek Ledvice se střední jemností. Popílek Opatovice se vyznačuje tím, že má velké zastoupení jak malých částic (pod 20 mikronů), tak i velkých částic (nad 100 mikronů), což je dobře patrné i z tvaru histogramu na obr. 18. Z tohoto důvodu má obdobný měrný povrch jako popílek Ledvice, ačkoliv z výsledků zůstatků na síti je zrnitostně podobný popílku Dětmárovice. **Na základě těchto výsledků hodnotíme popílek Dětmárovice jako nejjemnější český popílek.**

Tabulka 7 Velikost částic v mikronech, které jsou zastoupeny s četností 10, 50 (střední velikost částic) a 90 % objemu. Červeně vyznačená pole značí největší velikost částice a modře vyznačené značí nejmenší velikost částice pro danou četnost.

	Popílek						cement	
četnost	L	M	O	C	D	J	HRA	RAD
%	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$
D10	22,495	23,26	17,205	23,08	16,8	2,76	2,46	3,74
D50 (medián)	54,505	53,505	47,74	50,22	48,37	14,73	13,27	18,04
D90	105,935	109,995	122,615	102,205	104,79	43,42	36,3	43,39



Obr. 18 Histogram rozdělení velikosti částic testovaných popílků a cementu.



Obr. 19 Souhrnná křivka zrnitosti popílků a cementu z laserového granulometru.

## 2.4 VYHODNOCENÍ VODONÁROČNOSTI POPÍLKŮ

Požadavek na množství vody (vodonáročnost, potřeba vody) je jednou z klíčových charakteristik, které rozhodují o vhodnosti použití popílku do HVFAC. Pokud popílek má vodonáročnost vyšší než použitý cement, bude pro zajištění neměnné konzistence betonu nezbytné přidat vodu nebo zvýšit dávku superplastifikační přísady. Vzhledem k tomu, že pro dosažení srovnatelných pevností HVFAC v porovnání s betonem bez obsahu popílku nebo s popílkem v malém objemovém zastoupení, je nezbytné výrazným způsobem snížit velikost vodního součinitele, je třeba volit popílek s vodonáročností nižší nebo alespoň srovnatelnou než má použitý cement.

Vodonáročnost popílků je možné posuzovat řadou normových i nenormových zkušebních postupů. V ČSN EN 450-1 v příloze B je popsán zkušební postup pro stanovení požadavku na množství vody v popílkem. Princip metody spočívá ve stanovení množství vody, které je třeba přidat do malty s 30% hmotnostní náhradou cementu zkoušeným popílkem, aby byla dosažena stejná konzistence, jakou má čistě cementová malta s vodním součinitelem o velikosti 0,5. Výsledky zkoušky vodonáročnosti popílků jsou uvedeny v tabulce 8 a byly získány výpočtem podle vztahu:

Vodonáročnost popílku (%) =  $100 \cdot (M/225)$ , kde M je hmotnost vody použité ve zkušební cementopopílkové maltě. Hodnoty menší jak 100 % znamenají, že popílek má nižší vodonáročnost než použitý cement.

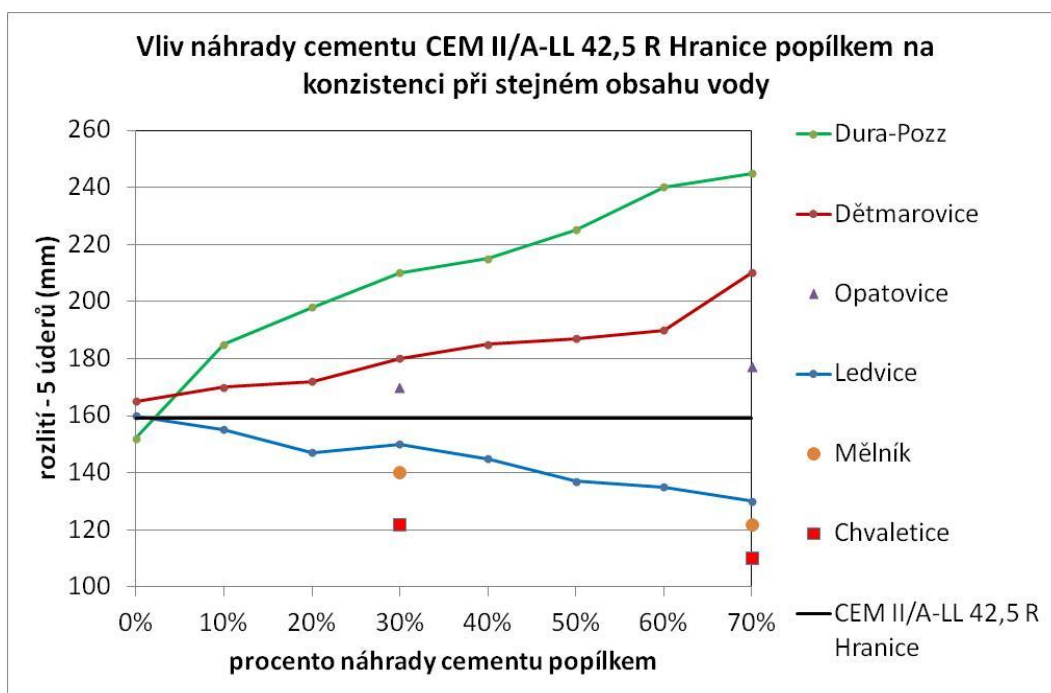
Tabulka 8 Stanovení vodonáročnosti popílků podle EN 450-1 příloha B.

	<b>CEM II/A-LL 42,5 R Hranice</b>	<b>CEM I 42,5 R Radotín</b>
<b>Dětmarovice</b>	95,6	93,3
<b>Opatovice</b>	102,2	102,2
<b>Ledvice</b>	106,7	102,2
<b>Chvaletice</b>	108,9	106,7
<b>Mělník</b>	106,7	102,2
<b>JAR Dura-Pozz</b>	93,3	93,3
<b>cement</b>	100	100

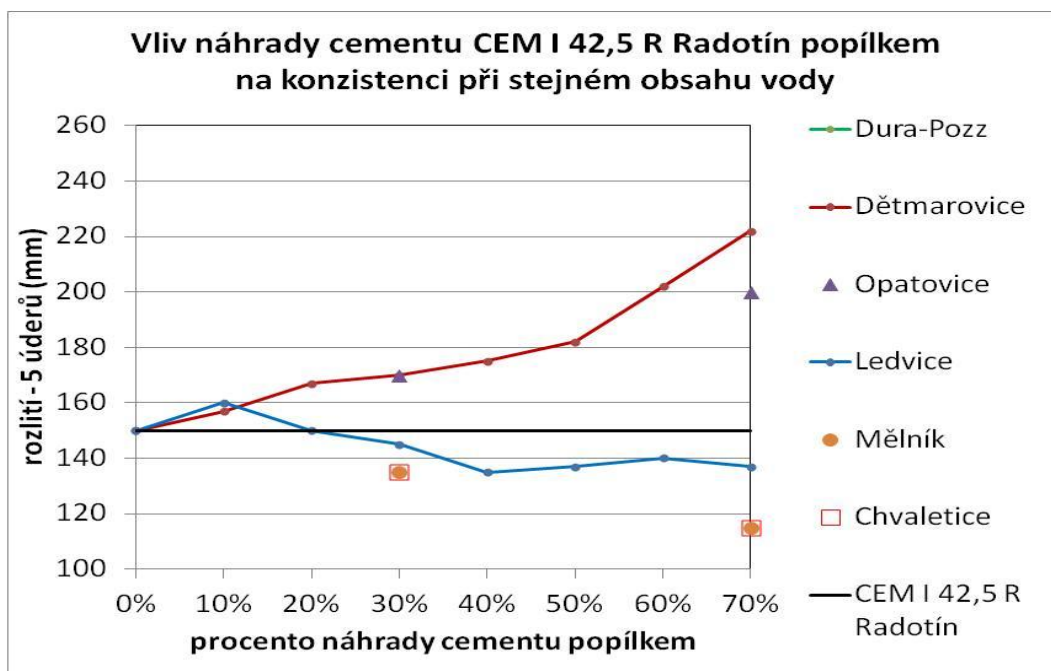
Popílek Dětmarovice má jako jediný z českých popílků nižší vodonáročnost než oba vybrané cementy. Nejvyšší potřebu vody vykazuje popílek Chvaletice. V další sérii zkoušek byl hodnocen vliv náhrady cementu zkoušeným popílkem v množství 0 až 70 % na konzistenci malty při neměnném obsahu vody. Stanovení konzistence čerstvé malty bylo provedeno s použitím setřásacího stolku dle ČSN EN 1015-3 s tím rozdílem, že místo normových 15 - ti poklepů byla směs střešána pouze 5 - ti poklepy. Cílem těchto zkoušek bylo posoudit tzv. „výplňový efekt“ (filling effect) částic popílku a cementu a také posoudit vliv popílku na konzistenci malty při vyšších náhradách cementu než 30 % hm., které jsou předepsány v ČSN EN 450-1. Výsledky jsou graficky zpracovány na obr. 20 a 21.

Dětmarovice a Opatovice přispívají ke zvýšení konzistence (rozlití) cementopopílkové malty. Naopak náhrada cementu popílkem Ledvice, Chvaletice a Mělník vede ke zhoršení zpracovatelnosti malty. Tyto závěry platí pro oba testované cementy. Jihoafrický popílek Dura-Pozz výrazným způsobem zlepšuje zpracovatelnost malty, např. při 50% hm. náhradě cementu tímto popílkem se velikost

rozliti zlepši o 48 %, zatímco s nejlepším českým popílkem Dětmárovice je hodnota rozliti vyšší pouze o 13 % v porovnání s maltou bez popílku.



Obr. 20 Vliv náhrady cementu CEM II/A-LL 42,5 R Hranice testovanými popílkem v množství 0 – 70 % na počáteční konzistenci cementopopílkové malty při stejném obsahu vody.



Obr. 21 Vliv náhrady cementu CEM I 42,5 R Radotín testovanými popílkem v množství 0 – 70 % na počáteční konzistenci cementopopílkové malty při stejném obsahu vody.

## 2.5 VYHODNOCENÍ REAKTIVITY POPÍLKŮ

Reaktivita popílků se nejběžněji hodnotí na základě porovnání poměru pevnosti v tlaku zkušebních trámečků vyrobených z cementopopílkové malty a trámečků připravených z cementové malty bez popílku, zkoušených ve stejném stáří. Norma ČSN 722071 Popílek pro stavební účely, která však není přímo určená pro popílek do betonu, uvádí zkušební postup pro stanovení indexu účinnosti. Index účinnosti se stanovuje na maltách vyrobených podle EN 196-1, přičemž v případě zkušební cementopopílkové malty je pojivo složeno ze 75 % cementu a 25 % popílku. Index účinnosti se hodnotí po 28 dnech, resp. 90 dnech a měl by být min. 75% resp. 85 %. V tabulce 9 je uveden index účinnosti po 28 dnech námi zkoušených popílků v kombinaci s cementem CEM II/A-LL 42,5 R Hranice. Z hlediska velikosti indexu účinnosti je nejlepším českým popílkem popílek Dětmárovice, výrazně však zaostává za popílkem Dura-Pozz.

Tabulka 9 Index účinnosti popílků po 28 dnech v kombinaci s CEM II/A-LL 42,5 R Hranice. Pro zajímavost uveden i index účinnosti vypočtený z pevnosti v tahu za ohybu. Poznámka: místo normového písku byl při zkoušce použit 0-4 Kaznějov.

Popílek	Index účinnosti po 28 dnech	
	Pevnost v tlaku	Pevnost v tahu za ohybu
<b>Ledvice</b>	<b>61,9</b>	72,1
<b>Mělník</b>	<b>61,9</b>	55,8
<b>Opatovice</b>	<b>67,6</b>	71,2
<b>Chvaletice</b>	<b>61,0</b>	71,2
<b>Dětmárovice</b>	<b>76,2</b>	74,0
<b>Dura-Pozz</b>	<b>88,7</b>	106,7
<b>CEM II/A-LL 42,5 R Hranice</b>	<b>100,0</b>	100,0

## 2.6. VYHODNOCENÍ TECHNOLOGICKÉHO CHOVÁNÍ POPÍLKŮ

Ve složení cementopopílkových malt, které slouží ke zhodnocení reaktivity popílků, lze zohlednit různé požadavky plynoucí ze zamýšleného složení betonu. Jednak lze volit různé velké náhrady cementu popílkem, jednak lze cementopopílkové malty vyrábět se stejným obsahem vody (ale mění se konzistencí) nebo se stejnou výchozí konzistencí (ale různým obsahem vody) než má referenční čistě cementová malta. Zásadním faktorem ovlivňujícím pevnosti je obsah vody v maltě. Pokud jsou zhotovovány trámečky se stejným obsahem záměsové vody ve zkušební maltě, je v případě použití popílků s vyšší hodnotou vodonáročnosti než má cement do malty přidávána voda, která zde působí neefektivně, neboť zvyšuje obálku vody kolem částic cementu a popílku, a tím snižuje pevnosti. Tento pohled v podstatě nereflektuje pozitivní přínos popílků s nízkou hodnotou vodonáročnosti na vlastnosti cementových malt resp. betonu.

Při testování popílků v maltách se stejnou počáteční konzistencí jakou má referenční malta bez popílku, se naopak mění množství záměsové vody. V případě popílků s vyšší vodonáročností budou výsledky pevností díky výraznému zvýšení velikosti vodního součinitele nižší, než jaké jsou zjišťovány tradičními normovými postupy, které se provádí při stejném vodním součiniteli. Jelikož je také vždy třeba nalézt správné množství záměsové vody na dosažení požadované výchozí konzistence, je tento postup časově i materiálově náročnější. Dle mého názoru však lépe vystihuje chování popílků v betonech, zejména v případě vyšší náhrady cementu.

Zhodnocení vlivu vodonáročnosti popílků na pevnost cementopopílkové malty (zejména při vysokém procentu náhrady cementu popílkem) z pohledu provádění zkoušek při stejném obsahu vody resp. stejné hodnotě počátečního rozlité je shrnuto v tabulce 10. K tabulce 10 je nezbytné dodat, že s rostoucím množstvím nahrazeného cementu popílkem vždy dochází k poklesu pevností malty a tento pokles je způsoben dvěma faktory. Hlavním, zcela zásadním faktorem je tvorba C-S-H fází, která je v důsledku nahrazení reaktivního cementu velmi pomalu reagujícím popílkem snížena. Vedlejším faktorem je vzdálenost mezi jednotlivými částicemi cementu a popílku a jejich schopnost do sebe zapadat, neboť vznikající C-S-H fáze musí zrna vzájemně spojit. Čím je vzdálenost mezi částicemi větší, tím déle trvá, než jsou částice tvořícími se C-S-H fázemi pospojovány (tj. mezičásticové prostory „prorosteny“ C-S-



H fázi). A právě vodní obálka kolem částic, která úzce souvisí s vlastností hodnocenou jako vodonáročnost, spolurozhoduje o této vzájemné vzdálenosti.

Tabulka 10 Zhodnocení vlivu vodonáročnosti popílku na pevnost malty při různém způsobu výroby zkušebních těles.

<b>Efekt vodonáročnosti popílku na vývoj pevností malty při náhradě cementu popílkem</b>		
Vodonáročnost popílku	Způsob provádění zkoušky – výroby zkušebních těles	
	stejně počáteční rozlití	stejně množství vody
Nižší jak cement (např. J, D) <i>(vyšší velikost rozlití při stejném obsahu vody nebo nižší množství vody na stejné rozlití)</i>	ZVÝŠENÍ pevnosti (uplatňuje se pozitivní efekt na pevnost v důsledku snížení množství záměsové vody)	SNÍŽENÍ PEVNOSTI (negativně působí nadbytečná voda zvyšující vzdálenost mezi částicemi)
Vyšší jak cement (např. L, M) <i>(nižší velikost rozlití při stejném obsahu vody nebo vyšší množství vody na stejné rozlití)</i>	SNÍŽENÍ pevnosti (je nezbytné zvýšit množství vody)	Při dodržení stejné intenzity hutnění dochází ke SNÍŽENÍ pevnosti v důsledku zvýšené pórovitosti vlivem horší zpracovatelnosti. Může také dojít ke ZVÝŠENÍ pevností v důsledku kratší vzdálenosti mezi částicemi díky tenčí vodní obálce okolo částic za podmínky dostatečného zhutnění (intenzivnější vibrace).

Vliv množství nahrazeného cementu různými popílkem na pevnost v tlaku po 28 dnech je graficky zpracován na obr. 22 až 26. Pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu po 28 dnech byly stanovovány na zkušebních trámečcích vyrobených za podmínky přidavku stejného množství záměsové vody i za podmínky dosažení stejné počáteční konzistence (za pomoci různé dávky záměsové vody). Zkoušky byly provedeny s cementem CEM II/A-LL 42,5 R Hranice. Z popílků byl přednostně zkoušen popílek Dětmárovice, jako nejjemnější z českých popílků a popílek Ledvice, jako představitel průměrného popílku v ČR. Na popílkem Dura-Pozz byly provedeny jen nejnütnější porovnávací zkoušky, neboť není zájmovým popílkem pro použití v ČR a byl přibrán do srovnání jen jako etalon možností popílků. Rozsah zkušebních záměsů se snížil

u zbývajících popílků Chvaletice, Mělník a Opatovice. Složení zkušební malty je uvedeno v tabulce 11.

Cílem těchto zkoušek bylo porovnat technologické vlastnosti popílků a vybrat z nich ten nejlepší pro budoucí zkoušky na betonech s náhradou cementu popílkem v množství nad 30 % hm.

Tabulka 11 Receptura referenční cementové malty a cementopopílkové malty s různým popílkem a s náhradou cementu popílkem 0 – 70 % hm. Zkoušeno při stejné konzistenci resp. při stejné dávce záměsové vody.

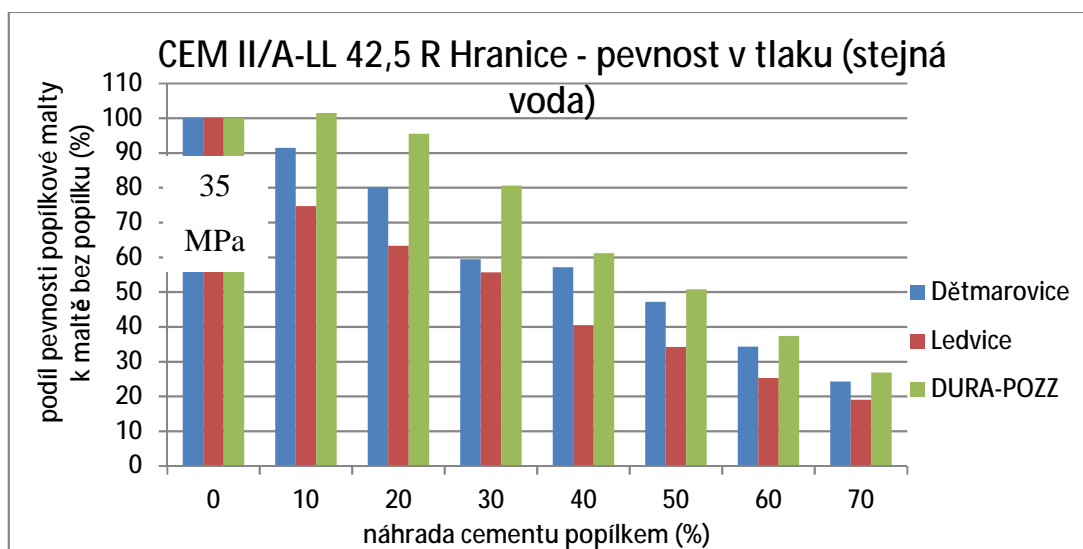
Složka	Stejná konzistence	Stejná voda
0-4 Kaznějov	1350 g	
Cement (HRA, RAD)	450 g (0 %) – 135 g (70% hm.)	
Popílek	Náhrada 0 – 70 % hm. cementu, max. 315 g	
Voda	proměnlivá	300 g
Počáteční rozlití	150 ± 10 mm	proměnlivé

V této sérii zkoušek bylo vždy měřeno počáteční rozlití a stanovena objemová hmotnost ztvrdlé malty, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku na zkušebních trámečcích 160\*40\*40 mm po 28 dnech (z každé záměsi byly vyrobeny 3 zkušební trámečky). Pro lepší vyjádření efektu náhrady cementu popílkem na pevnost jsou výsledky představeny nikoliv v absolutních hodnotách pevností v tlaku, nýbrž jako relativní podíl pevnosti popílkové malty z pevnosti malty referenční (bez popílku). Výsledky uvedené na obr. 22 až 26 jsou také k dispozici s cementem Radotín. Trendy v pevnosti v tlaku i v hodnotách rozlití jsou stejné, jaké byly naměřeny s cementem Hranice. S cementem CEM I 42,5 R Radotín však všechny popílků spolupůsobí lépe z hlediska vlivu na počáteční rozlití a kromě popílku Ledvice při náhradě nad 50 % a popílku Opatovice jsou se zbývajících popílků dosahovány v kombinaci s radotínským cementem vyšší relativní pevnosti v tlaku (vyjádřené jako % podíl k referenční maltě) než s cementem CEM II/A-LL 42,5 R Hranice.

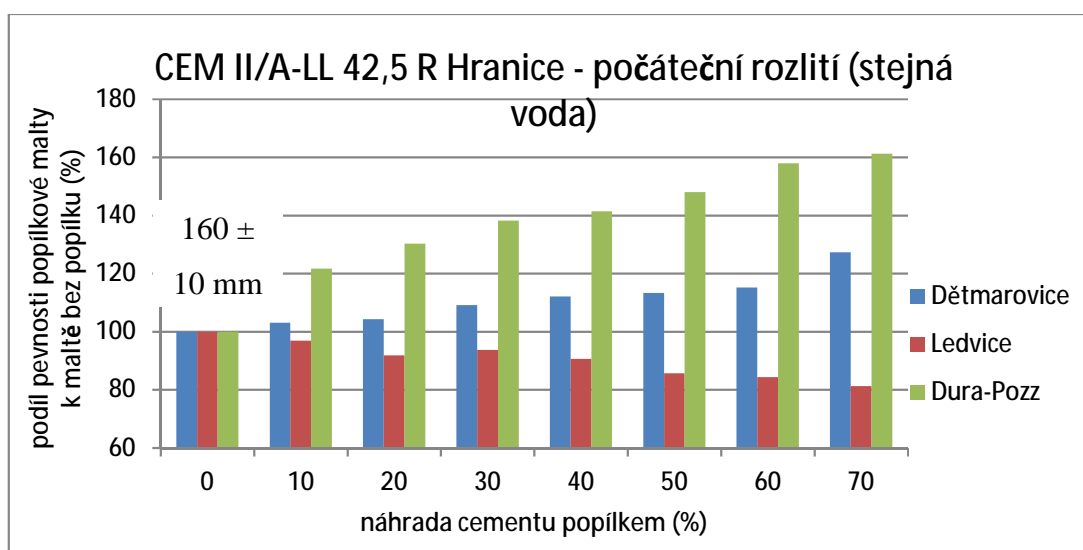
Z vyhodnocení vlivu popílků na pevnost v tlaku plyne, že nejlepších výsledků je dosahováno s popílkem Dura-POZZ, z českých popílků spolupůsobí nejlépe popílek Dětmárovice. Ten však ještě výrazným způsobem zaostává za popílkem Dura-Pozz, např. při 40% náhradě cementu, která v případě HVFAC není nijak extrémní,

umožňuje dosáhnout pouze 62 % pevnosti z pevnosti malty bez popílku, zatímco s popínkem Dura-Pozz jsou dosahovány hodnoty na úrovni 78 % pevnosti referenční malty (hodnoceno při stejné konzistenci, obr. 22).

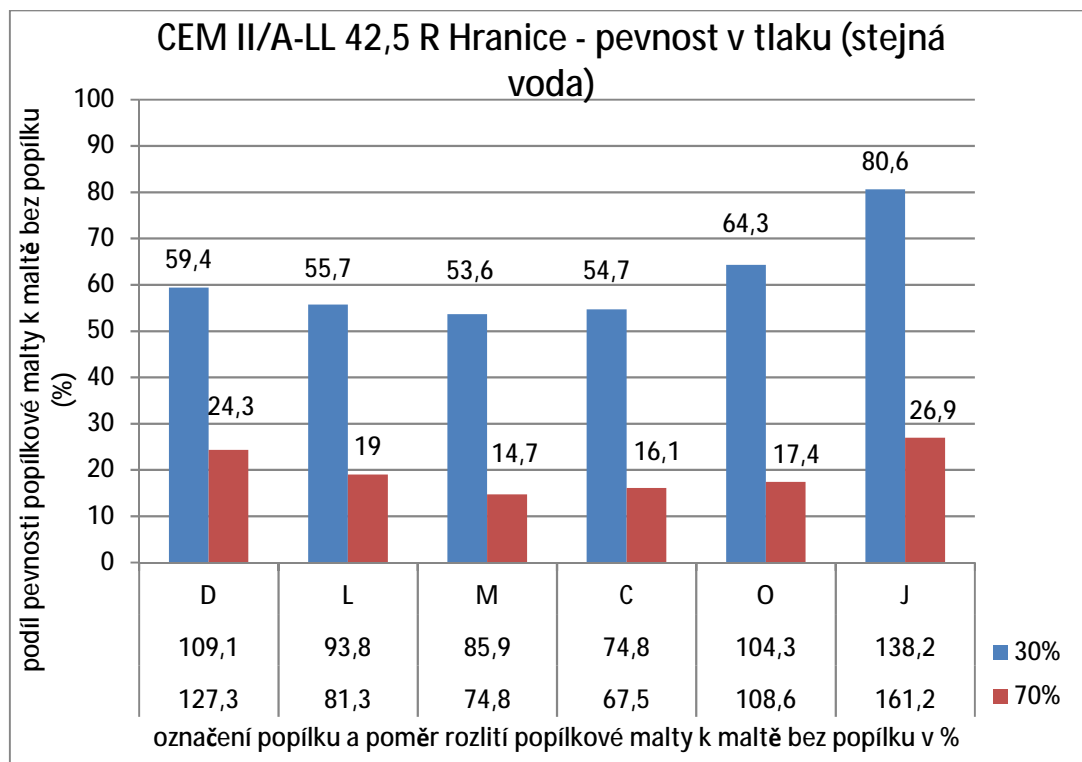
Pokud je vliv popílků na pevnost v tlaku hodnocen při stejném obsahu záměsové vody (obr. 16), jsou získány obdobné závěry jako při hodnocení za podmínky stejné konzistence. Rozdíly mezi popínky, zejména při vyšších dávkách, jsou však méně výrazné.



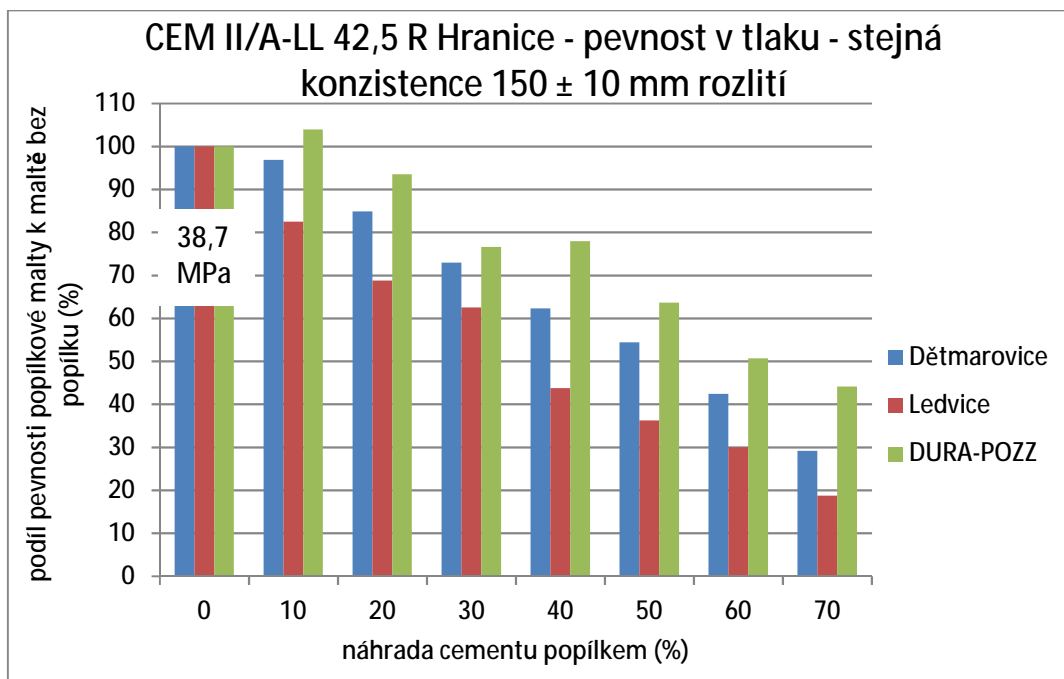
Obr. 22 Vliv náhrady cementu popínkem na relativní velikost pevnosti v tlaku po 28 dnech. Referenční malta je 100 %, absolutní hodnota pevnosti v tlaku této malty je 35 MPa.



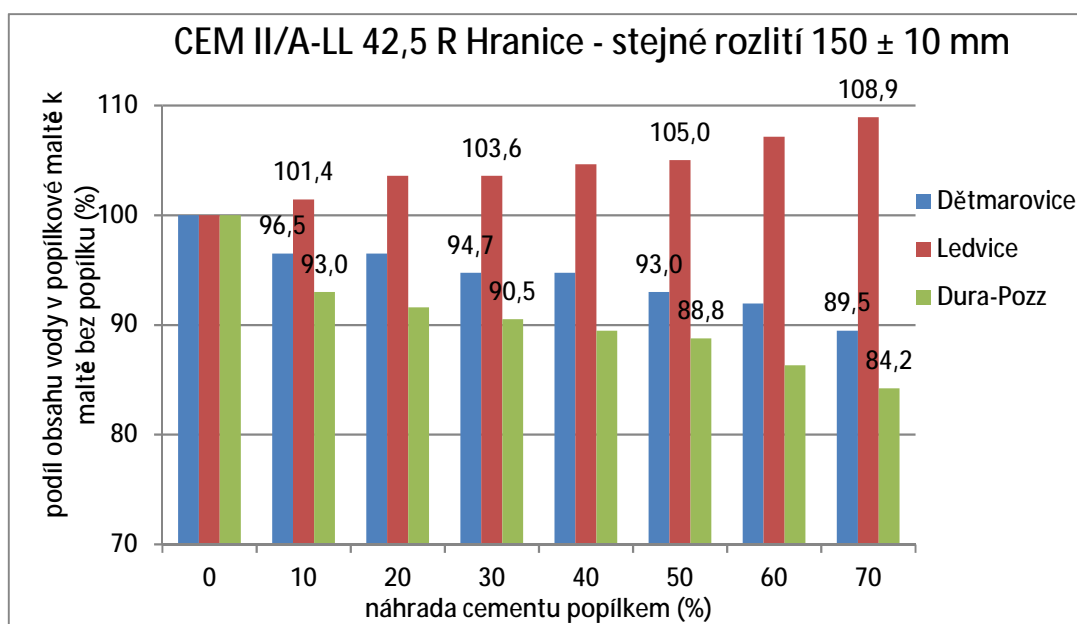
Obr. 23 Vliv náhrady cementu popínkem na relativní velikost počátečního rozlití. Referenční malta je 100 %, absolutní hodnota rozlití této malty je  $160 \pm 10$  mm.



Obr. 24 Vliv 30 % a 70 % hm. náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku po 28 dnech. Pod osou x uvedeny relativní poměry rozlití. Vztaženo k cementové maltě bez popílku, která představuje jak v případě pevnosti, tak v případě rozlití 100%. Např. Hodnota 59,4 % pevnosti v případě 30% náhrady cementu popílkem Dětmárovice znamená, že pevnost této cementopopílkové malty dosahuje 59,4 % pevnosti malty referenční a má o 9,1 % vyšší hodnotu rozlití.



Obr 25 Vliv náhrady cementu popílkem na relativní velikost pevnosti v tlaku po 28 dnech. Ref. malta je 100 %, průměrná absolutní hodnota pevnosti v tlaku této malty je 38,7 MPa.



Obr. 26 Vliv náhrady cementu popílkem na obsah vody nutné pro dosažení stejné výchozí konzistence. Hodnoty vyšší jak 100 % znamenají, že obsah vody byl vyšší než v referenční maltě bez popílku (100 %).

## 2.7 VYHODNOCENÍ NEJLEPŠÍHO ČESKÉHO POPÍLKU

V tabulce 12 je uveden přehled zjištěných vlastností popílků. Relativní srovnání popílků je na základě údajů z tabulky 12 vyhodnoceno v tabulce 13 a to tak, že popílků byly seřazeny na stupnici 1 až 6, přičemž nejlepší popílek v pořadí byl ohodnocen 6 body, nejhorší 1 bodem. Maximální součet bodů určuje nejlepší z testovaných popílků.

Tabulka 12 Přehled charakteristických vlastností jednotlivých popílků.

Popílek	Objem. hmot.	PPI	ZŽ	Blaine	Zůstatek 45 $\mu\text{m}$	D50	Index účinnosti	Vodonáročnost	Relativní pevnost, stejná voda, náhrada 70 %
	$\text{kg/m}^3$	-	%	$\text{m}^2/\text{kg}$	%	$\mu\text{m}$	%	%	%
<b>D</b>	2300	1,1	1,7	285	40,3	48,5	76,9	95,6	24,7
<b>L</b>	1930	0,4	0,6	230	48,5	54,5	61,9	106,7	19
<b>M</b>	1850	0,5	0,8	191	69,1	53,2	61,9	106,7	14,7
<b>O</b>	2015	0,7	0,7	225	38,1	47,7	67,6	102,2	17,4
<b>C</b>	1930	0,5	1,1	213	53,0	50,2	61,0	108,9	16,1
<b>J</b>	2380	0,2	1,8	367	24,1	14,7	88,7	93,3	26,9
<b>Dobry výsledek, když hodnota je</b>	max	max	min	max	min	min	max	min	max

Tabulka 13 Ohodnocení jednotlivých charakteristik popílků na základě pořadí od 1 do 6 (6 je nejlepší).

Popílek	Objem. hmot.	PPI	ZŽ	Blaine	Zůstatek 45 $\mu\text{m}$	D50	Index účinnosti	Vodonáročnost	Rel. pevnost při stejné vodě, náhrada 70 %	Součet bodů
<b>D</b>	5	6	2	5	4	4	5	5	5	<b>41</b>
<b>L</b>	2,5	2	6	4	3	1	2,5	2,5	4	<b>27,5</b>
<b>M</b>	1	4	4	1	1	2	2,5	2,5	1	<b>19</b>
<b>O</b>	4	5	5	3	5	5	4	4	3	<b>38</b>
<b>C</b>	2,5	3	3	2	2	3	1	1	2	<b>19,5</b>
<b>J</b>	6	1	1	6	6	6	6	6	6	<b>44</b>

**Popílek Dětmárovice na základě získaných výsledků z porovnávacích zkoušek vybíráme jako nejlepší popílek v ČR pro výrobu betonu s vysokým obsahem popílku (HVFAC).** Druhým nejlepším je popílek Opatovice. Obecně lze konstatovat, že pro výrobu HVFAC je možné použít pouze popílek, který má kromě vhodného chemického a mineralogického složení také vysokou jemnost (ideálně kategorie S dle EN 450-1), co nejvyšší index účinnosti po 28 dnech a vodonáročnost nižší než použitý cement. Technologické chování popílků pro HVFAC je nezbytné posuzovat při vyšších dávkách náhrady cementu než je běžné v normových postupech ( $\geq 30$  % hm.) a volit zkušební postup vycházející ze stejné výchozí konzistence, neboť tak lze získat nejvýraznější rozdíly při případném posuzování dvou a více popílků

### **3 NÁVRH RECEPTUR PRO HVFAC**

#### **3.1 OPTIMALIZACE OBJEMU CEMENTOVÉHO TMELU V POPÍLKOVÉM BETONU**

Rozhodujícím faktorem ovlivňujícím zpracovatelnost čerstvého betonu s popínkem je objem cementového tmelu. S ohledem na snahu maximalizovat dosahované pevnosti betonu není žádoucí množství cementového tmelu zvyšovat dodatečným provzdušněním nebo přidávkem vody či cementu. Nejschůdnějším řešením se ukazuje navýšení množství celkového obsahu popílku v betonu a dobrá skladba kameniva s co nejnižší mezerovitostí.

Objem cementového tmelu = objem cementu + objem popílku + objem zrn v kamenivu o velikosti  $< 0,25$  mm + objem vody + objem vzduchu v betonu + objem přísad do betonu.

Pro účely práce byl vytvořen soubor receptur popílkových betonů, který je uveden v tabulce 14. V tomto souboru jsou tři řady receptur s konstantním objemem cementového tmelu, a sice  $326 \text{ dm}^3$ ,  $315 \text{ dm}^3$  a  $306 \text{ dm}^3$ . V referenčním betonu bez popílku je  $301 \text{ dm}^3$  tmelu. V každé řadě receptur popílkového betonu se stejným objemem tmelu bylo množství cementu po prvních testech omezeno spodní hranicí  $160 \text{ kg/m}^3$ , neboť bylo zjištěno, že vyšší náhrady cementu popínkem již neumožnily z dostupných surovin vyrobit zpracovatelný beton. Horní hranice  $210 \text{ kg/m}^3$

představuje 30% uvažovanou náhradu cementu popílkem, což je nejnižší uvažovaná náhrada cementu v HVFAC vyvíjených v rámci tohoto projektu. Vodní součinitel byl omezen horní hranicí tak, aby byl zachován stejný poměr mezi dávkou vody a cementem, který činil 0,86. Pokud by však objem cementového tmelu při zvyšující se dávce popílku měl přerůst požadovanou hodnotu, byla dávka vody příslušným způsobem snížena.

V tabulce 14 původně navrhované objemy cementového tmelu nebylo možno dodržet. Ačkoliv se konzistence čerstvého betonu na požadovaný stupeň S4 (jako měl beton referenční) upravovala za pomoci navýšení dávky superplastifikační přísady, bylo nezbytné pro „rozpohybování“ betonu a snížení lepivosti zvýšit i dávku vody. Pevnost referenčního betonu bez popílku s 300 kg cementu na 1m<sup>3</sup> byla po 28 dnech 42,2 MPa. Maximální dosažená pevnost popílkového betonu s vyhovující zpracovatelností pro praktické využití činila 38,6 MPa (receptura 315-210), po 56 dnech jsou pevnosti u vyhovujících popílkových betonů vyšší jak u betonu bez popílku.



Tabulka 14 Návrh receptur popílkových betonů pro nalezení optimálního množství cementového tmelu a maximální možné náhrady cementu popílkiem Dětmarovice.

Objem tmelu 326 dm <sup>3</sup>	<b>cement/popílek (kg)</b>	<b>160/160</b>	<b>170/170</b>	<b>180/180</b>	<b>190/190</b>	<b>200/200</b>	<b>210/210</b>
	popílek navíc (kg)	105	67	30	0	0	0
	obsah cem. a popílku (kg)	425	407	390	380	400	420
	voda (kg)	138	147	155	160	152	145
	v/(c+popílek náhrada za cem)	0,431	0,432	0,431	0,421	0,380	0,345
	v/c	0,863	0,864	0,861	0,840	0,760	0,690
	v/(c+popílek celkem)	0,324	0,361	0,397	0,421	0,38	0,345
Objem tmelu 315 dm <sup>3</sup>	<b>cement/popílek (kg)</b>	<b>160/160</b>	<b>170/170</b>	<b>180/180</b>	<b>190/190</b>	<b>200/200</b>	<b>210/210</b>
	popílek navíc (kg)	80	40	4	0	0	0
	obsah cem. a popílku (kg)	400	380	364	380	400	420
	voda (kg)	138	147	155	149	141	133
	v/(c+popílek náhrada za cem)	0,431	0,432	0,431	0,392	0,353	0,317
	v/c	0,863	0,864	0,861	0,784	0,705	0,633
	v/(c+popílek celkem)	0,345	0,387	0,423	0,392	0,353	0,317
Objem tmelu 306 dm <sup>3</sup>	<b>cement/popílek (kg)</b>	<b>160/160</b>	<b>170/170</b>	<b>180/180</b>	<b>190/190</b>	<b>200/200</b>	<b>210/210</b>
	popílek navíc (kg)	57	18	0	0	0	0
	obsah cem. a popílku (kg)	377	358	360	380	400	420
	voda (kg)	138	147	147	139	132	124
	v/(c+popílek náhrada za cem)	0,431	0,432	0,408	0,366	0,33	0,295
	v/c	0,863	0,864	0,817	0,731	0,660	0,590
	v/(c+popílek celkem)	0,366	0,41	0,408	0,366	0,33	0,295

Pozn.: Ve všech recepturách betonu byla použita superplastifikační přísada HF 6 od společnosti CHRYSO Chemie s.r.o.

Tabulka 15 Shrnutí výsledků laboratorních zkoušek na betonech provedených za účel stanovení optimálního množství cementového tmelu a obsahu popílku. Kolaps znamená sednutí ČB podle ČSN EN 12350-2 vyšší jak 240 mm.

Teor. objem tmelu 326 dm <sup>3</sup>	<b>cement/popílek (kg)</b>	<b>160/160</b>	<b>170/170</b>	<b>180/180</b>	<b>190/190</b>	<b>200/200</b>	<b>210/210</b>
	receptura	326-160	326-170	326-180	326-190	326-200	326-210
	Obsah pojiva (kg)	425	407	390	380	400	420
	Celkový obsah popílku (kg)	265	237	210	190	200	210
	Skutečná dávka vody (kg)	153	162	170	170	162	155
	Skutečný v/pojivo	0,36	0,40	0,44	0,45	0,41	0,37
	Skutečný obsah cementového tmelu bez vzduchu (dm <sup>3</sup> )	346	344	344	339	339	340
	Sednutí betonu 5 min (mm)	Kolaps	Kolaps	Kolaps	Kolaps	Kolaps	Kolaps
	Použitelnost pro praxi	Nelze	Nelze			ok	
	Pevnost v tlaku 28 dní (MPa)	28,9	34,2	30,6	27,9	36,6	33,5
Teor. objem tmelu 315 dm <sup>3</sup>	<b>cement/popílek (kg)</b>	<b>160/160</b>	<b>170/170</b>	<b>180/180</b>	<b>190/190</b>	<b>200/200</b>	<b>210/210</b>
	receptura	315-160	315-170	315-180	315-190	315-200	315-210
	Obsah pojiva (kg)	400	380	364	380	400	385 !
	Celkový obsah popílku (kg)	240	210	184	190	200	175 !
	Skutečná dávka vody (kg)	153	162	170	164	156	164
	Skutečný v/pojivo	0,38	0,43	0,47	0,43	0,39	0,43
	Skutečný obsah cementového tmelu bez vzduchu (dm <sup>3</sup> )	334	333	333	333	333	333
	Sednutí betonu 5 min (mm)	Kolaps	235	240	Kolaps	Kolaps	230
	Použitelnost pro praxi	Nelze	Nelze				Ok
	Pevnost v tlaku 28 dní (MPa)	31,1	32,5	27,9	35,2	32,1	38,6
Teor. objem tmelu 306 dm <sup>3</sup>	<b>cement/popílek (kg)</b>	<b>160/160</b>	<b>170/170</b>	<b>180/180</b>	<b>190/190</b>	<b>200/200</b>	<b>210/210</b>
	receptura	306-160	306-170	306-180	306-190	306-200	306-210
	Obsah pojiva (kg)	377	358	360	380	400	368 !
	Celkový obsah popílku (kg)	217	188	180	190	200	158 !
	Skutečná dávka vody (kg)	153	162	162	160	147	160
	Skutečný v/pojivo	0,41	0,45	0,45	0,42	0,37	0,43
	Skutečný obsah cementového tmelu bez vzduchu (dm <sup>3</sup> )	324	324	324	331	327	322
	Sednutí betonu 5 min (mm)	215	230	210	235	Kolaps	Kolaps
	Použitelnost pro praxi	Nelze	Nelze	Nelze	Nelze	Nelze	Ok
	Pevnost v tlaku 28 dní (MPa)	29,5	33,7	30,6	38,1	35,4	35,4
	<i>Velmi dobře pohyblivý ČB</i>	<i>Obtížněji zpracovatelný ČB</i>		<i>Nevyhovující chování ČB</i>			

### 3.2 ZHODNOCENÍ PROVEDENÝCH LABORATORNÍCH TESTŮ BETONŮ

**Aby popílkový beton dosahoval přijatelné zpracovatelnosti (co nejnižší lepidivost), měl by vyhovovat souboru těchto parametrů:**

1. Optimální dávka popílku maximálně:  $180 \text{ kg/m}^3$
2. Optimální dávka pojiva maximálně:  $400 \text{ kg/m}^3$
3. Optimální dávka vody minimálně (z hlediska zpracovatelnosti):  $160 \text{ l/m}^3$
4. Optimální poměr voda/pojivo minimálně (z hlediska zpracovatelnosti):  $w \leq 0,4$
5. Optimální množství cementového tmelu minimálně:  $333 \text{ l/m}^3$

Z hlediska dosažení nízké lepidivosti betonu je vhodné omezit horní hranici obsahu popílku a celkový obsah pojiva, neboť jeho nadměrné množství vyžaduje navýšení dávky vody a superplastifikační přísady a projevuje se tedy spíše negativně na chování čerstvého betonu.

Zjištěné doporučené parametry složení betonu byly samozřejmě respektovány při návrhu receptur pro laboratorní a ověřovací zkoušky v provozu. Ke spolupráci byl vyzván výrobce betonu Zapa Beton, a.s. a na základě jeho výběru vhodné betonárny (zásobované popílkem Dětmárovice a CEM II/A-LL 42,5 R Hranice) byly receptury popílkového betonu navrženy s využitím surovin, které jsou k dispozici na betonárně v Hulíně.

Provedené zkoušky betonu také ukázaly, že je problematické nastavit dávku vody v popílkovém betonu tak, aby konzistence čerstvého betonu vyhovovala stupni S3, resp. S4 pod hodnotu 200 mm za současně splněné podmínky nízké lepidivosti. Popílkové betony jsou v porovnání s tradičními betony viskóznější (je to nutná daň za to, aby bylo dosaženo srovnatelných normových pevností) a jak ukázaly i provedené provozní zkoušky, je třeba tento fakt respektovat i při výrobě betonu na betonárně, kde se požadovaný stupeň konzistence kontroluje za pomoci konzistoměru v míchacím zařízení. Ve srovnání s běžným betonem budou v případě popílkového betonu pro stejné nebo i vyšší hodnoty sednutí číselné údaje uváděné konzistoměrem vždy vyšší. Čerstvý popílkový beton se vizuálně jeví hustší, než pak je prostřednictvím zkoušky sednutí dle ČSN EN 12350-2 následně stanoveno. Existuje zde tedy relativně vysoké riziko předávkování vodou s negativním dopadem na pevnosti betonu, pokud obsluha

míchacího zařízení tento fakt nebude zohledňovat. Z technologického pohledu jsou betony s vysokým obsahem popílku na výrobu obdobně náročné jako betony provzdušněné, samozhutnitelné či vysokopevnostní.

### 3.3 PRVNÍ PROVOZNÍ OVĚŘOVACÍ ZKOUŠKY V BETONÁRNĚ V HULÍNĚ

Ověřovací zkoušky v provozu proběhly na betonárně Zapa Beton v Hulíně. Soubor testovaných receptur betonu a výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce 16. Byl vyráběn referenční beton předpokládané pevnostní třídy C 25/30 s přísadou Chryso Fluid Optima 224 (superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátů pro transportní beton) a zkušební betony se superplastifikačními přísadami pro popílkové betony Chryso HF 6 a HF 13.

Velikost zkušební betonové záměsi činila 1 m<sup>3</sup> a beton byl lit do připravených forem na betonové bloky typu „LEGO“, viz obrázky níže. Cílem těchto zkoušek bylo zejména posoudit chování betonu v čerstvém stavu (citlivost dávkování vody a superplastifikační přísady na konzistenci ČB po zamíchání i po 60 min, sklon k segregaci a odlučování vody a citlivost k nadměrnému provzdušňování) v provozních podmínkách. Byla vyráběna zkušební tělesa na stanovení pevnosti v tlaku ve stáří 2, 7, 28 a 56 dní.



Obr. 27a a 27b: Betonové bloky vyráběné v rámci provozních zkoušek popílkového betonu na betonárně v Hulíně. Obrázek 27a je ilustrativní, nebyl pořízen při samotné betonáži.



Obr. 28a a 28b 28a - Vzhled betonu podle receptury H31-2 (s přísadou HF 6) po zkoušce sednutím v čase 5-10 min. 28b - Vzhled betonu podle receptury H33 (s přísadou HF 13) po zkoušce sednutím v čase 5 – 10 min.

#### Použité zkušební metody:

Zkoušení čerstvého betonu – Část 1: Zkouška sednutím dle ČSN EN 12350-2

Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody dle ČSN EN 12350-7

Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost dle ČSN EN 12350-6

Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles dle ČSN EN 12390-3

Tabulka 16 Složení na 1 m<sup>3</sup> a stanovené vlastnosti betonů vyrobených při provozních zkouškách.

Označení	Jed.	REF-2	H-31	H-31-2	H-33
CEM II/A-LL 42,5 R Hranice	kg	300	210	210	210
Popílek Dětmárovice	kg	0	165	165	165
% cementu v celkové dávce pojiva	%	100	56	56	56
Náhrada cementu popílkem	%	0 %	30	30	30
0-4 Hulín (1,7%)	kg	765	752	752	752
8-16 Hulín (1,5%)	kg	337	331	331	331

4-8 Hulín (1,5%)	kg	191	188	188	188
11-22 Luleč (0,9%)	kg	528	519	519	519
Optima 224	% hm.poj.	0,95			
	kg	2,85			
HF-6	% hm.poj.		0,89	0,89	
	kg		3,34	3,34	
HF-13	% hm.poj.				0,7
	kg				2,63
Dávka vody	kg	185	159	159	159
Navážka	kg				
<b>Čerstvý beton</b>					
Skutečná dávka vody	kg	195	174	170	169
Účinná dávka vody	kg	169	148	144	143
Sednutí kuželu 5-10 min	mm	<b>175</b>	<b>210</b>	<b>235</b>	<b>220</b>
Sednutí kuželu 30 min	mm	neměřeno	210	neměřeno	195
Sednutí kuželu 60 min	mm	neměřeno	neměřeno	neměřeno	180
Obsah vzduchu v ČB	% obj.	1,3	1,8	2,0	2,3
Objemová hmotnost ČB	kg/m <sup>3</sup>	2340	2330	2315	2290
Objem cementového tmelu se vzduchem	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	336	364	362	363
Objem záměsi	m <sup>3</sup>	1,008	1,024	1,022	1,024
Poměr voda účinná/pojivo		0,56	0,40	0,38	0,38
<b>Ztvrdlý beton</b>					
<b>Označení</b>	<b>Jed.</b>	<b>REF-2</b>	<b>H-31</b>	<b>H-31-2</b>	<b>H-33</b>
Pevnost v tlaku – 2 dny	MPa	<b>19,3</b>	<b>16,6</b>	--	<b>11,3</b>
Objemová hmotnost – 2 dny	kg/m <sup>3</sup>	2320	2340	--	2300
Pevnost v tlaku – 7 dní	MPa	<b>31,9</b>	<b>29,5</b>	<b>24,3</b>	<b>23,1</b>
Objemová hmotnost – 7 dní	kg/m <sup>3</sup>	2330	2330	2320	2310
Pevnost v tlaku 28 dní	MPa	<b>35,5</b>	<b>33,0</b>	<b>32,0</b>	<b>30,4</b>
Objemová hmotnost 28 dní	kg/m <sup>3</sup>	2350	2335	2300	2320
Pevnost v tlaku 56 dní	MPa	<b>37,9</b>	<b>50,8</b>	<b>43,7</b>	<b>43,7</b>
Objemová hmotnost 56 dní	kg/m <sup>3</sup>	2340	2360	2330	2315
Pevnostní třída ve stáří 28 dní		C 25/30	C 25/30	C 20/25	C 20/25
Poměr pevnosti 2 d/28 d	%	54	50	--	37
Vzhled ČB – obr.		ne	ne	12a	12b

### 3.4 ZHODNOCENÍ PRVNÍ OVĚŘOVACÍ ZKOUŠKY V BETONÁRNĚ V HULÍNĚ

Provozní zkoušky proběhly zcela bez problémů, vyrobený beton při zkoušce sednutí neodlučoval vodu a konzistence ČB se během prvních 60 min výrazně nezhoršila na rozdíl od předchozích výsledků z laboratorních zkoušek. Oproti původnímu zadání byla při míchání betonu navýšena dávka vody, nicméně rozdíl v obsahu vody mezi referenčním betonem a betonem popílkovým zůstal přibližně zachován. Vyrobený popílkový beton byl viskóznější než beton referenční, na podložce po zkoušce sednutí se však kužel dále deformoval na hodnoty uvedené v tabulce 16. Beton H-33 s přísadou HF-13 byl pohyblivější než beton H 31 (H 31-2) s přísadou HF-6. Teplota okolí během betonáže byla 15 °C.

Ve formě lego dílce byl beton bez ohledu na dosahovanou konzistenci pracovníky betonárny dle našeho názoru zbytečně intenzivně hutněn, takže pak docházelo na povrchu betonu k odlučování vody (ve zkušebních tělesech 150\*150\*150 mm ke „krvácení“ nedocházelo).

Pevnost popílkových betonů ještě v normovém stáří 28 dní nedosahovala úrovně betonu referenčního, ale ve stáří 56 dní ji překračovala již o 15 – 34 % (vztaženo k pevnosti referenčního betonu). Superplastifikační přísada HF-6 umožňuje v porovnání s přísadou HF-13 rychlejší náběh pevností. Dosahované pevnosti při srovnatelné dávce vody jsou s přísadou HF-6 vyšší než s HF-13. V případě výroby popílkových betonů na betonárně v Hulíně se jeví jako vhodnější přísada HF-6. Jelikož celkový obsah vzduchu v betonu nepřesahoval při provozních zkouškách hodnotu 3 % obj., byla v této fázi řešení formulace superplastifikačních přísad HF-6 a HF-13 hodnocena jako postačující.

### 3.5 DRUHÉ PROVOZNÍ OVĚŘOVACÍ ZKOUŠKY V BETONÁRNĚ V HULÍNĚ

Další ověřovací zkoušky v provozních podmínkách proběhly opět na betonárně ZAPA v Hulíně a jejich hlavním cílem bylo využít kapacity betonárny pro výrobu zkušebních těles na zkoušky pevnosti v tlaku a tyto další zkoušky betonu:

- ČSN EN 13295 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení odolnosti proti karbonataci
- ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou
- ČSN 73 1320 Stanovení objemových změn betonu
- Vývoj teplot v betonu během počáteční hydratace cementu

Během druhých provozních zkoušek byly opět vyráběny zkušební záměsi o velikosti 1 m<sup>3</sup> a ukládány do připravených forem pro betonové dílce typu Lego. Každá receptura betonu uvedená v tabulce 17 byla vyráběna jen jednou (vyjma receptury HF-6), jelikož vytíženost betonárny v daný den neumožnila zkoušky opakovat a technické problémy na betonárně si vynutily delší pauzy mezi jednotlivými zkušebními výrobami. Vlhkost kameniva se během zkoušek měnila v důsledku opakovaného plnění zásobních sil během betonáže, takže v jednotlivých recepturách betonu byla skutečná vlhkost kameniva rozdílná. Kolísavá vlhkost kameniva během druhých kontrolních zkoušek byla pravděpodobnou příčinou obtížného korigování konzistence čerstvého betonu mající za následek segregaci. Důkazem uvedeného jsou receptury HF-6 I a HF-6 II, kdy ani přes výrazné snížení dávky vody a přísady nedošlo ke snížení stupně konzistence betonu. Vysoká dávka vody v receptuře HF-6 I je důsledkem korekce dávky vody podle údaje konzistoměru a zkušeností obsluhy míchacího centra. Jak již bylo uvedeno, popílkové betony jsou v porovnání s běžnými betony viskóznější (medovitější), při míchání kladou vyšší odpor a hodnoty konzistoměru mohou být díky tomu zavádějící (resp. nelze podle hodnoty konzistoměru stejně vyhodnocovat předpokládanou konzistenci běžných a popílkových betonů). Díky zbytečně vysoké dávce vody byly pevnosti betonu podle receptury HF6-I nižší než předpokládané.



Tabulka 17 Přehled výsledků druhého kola provozních zkoušek.

Provozní zkoušky 2 – Zapa Beton Hulín						
Návrh receptury na 1 m <sup>3</sup>						
Označení		O224	HF6 I	HF6 II	HF 13	CHP 460
Navrhovaná třída betonu		C 25/30	C 25/30	C 25/30	C 25/30	C 25/30
Pořadí při výrobě		1	2	5	4	3
CEM II/A-LL 42,5 R Hranice	kg	300	210	210	210	248
Popílek Dětmárovice celkem	kg	0	150	150	150	60
Obsah pojiva celkem	kg	300	360	360	360	308
0-4 Hulín (nasákavost 1,7 %)	kg	784	765	765	770	767
4-8 Hulín (nasákavost 1,5 %)	kg	195	191	191	193	192
8-16 Hulín (nasákavost 1,5 %)	kg	346	337	337	339	338
11-22 Luleč (nasákavost 0,9 %)	kg	540	528	528	531	530
(Super)plastifikátor						
Název		Optima 224	HF-6	HF-6	HF-13	Plast 460
Dávka	kg	2,9	3,64	3,24	3,13	2,48
Dávka( % z hmotnosti pojiva)	%	0,97	1,01	0,9	0,87	0,81
Voda na suché kamenivo	kg	180	160	160	155	185
v/pojivo		0,6	0,44	0,44	0,43	0,60
Navážka	kg	2348	2345	2345	2351	2322
Čerstvý beton						
konzistoměr		13	18	22	13	14
Sednutí ČB – 5 min	mm	220	235	265	230	210
Segregace v krychli		ne	ne	ano	ano	ne
Obsah vzduchu v ČB	%	1,7	1,8	2,0	4,9 !	1,7
Objemová hmotnost ČB	kg/m <sup>3</sup>	2300	2270	2260	2185	2270
Ztvrdlý beton						
Pevnost v tlaku 1 d	MPa	12,2	6,5	8,0	5,1	7,7
Pevnost v tlaku 7 d	MPa	21,5	13,5	19,5	11,5	18,5
<b>Pevnost v tlaku 28 d</b>	<b>MPa</b>	<b>28,2</b>	<b>22,8</b>	<b>29,6</b>	<b>18,1</b>	<b>25,7</b>
Pevnost v tlaku 56 d	MPa	33,7	29,5	36,0	24,0	30,6
Objemová hmotnost ZB – 28 d	kg/m <sup>3</sup>	2310	2280	2334	2230	2290
Poměr 1d/28d	%	43	29	27	28	30
Skutečný stav složek v 1 m <sup>3</sup> betonu						
Skutečná dávka vody celkem	kg	174	192 !	149	148	185
Účinný obsah vody celkem	kg	148	166	123	122	159
Skutečná dávka přísady celkem	kg	2,9	3,6	3,24	3,1	2,48
Ekvivalentní vodní součinitel v/(c+k*p) dle EN 206+A1-1/Z4		0,49	0,7	0,52	0,52	0,57
Skutečný objem cementového tmelu se vzduchem	dm <sup>3</sup>	320	376	334	362	339
Skutečný objem záměsi se vzduchem	m <sup>3</sup>	1,008	1,048	1,007	1,039	1,014
Třída pevnosti betonu – 28 d		C 20/25	C 12/15	C 20/25	C 12/15	C 16/20
Skutečná dávka cementu na 1m <sup>3</sup>	kg	298	200	209	202	245

V recepturách betonu v tabulkách 16 i 17 (výsledky z obou provedených provozních zkoušek) je celková dávka vody korigována na dávku účinnou podle zadaných údajů o vlhkosti kameniva v počítači míchacího centra betonárny. Ačkoliv účinná dávka vody během druhých provozních zkoušek byla nižší při jinak srovnatelném složení betonu, jsou jak u referenční receptury s Optimou 224, tak u receptury popílkových betonů, dosahované pevnosti v nižší. Jelikož je pokles pevností zřejmý i u receptury referenčního betonu bez popílku, nelze jednoznačně tvrdit, že nižší pevnosti jsou důsledkem jiné dodávky popílku Dětmarovice.

### 3.5.1 VÝVOJ TEPLOT BĚHEM POČÁTEČNÍ HYDRATACE

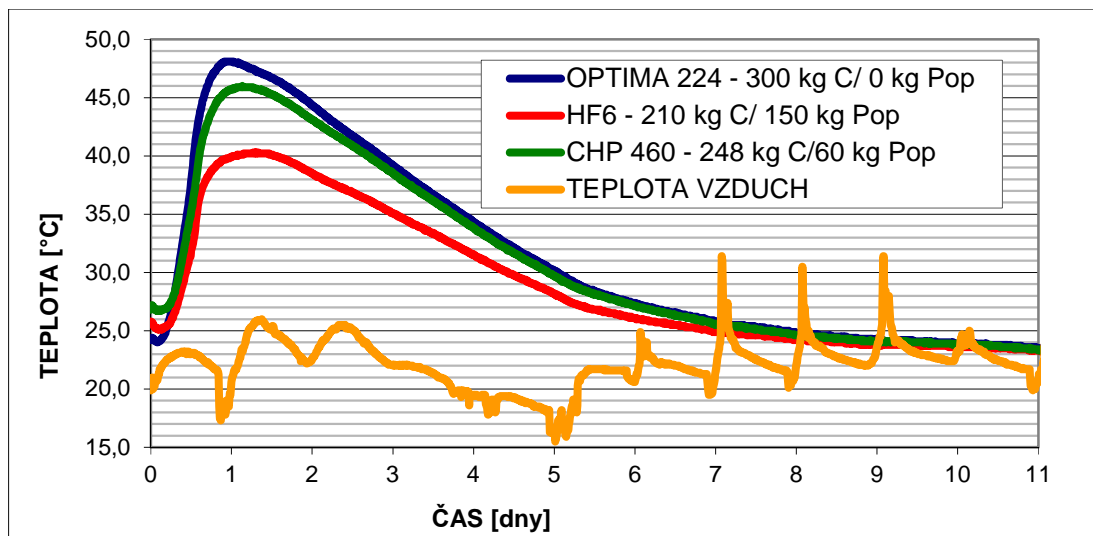
Pro sledování teplotního vývoje v jádru betonu byly použity krychlové formy s polystyrénovým pláštěm o velikosti hrany 300 mm (tj. pro 27 l betonu), ve středu formy bylo fixováno teplotní čidlo. Tyto formy jsou používány Kloknerovým ústavem běžně při zkouškách v in-situ a dle zkušeností pracovníků KÚ simulují vývoj teplot z 1 m<sup>3</sup> betonu. K dispozici byly 3 zkušební formy.

První série zkoušek proběhla na betonárně v Hulíně, kde byly testovány receptury O 224, HF6-I a CHP 460 navrhované pevnostní třídy C 25/30 (viz tab. 17). Experiment byl dokončen při laboratorních zkouškách, kdy byly testovány receptury B20-HF6, B30-HF6 a B30-HF13. Teplota okolí byla pokaždé jiná, a proto receptura popílkového betonu s přísadou HF-6 pro pevnostní třídu C 25/30 (s 210 kg cementu/1 m<sup>3</sup>) byla vyrobena opakovaně a slouží jako vztažná receptura mezi oběma sériemi zkoušek.

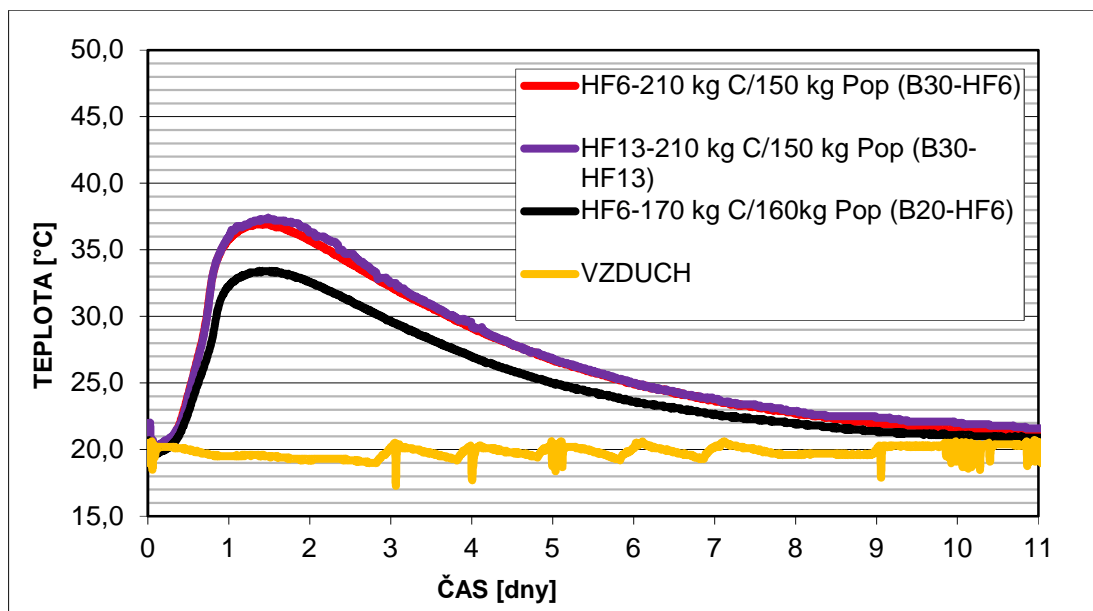
Ačkoliv podmínky při první a druhé sérii zkoušek nebyly identické, z grafů na obr. 29 a 30 plyne:

- S klesajícím obsahem cementu v receptuře betonu se snižuje velikost maximální dosažené teploty při hydrataci přímo úměrně. Obsah cementu je nejpodstatnějším faktorem, který ovlivnil vývoj teploty během hydratace.
- Superplastifikační přísady HF 6 a HF13-1 mají stejný vliv na vývoj teploty během hydratace.
- Betony s vysokým obsahem popílku umožňují výrazné snížení maximální teploty během hydratace cementu v porovnání s betonem bez popílku.

Tyto zkoušky potvrdily známý fakt, že betony s vysokou náhradou popílku za cement jsou vhodné pro využití v masivních konstrukcích, resp. všude tam, kde je požadavek na beton s nízkým vývinem hydratačního tepla.



Obr. 29 Vývoj teplot během hydratace z betonu vyrobeného na betonárně, receptury betonu viz tab.17.



Obr. 30 Vývoj teplot během hydratace z betonu vyrobeného v laboratoři, receptury betonu viz tab.15.

### 3.5.2 STANOVENÍ OBJEMOVÝCH ZMĚN BETONU S VYSOKÝM OBSAHEM POPÍLKU

Smrštění ztvrdlého betonu bylo stanoveno dilatometrickou metodou postupem dle ČSN 731320. Pro zkoušku byly použity pro každou recepturu tři trámce o rozměrech 100x100x500 mm odebrané pracovníky Kloknerova ústavu. Výroba trámců proběhla do trojformy, čelo každého trámce bylo osazeno měřícím trnem. Po odformování těles se provedlo první (nulté) měření. Měření se provádělo diskrétně na jednotlivých trámcích v pravidelných časových intervalech. Pro měření se používalo měřící zařízení (obr. 31). Současně se zaznamenával stav okolního prostředí (vlhkost, teplota) a změna hmotnosti trámců.

Na obrázku 32 a 33 jsou zpracovány výsledky měření z dílčích odběrů, přičemž je zohledněn rozptyl výsledků stanovených na jednotlivých trámcích, aby bylo možno objektivně zhodnotit významnost rozdílu průměrných hodnot smrštění mezi jednotlivými recepturami betonů. Přehled základních údajů z testovaných receptur betonů je uveden v tabulce 18. Na obrázku 34 jsou pak veškerá data představena na jednom grafu. Z výsledků na obrázku 32 – 34 plyne následující:

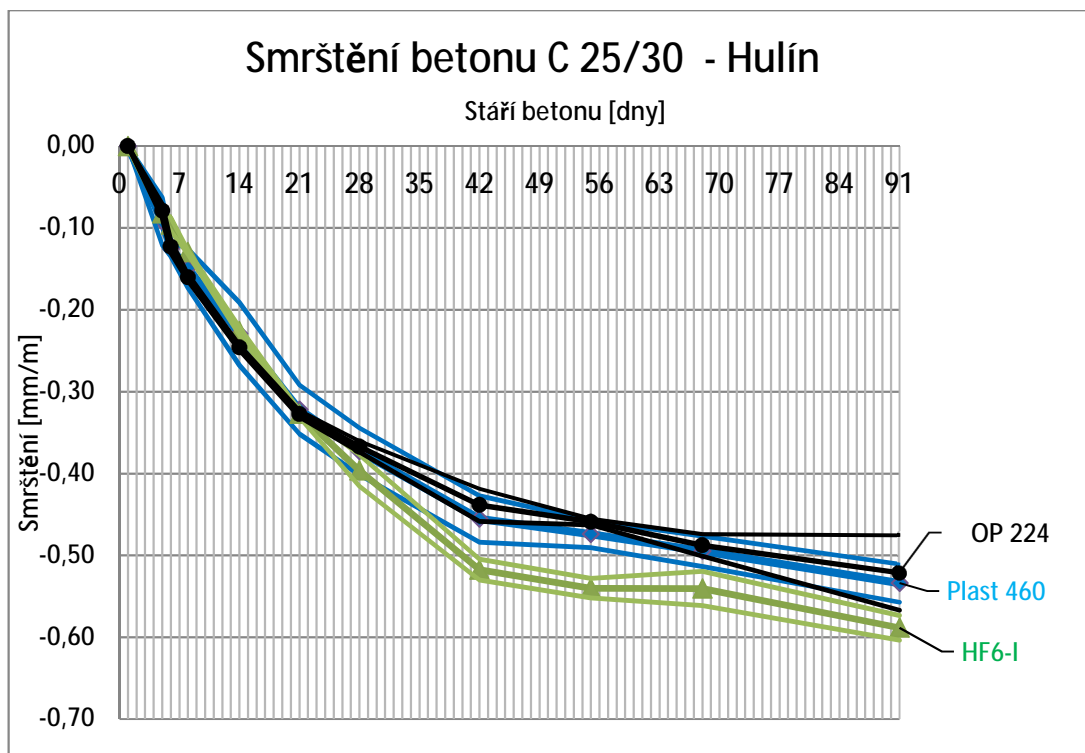
- Smrštění popílkových betonů není vyšší, než jaké bylo naměřeno u betonů referenčních (CHP 460, O 224, B 20-460). Výjimku tvoří „nepovedená záměs“ HF6-I z provozních zkoušek na betonárně Hulín, kde za vyšší hodnotu smrštění může vyšší dávka záměsové vody. Tato receptura betonu s korigovanou dávkou vody byla přemíchána při laboratorních zkouškách dne 27.9. (B30-HF6) a velikost smrštění této receptury je zcela srovnatelné s recepturou referenčního betonu bez popílku s Optimou 224 (O 224 – betonárna Hulín).
- Z porovnání velikosti smrštění betonů třídy C 16/20 - betonu s vysokou náhradou popílku (B20-HF6) a betonu referenčního k této receptuře (B20-460) plyne, že popílkový beton má hodnotu smrštění po 90 dnech dokonce významně nižší než beton referenční.
- Pokud nebude dávka záměsové vody v popílkových betonech nadměrně vysoká, není třeba se obávat nadměrného smrštění těchto betonů ani přes vyšší obsah pojiva v betonu. Hodnoty smrštění popílkových betonů jsou pak srovnatelné s tradičními betony.



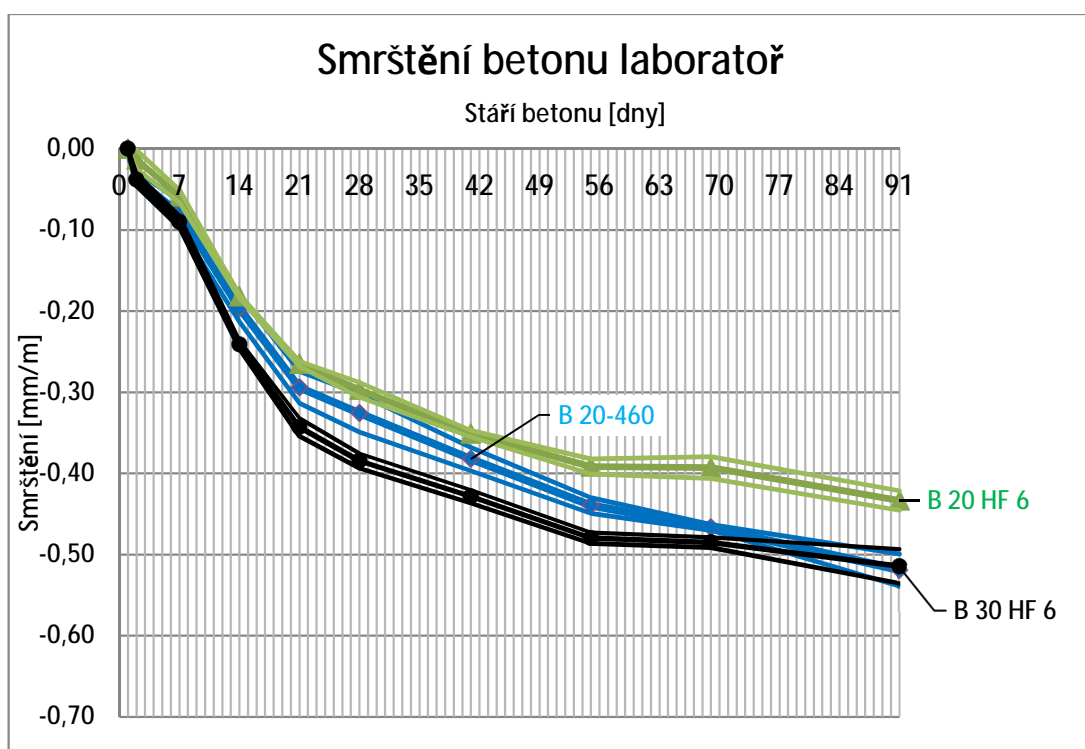
Obr. 31 Měřicí zařízení pro diskrétní měření délkových změn zkušebních trámců

Tabulka 18 Výběr základních údajů z receptury betonů, u kterých bylo provedeno stanovení objemových změn.

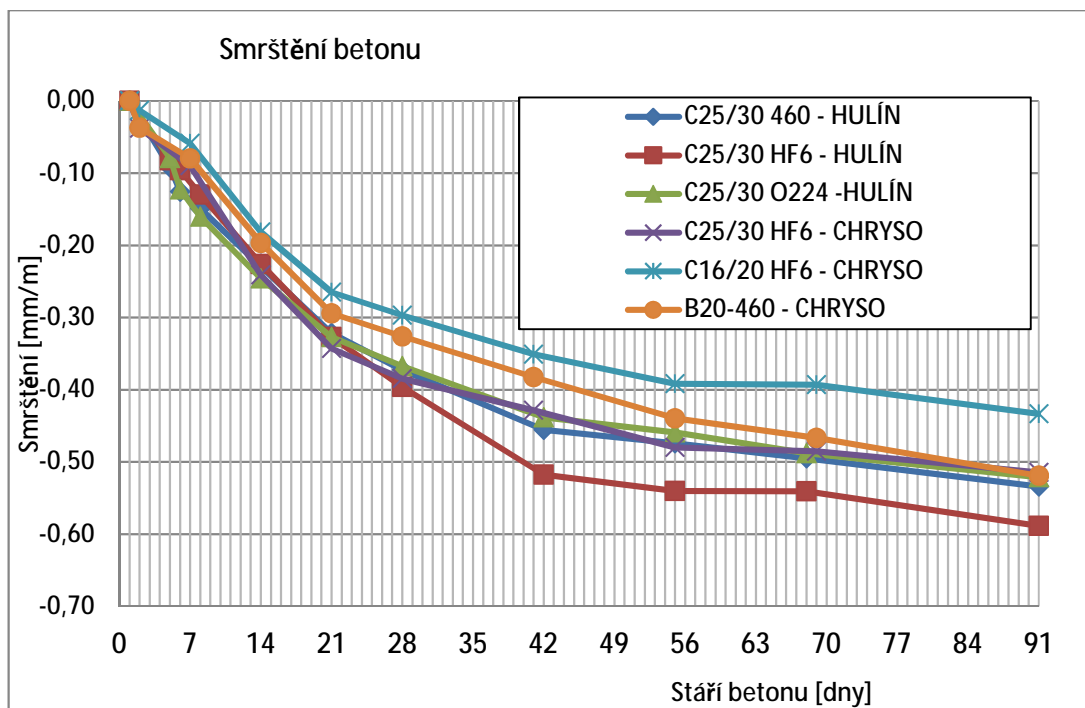
<b>Provozní zkoušky Hulín</b>			
Označení receptury	<b>CHP 460</b>	<b>HF6-I</b>	<b>O 224</b>
přísada	Plast 460	HF-6	Optima 224
CEM II/A-LL 42,5 R Hranice	248 kg	210 kg	300 kg
Popílek Dětmrovice	60 kg	150 kg	0 kg
Celkový obsah pojiva	308 kg	360 kg	300 kg
Voda	185 kg	192 kg	174 kg
Voda / pojivo celkem	0,60	0,53	0,58
Objemová hmotnost trámců – průměr (kg/m <sup>3</sup> )	2280	2260	2290
<b>Laboratorní zkoušky</b>			
Označení receptury	<b>B20-460</b>	<b>B20-HF6</b>	<b>B30-HF6</b>
Přísada	Plast 460	HF 6	HF 6
CEM II/A-LL 42,5 R Hranice	206 kg	170 kg	210 kg
Popílek Dětmrovice	110 kg	160 kg	150 kg
Celkový obsah pojiva	316 kg	330 kg	360 kg
Voda	195 kg	173 kg	170 kg
Voda / pojivo celkem	0,62	0,52	0,47
Objemová hmotnost trámců – průměr (kg/m <sup>3</sup> )	2290	2300	2270



Obr. 32 Smrštění betonu – vzorky odebrané při provozních zkouškách v Hulíně.



Obr. 33 Smrštění betonu – vzorky odebrané při laboratorních zkouškách.



Obr. 34 Smrštění betonu – průměrné hodnoty z obou provedených odběrů.

### 3.5.3 STANOVENÍ HLOUBKY PRŮSAKU TLAKOVOU VODOU BETONŮ S VYSOKÝM OBSAHEM POPÍLKU

Vodotěsnost betonu, resp. hloubka maximálního průsaku tlakové vody betonem, je vlastnost betonu, která vypovídá o jeho hutnosti a tedy i odolnosti proti většině stupňů vlivu prostředí. Zkouška byla provedena podle ČSN EN 12390-8. V tabulce 19 je uvedena maximální hloubka průsaku, které musí beton vyhovět pro různé stupně vlivu prostředí, u nichž lze uvažovat s využitím betonů s vysokým obsahem popílku.

Tabulka 19 Požadavky ČSN EN 206+A1 na maximální průsak vody betonem při zkoušce dle ČSN EN 12390-8 pro různé stupně vlivu prostředí.

Stupeň vlivu prostředí	Kontrolní zkoušky	Průkazní zkoušky
XC4, XF1, XA1, XD2	50 mm	40 mm
XA2	35 mm	28 mm
XA3, XD3	20 mm	16 mm

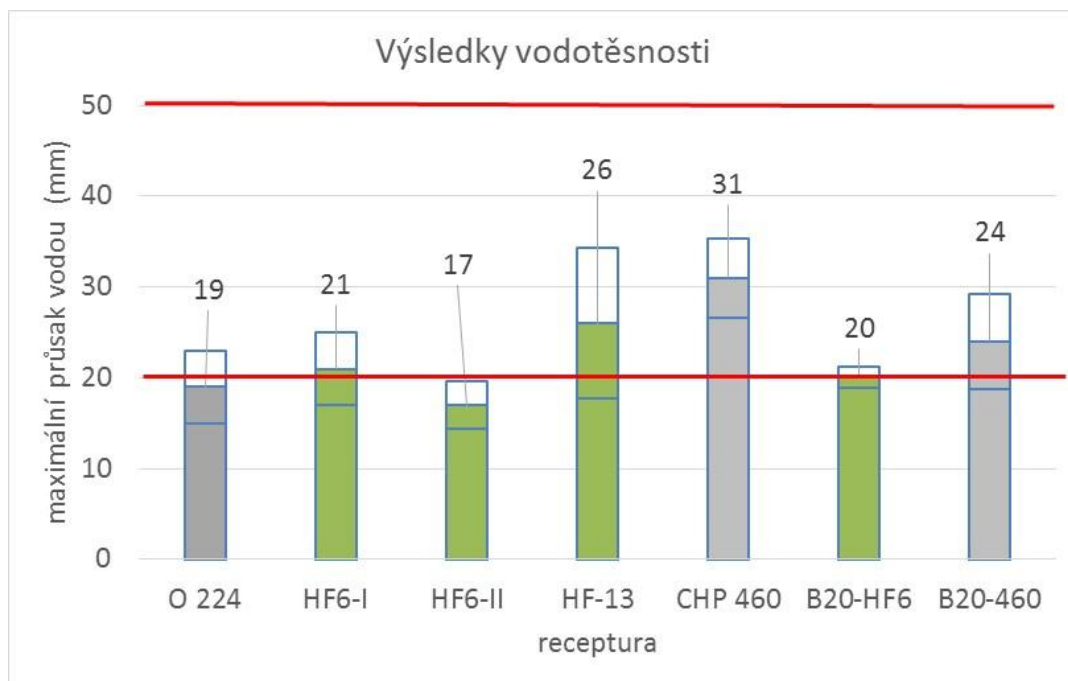
Výsledky zkoušky vodotěsnosti testovaných popílkových betonů a betonů referenčních jsou uvedeny v tabulce 20 a na obr. 35. Na zkoušku vodotěsnosti byla použita zkušební tělesa vyrobená při provozních zkouškách na betonárně V Hulíně v laboratoři. Podrobnosti k jednotlivým recepturám včetně výsledků pevností jsou uvedeny v tabulkách 16 a 17.

Tabulka 20 Výsledky zkoušky vodotěsnosti dle ČSN EN 12390-8. Referenční receptury betonu jsou zvýrazněny.

Výroba	Recept	Navrhovaná pevnostní třída betonu	Objem. Hmot. (kg/m <sup>3</sup> )	Pevnost v tlaku 28 dní (MPa)	Obsah cementu/popí lku/záměsové vody účinné (kg)	Hloubka průsaku – průměr (mm)
Hulín	<b>O 224</b>	C 25/30	2280	28,2	300/0/148	<b>19</b>
Hulín	<b>HF6-I</b>	C 25/30	2290	22,8	210/150/166	<b>21</b>
Hulín	<b>HF6-II</b>	C 25/30	2270	29,6	210/150/123	<b>17</b>
Hulín	<b>HF13</b>	C 25/30	2200	18,1	210/150/122	<b>26</b>
Hulín	<b>CHP 460</b>	C 25/30	2310	25,7	248/60/159	<b>31</b>
LABO	<b>B20- HF6</b>	C 16/20	2330	24,2	170/160/155	<b>20</b>
LABO	<b>B20- 460</b>	C 16/20	2320	23,1	206/110/177	<b>24</b>

Z výsledků na obrázku 35 jednoznačně plyne, že všechny testované receptury mají vyhovující odolnost pro stupně vlivu prostředí XC4, XF1, XA1. XD2 (max. průsak 50 mm) a XA2 (max. průsak 35 mm). Problematické se jeví dosažení stupně vlivu prostředí XA3, XD3. Všechny testované receptury betonů s vysokým obsahem popílku nemají vodotěsnost významně horší než referenční betony a v tomto ohledu je lze tedy považovat za podobně odolné jako tradiční betony.





Obr. 35 Výsledky zkoušky vodotěsnosti včetně vyznačení limitních hodnot, které připouští ČSN EN 206+A1-1. Graf zachycuje průměrné hodnoty průsaku a průměr  $\pm$  směrodatnou odchylku.

### 3.5.4 STANOVENÍ ODOLNOSTI BETONU PROTI KARBONATACI, ANALÝZA PÓROVÉ STRUKTURY BETONU

Karbonatace betonu je chemický proces vyvolaný reakcí oxidu uhličitého se složkami cementového tmelu (portlanditu). Během karbonatace dochází k postupnému snižování pH pórového roztoku a postoupí-li karbonatace až do hloubky, v níž je uložena výztuž, není již výztuž betonem pasivována (chráněna) a vlivem působení kyslíku a vlhkosti začíná korodovat. Obecně závisí rychlost karbonatace na koncentraci  $\text{CO}_2$ , teplotě, vlhkosti, hutnosti betonu (trhlinách a mikrotrhlinách v betonu), obsahu a druhu cementu, vodním součiniteli a kvalitě ošetřování betonu během zrání.

Popílek je příměs mající pucolánové vlastnosti a jeho křemičité sloučeniny (obdobně jako  $\text{CO}_2$ ) reagují s portlanditem za vzniku C-S-H fází. Nicméně při této reakci se obdobně jako při karbonataci spotřebovává hydroxid vápenatý a v důsledku toho dochází také k poklesu pH. Proto betony s vysokým obsahem popílku, tedy s nízkým obsahem reagujícího slínku, jsou z tohoto pohledu často považovány za problematické a vlivu karbonatace na trvanlivost betonů s vysokým obsahem popílku je věnována řada odkazů v literatuře, zde jen výběr [33, 34, 35]. Jak je uvedeno např. v [35], kinetika karbonatace však nezávisí pouze na celkovém obsahu portlanditu

v cementovém kameni, ale také na jeho pórové struktuře a vlhkosti. Díky optimalizaci složení betonů s vysokým obsahem popílku a výrazné redukci záměsové vody z důvodu dosažení požadovaných pevností a díky probíhající pucolánové reakci je pórová struktura těchto betonů zpravidla hutnější, což pozitivně působí proti postupu karbonatace. V [36] z roku 1997 se uvádí, že až do 60 % hm. obsahu popílku nehrozí riziko kritického snížení hodnoty pH pórového roztoku betonu.

V této práci byla odolnost betonu proti karbonataci posuzována na základě zkušební metodiky popsané v ČSN EN 13295. Podstata laboratorní zkoušky spočívá v uložení zkušebních těles ve tvaru hranolů 100\*100\*400 mm v prostředí atmosféry obsahující 1 % CO<sub>2</sub>, o teplotě 21 ± 2 °C a relativní vlhkosti 60 ± 10 % po dobu 56 dní. Díky vyšší koncentraci CO<sub>2</sub> (v běžné atmosféře kolem 0,03 %) a vyšší relativní vlhkosti je proces karbonatace urychlen. Na základě zkušeností a poměru koncentrace CO<sub>2</sub> v komoře (1 %) a v atmosféře (cca 0,04 %) odpovídá zrychlený 56-denní test cca 4 letům působení běžné atmosféry. Vedle zkušebních těles umístěných ve zkušebním prostředí s vyšší koncentrací CO<sub>2</sub> jsou další (referenční) tělesa umístěna po stejnou dobu v běžném laboratorním prostředí. Po uplynutí zkušební doby jsou trámce rozlomeny a na čerstvé lomové ploše je provedena kolorimetrická zkouška roztokem 1 % fenolftaleinu (obr. 36). Stáří těles v okamžiku posouzení hloubky karbonatace bylo 84 dní.

Na vybraných recepturách betonu bylo dále provedeno stanovení distribuce pórů za pomoci vysokotlaké rtuťové porozimetrie (viz obr. 37 a 38). Vysokotlaká rtuťová porozimetrie byla stanovena na referenčních tělesech bezprostředně po ukončení zkoušky karbonatace. Pro obdržení komplexnějšího obrazu o vlastnostech betonu bylo dále provedeno stanovení zdánlivé pórovitosti a nasákavosti za pomoci saturace vzorků izopropanolem podle zkušební metody popsané ve směrnici WTA 2-9-04/D čl. 6.9. Stanovení pórovitosti.

Výsledky zrychlené zkoušky karbonatace a stanovené hodnoty porozity a nasákavosti jsou uvedeny v tabulce 21. Zkušební tělesa byla vyrobena při provozních zkouškách na betonárně v Hulíně a při míchání v laboratoři.

Tabulka 21 Výsledky stanovení hloubky karbonatace a pórovitosti betonu zrychlenou metodou.

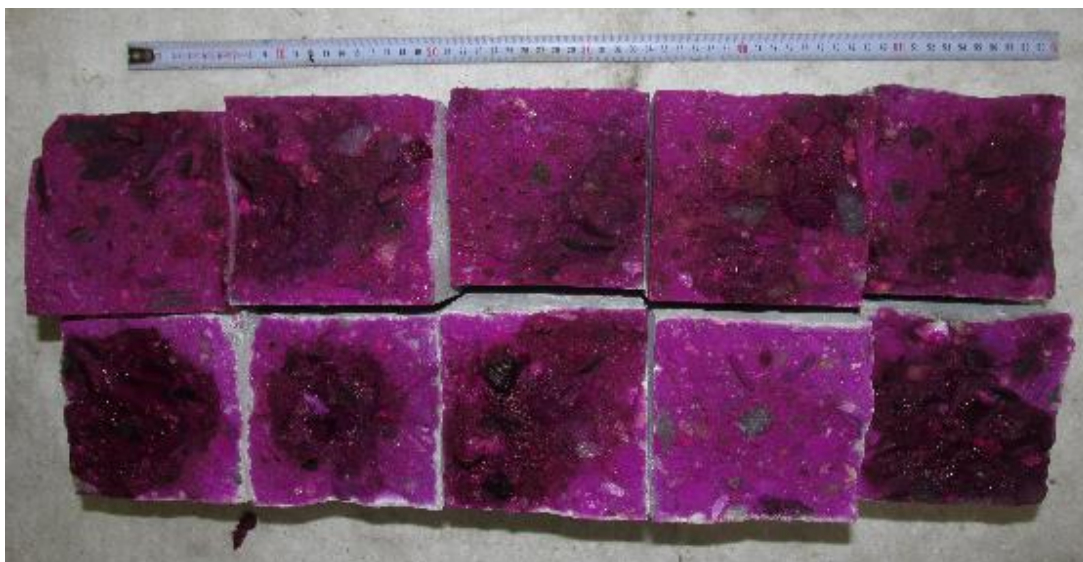
Receptura	Místo výroby	Pevnost v tlaku 28 dní (MPa)	Obsah cementu/popílku (kg)	Vysokotlaká Hg-porozimetrie		Izopropanol - WTA			Hloubka karbonatace (mm)	
				Porozita (%)	Střední poloměr pórů ( $10^2 \mu\text{m}$ )	Zdánlivá pórovitost (%)	Nasákavost (%)	Objemová hm. ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Laboratorní prostředí	Zrychlená zkouška
<b>O 224</b>	Hulín	28,2	300/0	17,2	1,10	9,7	3,5	2180	0	<b>2</b>
<b>HF6-I</b>	Hulín	22,8	210/150	21,7	1,39	10,4	3,8	2140	2	<b>3</b>
<b>CHP 460</b>	Hulín	25,7	248/60	21,2	1,60	11,2	4,1	2130	0	<b>2</b>
<b>B20-460</b>	Labo	23,1	206/110	18,3	1,37	9,4	3,3	2220	0	<b>3</b>
<b>B20-HF6</b>	Labo	24,2	170/160	15,5	1,68	6,5	3,5	2190	1	<b>4</b>

Naměřené rozdíly v hloubce karbonatace mezi jednotlivými recepturami jsou poměrně malé (1 mm) a odpovídají nejistotě měření. Obdobné hloubky karbonatace jsou stanovovány na běžných betonech obdobných pevnostních tříd zkoušených v Kloknerově ústavu za posledních cca 10 let odebraných v Praze a jejím okolí. Nelze tedy tvrdit, že by testované receptury betonu s vysokým obsahem popílku měly významně sníženou odolnost proti působení karbonatace v porovnání s běžnými betony.

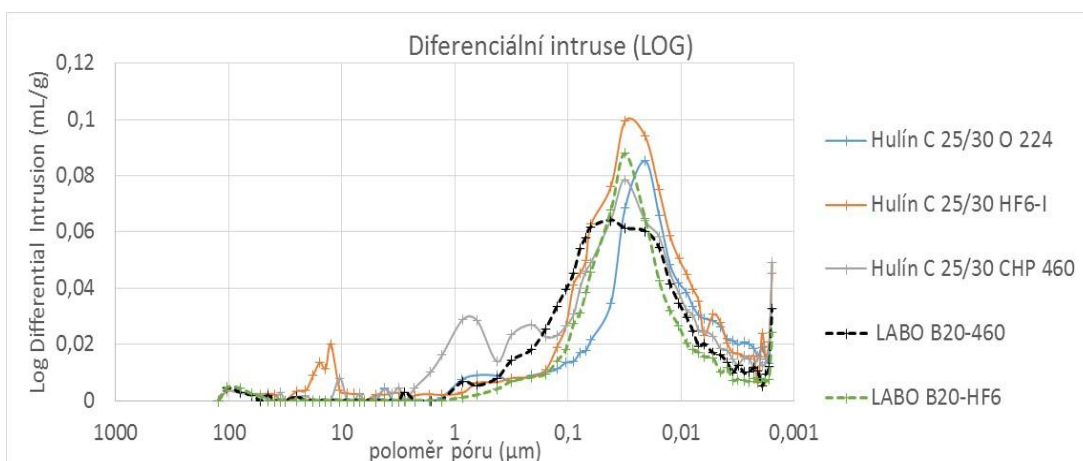
Ani rozdíly v porozitě betonu, stanovené dvěma různými zkušebními postupy, nejsou výrazné. Nejvyšší porozita byla zaznamenána u těles z receptury HF6-I a CHP 460, které byly vyrobeny při provozních zkouškách v Hulíně, přičemž v betonu HF6-I byla dávka záměsové vody navýšena oproti původnímu návrhu. V obou recepturách je vyšší zastoupení pórů s větším poloměrem (viz obr. 37 i 38).

Výraznější rozdíl v distribuci pórů byl zaznamenán u receptur z laboratoře B20-460 a B20-HF6 (viz obr. 37). Oba testované betony mají srovnatelnou pevnost, obsah cementu v receptuře B20-HF6 je o 36 kg nižší než v referenční receptuře B20-460. Popílkový beton B20-HF6 má sice nižší porozitu i vyšší zastoupení pórů menšího průměru, hloubka karbonatace ale není významněji zlepšena. Hodnocení vztahu mezi množstvím a distribucí pórů v betonu a hloubkou karbonatace je u hodnoceného

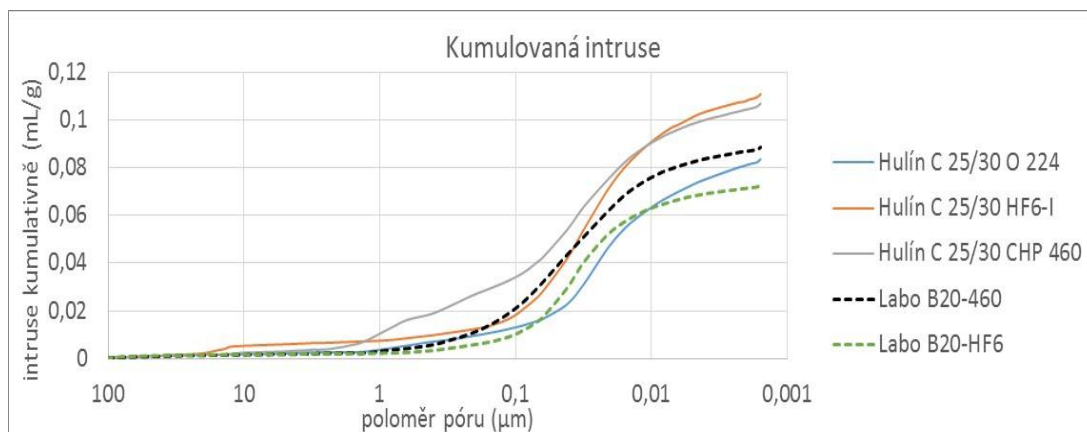
souboru betonů velmi obtížné vzhledem k malým rozdílům mezi dílčími hodnotami, které jsou na hranici nejistoty měření. Závěrem lze pouze konstatovat, že hloubka karbonatace hodnocená za pomoci zvolené zkušební metodiky není u popílkových betonů významně horší než u betonů tradičních s nižším obsahem popílku resp. bez popílku.



Obr. 36 Zkušební tělesa po vyjmutí z atmosféry urychlující karbonataci betonu.  
Zleva ve sloupcích: O 224, HF6-I, CHP 460, B20-460, B20-HF-6.



Obr. 37 Vysokotlaká rtuťová porozimetrie – distribuce pórů.



Obr. 38 Vysokotlaká rtuťová porozimetrie – četnost pórů.

## 4 TESTY POPÍLKŮ NA OBSAH NO<sub>x</sub>

### 4.1 ÚVOD

Jak již bylo podrobně popsáno v kapitole 1.4 přinesl rok 2016 závazně nové legislativní opatření upravující emisní limity produkovaných spalín [20]. Nároky na kvalitu produkovaných spalín jsou poslední roky neustále zpřísňovány, proto jsou zejména výrobci elektrické energie, pocházející z energetických jednotek spalujících uhlí, nuceni zavádět dodatečné ekologizační technologie. Nejvíce nová legislativa zpřísňuje kontrolu produkce emisí oxidů dusíku, které ještě v nedávných dobách stály zcela mimo stranu zájmů. Bylo proto vyvinuto několik způsobů nových ekologizačních technologií v rámci zkvalitnění redukce oxidů dusíku, které se od sebe zásadně liší zejména nutností zásahu do spalovacího procesu nebo do konstrukce celého spalovacího agregátu. Většina tepelných elektráren a spaloven na území České a Slovenské republiky se však zejména z ekonomických důvodů ubírá jednotnou cestou, zavedením selektivní nekatalytické redukce oxidů dusíku (dále jen SNCR).

Výroba betonu s přidavkem elektrárenského popílku vznikajícího při selektivní nekatalytické redukci oxidů dusíku SNCR (reakce redukčních činidel např. močoviny nebo čpavkové vody), při které se odštěpují čpavek s oxidem dusnatým (NO) a oxidem dusičitým (NO<sub>2</sub>), manipulace s ním, aplikace a následné emise amoniaku do vnitřního prostředí staveb vyvolávají otázku rizika překročení hygienických limitů pro koncentraci amoniaku v ovzduší. ČSN EN 4502-1 v čl. 5.4.2 uvádí "Popílek nesmí obsahovat látky, které by po uvolnění z betonu byly nebezpečné pro zdraví, hygienu

a životní prostředí”, což amoniak je. Je pak otázkou, jak vysoké koncentrace amoniaku v ovzduší jsou, zda jsou “nebezpečné pro zdraví, hygienu a životní prostředí”. Vedle těchto otázek jsou otázky technologické tzn. kvalita takovýchto popílků z pohledu vlivu na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Výsledkem je nejistota bezpečného využívání takovýchto popílků na straně výrobce betonu. V konečném důsledku tak dochází k omezování používání takovýchto popílků, neboť potenciální riziko (neexistence limitů) při používání popílku jako částečné náhrady cementu převyšuje možnou úsporu plynoucí z nižší ceny této pucolánové příměsi, kterou jistě i kontaminovaný popílek stále je.

## 4.2 VÝBĚR POPÍLKŮ

Na základě výše uvedeného bylo v laboratoři Kloknerova ústavu přistoupeno k ověření vlastností popílků dodávaných běžně na betonárny v ČR. Přehled zkoušených popílků viz níže. Pro zkoušky byl použit cement CEM I 42,5 R Čížkovice a CEM I 42,5 R Mokrá.

### **Přehled zkoušených popílků z elektráren a tepláren v ČR:**

- Hnědouhelný popílek z elektrárny Chvaletice – popílek Chvaletice (ozn. C)
- Hnědouhelný popílek z elektrárny Mělník – popílek Mělník (ozn. M)
- Hnědouhelný popílek z elektrárny Opatovice – popílek Opatovice (ozn. O)
- Hnědouhelný popílek z elektrárny Tušimice – popílek Tušimice (ozn. T)
- Černouhelný popílek z elektrárny Dětmárovice – popílek Dětmárovice (ozn. D)
- Hnědouhelný popílek z elektrárny Počerady – popílek Počerady (ozn. P)
- Hnědouhelný popílek z teplárny Karviná – popílek Karviná (ozn. K)
- Hnědouhelný popílek z teplárny Tábor – popílek Tábor (ozn. Tá)
- Hnědouhelný popílek z elektrárny Třebovice – popílek Třebovice (ozn. Tř)
- Hnědouhelný popílek z elektrárny Rybník – popílek Rybník (ozn. R)\*

\* Popílek Rybník (ozn. R) pochází z polské elektrárny a je příležitostně odebírán betonárnami ve východní části České republiky.

### 4.3 METODY

Pro měření obsahu  $\text{NO}_x$  byly použity dva přístroje:

**1. Ruční pumpa detektoru plynů Dräger accuro + detekční trubičky 5/b**

Pumpa detektoru plynů Dräger accuro umožňuje použití trubiček Dräger Ammoniak 5/b pro detekci amoniaku v rozsahu měření 5 – 70 ppm. Samotné měření probíhá tak, že detekční skleněná trubička je zbavena svých konců a správným koncem zasunuta do vzduchové pumpy. Poté je druhý konec trubičky přiložen ke zkoušené směsi a během 1 minuty je pumpa 10x stlačena. Následně je na stěně trubičky odečtena měřená hodnota ppm.

**2. Elektronický měřicí přístroj Dräger  $\text{NH}_3$  PAC 8000**

Kompaktní detektor plynu PAC 8000 je určen jako osobní přenosné monitorovací zařízení, které detekuje nebezpečné koncentrace  $\text{NH}_3$ . Detektor plynu naměří koncentrace nebezpečného plynu a dle naměřené hodnoty nebo při překročení nastavených limitů vydá zvukový, vizuální a znatelný vibrační alarm.



Obr. 39a, 39b Přístroj Dräger accuro vlevo a přístroj Dräger

$\text{NH}_3$  PAC 8000 [38].

#### 4.4 MĚŘENÍ PŘÍSTROJEM DRÄGER ACCURO

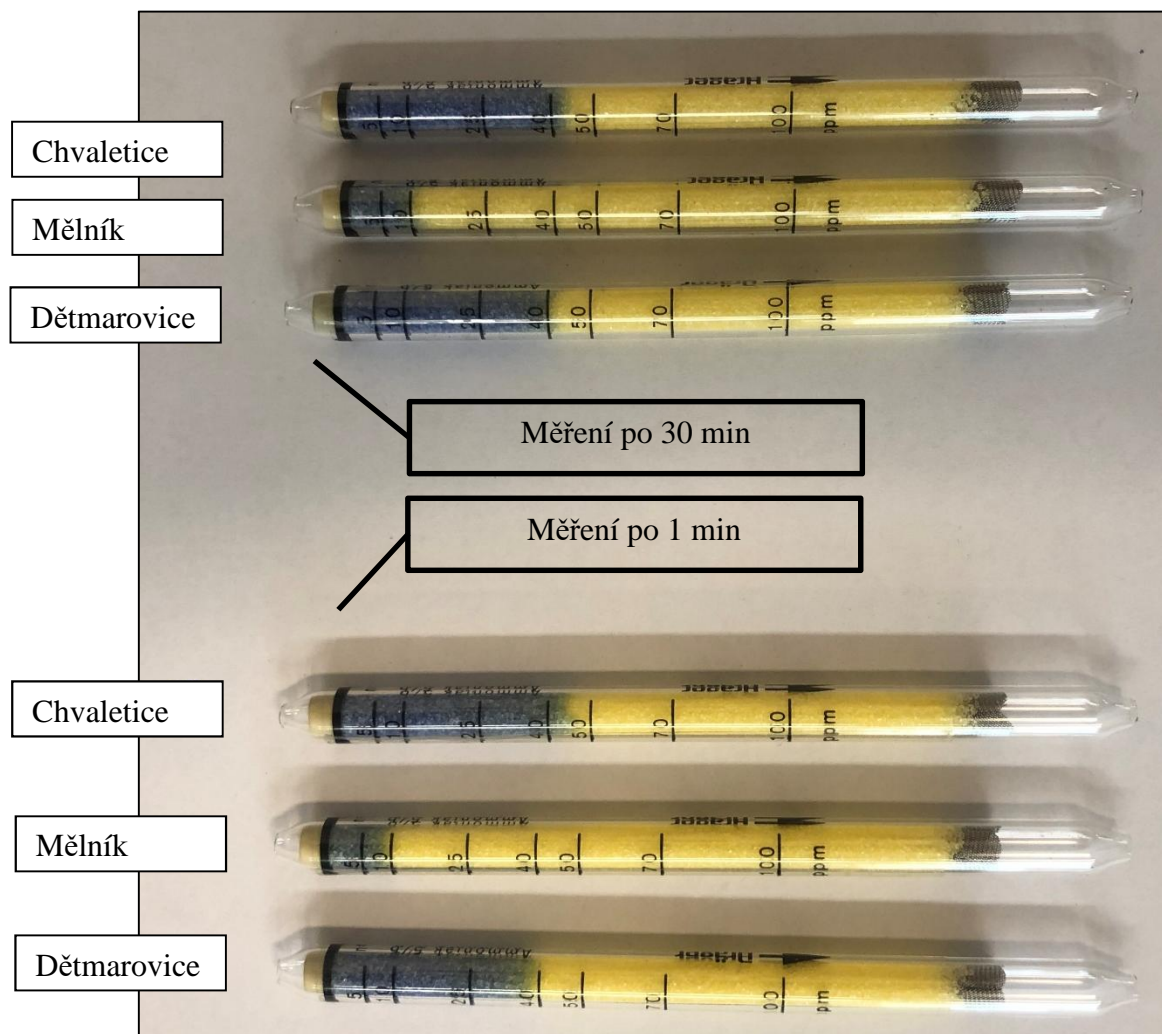
Pro zkoušky byla vytvořena cementopílková směs v poměru 1:1 s vodním součinitelem 0,5. Celkový objem míchání byl 500 ml. Měření uvolněného amoniaku bylo provedeno pomocí Dräger accuro a to v čase 1 minuta po míchání a dále 30 minut po smíchání cementopílkové směsi s vodou. Pro ověření nutnosti aktivace amoniaku pomocí portlanditu z cementu, byla zamíchána i jedna kontrolní čistě popílková směs.

Pro zkoušky byl použit cement CEM I 42,5 R Čížkovice a popílký Dětmárovice, Chvaletice, Mělník a Tušimice. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 22. Na fotografii níže jsou zachycené naměřené výsledky pomocí přístroje Dräger accuro.

Tabulka 22 Naměřené výsledky pro jednotlivé cementopílkové směsi.

<b>Kombinace materiálů Hmotnostní poměr 1:1</b>	<b>Měření provedeno v čase 1 min (ppm)</b>	<b>Měření provedeno v čase 30 min (ppm)</b>
DĚTMAROVICE + CEM	38	40
CHVALETICE + CEM	42	43
MĚLNÍK + CEM	10	10
TUŠIMICE + CEM	10	10
TUŠIMICE	0	0





Obr. 40 Výsledek měření po 1 min a 30 min se odečte z detekční trubičky – modrofialově zbarvená část, stupnice v ppm je přímo na trubičce.

Z provedených měření je patrné, že u všech popílků aktivovaných cementem byl přístrojem Dräger accuro zachycen amoniak. Nejvyšší naměřené hodnoty jsou u popílku Chvaletice a překvapivě i Dětmarovice. U popílku Dětmarovice je výsledek překvapivý, neboť dle dostupných informací by močovina v elektrárně Dětmarovice neměla být používána. Ani u jednoho z popílků nebyla překročena hodnota 50 ppm, a tudíž tak nedošlo k překročení limitů (podrobně viz kapitola 1.4.3). Měření v čase 30 min neprokázalo snížení koncentrace amoniaku. Přístroj Dräger accuro se zejména s ohledem na cenu trubiček (cca 100 Kč/ks) nejvíce jevhodný pro širší uplatnění měření např. při kontrolních zkouškách popílků na betonárnách.

## 4.5 MĚŘENÍ PŘÍSTROJEM DRÄGER PAC 8000 NH<sub>3</sub>

Cílem této kapitoly mimo ověření vlastního měření přístrojem DRÄGER PAC 8000 NH<sub>3</sub> bylo i navrhnout metodiku, která umožní rychlé a operativní ověření obsahu NH<sub>3</sub> přímo na betonárně, a to ve chvíli, kdy přijede cisterna s objednaným popílkem. Metoda musí umožnit popílek rychle zkontrolovat na obsah NH<sub>3</sub> a to před vlastním vpuštěním do popílkového sila betonárny, resp. slouží k rozhodnutí, zda bude či nebude popílek do sila vpuštěn. Za tímto účelem byl navržen zkušební postup k ověření vybraného měřicího přístroje DRÄGER PAC 8000 NH<sub>3</sub>.

Zkušební postup spočívá v měření množství amoniaku uvolněného při smíchání popílku, který je kontaminován amonnými solemi, se zásaditým prostředím (v praxi s cementem). Na obr. 41 je vidět prvotní měření amoniaku ve vzduchu těsně nad míchanou směsí. Nejdříve byl zjišťován vhodný poměr popílku vůči zásaditému prostředí (cementu) a vhodný vodní součinitel zkoušené popílkové suspenze (pasty) tak, aby suspenze byla dobře zpracovatelná a zároveň byla dobře měřitelná hodnota množství amoniaku nad zamíchanou suspenzí. Na základě provedených testů (viz tabulky 23 a 24) byla stejně jako pro měření přístrojem Dräger accuro (viz kapitola 4.4) vybrána hodnota vodního součinitele  $w = 0,5$ . Dále byla ověřována možnost využití jiného zdroje zásaditého prostředí, než je cement s vodou. Cílem bylo zjednodušit metodiku tak, aby byla pro prováděcí pracovníky betonárny co nejméně náročná na čas, pomůcky a přesnost odvažování komponentů. Jako zásadité prostředí byl zkoušen 2 % roztok hydroxidu sodného (NaOH). Testy bylo zjištěno, že při použití 2 % roztoku NaOH dochází oproti použití cementu k rychlejšímu uvolňování amoniaku a zároveň je amoniak uvolňován ve vyšší míře. Bylo tedy zjištěno, že použití roztoku NaOH je pro rychlé analýzy obsahu amoniaku v popítku v praxi velice přínosné. Na základě těchto zjištění byla zpracována metodika, jejíž návrh je zpracován v kapitole 4.5.3 s názvem „*Metodika stanovení amoniaku ve vzorku popílku před vpuštěním do sila betonárny*“.

### 4.5.1 VLIV VODNÍHO SOUČINITELE

Pro zkoušky byl použit popílek Opatovice odebraný z betonárny, u kterého bylo při kontrolním měření podezření na přítomnost NH<sub>3</sub>. Zkoušky byly opět provedeny na cementopopílkové směsi o hmotnostním poměru 1:1 resp. 6:1 a to s vodním součinitelem 0,4; 0,5; 0,75 a 1,0. Celkový objem míchání byl 500 ml. Měření

uvolněného amoniaku bylo provedeno pomocí Dräger PAC 8000 NH<sub>3</sub> a to v čase 5, 30, 60 a 65 min po smíchání cementopopílkové směsi s vodou. Pro zkoušky byl použit cement CEM I 42,5 R Mokrý a popílek Opatovice. Přístroj byl ponechán v nádobě s cementopopílkovou směsí po dobu 30 s, viz obrázek 41.

Tabulka 23 Naměřené výsledky pro jednotlivé cementopopílkové směsi.

podíl popílku OPTATOVICE dodávka 16.3.2020 vůči cementu CEM I 42,5 R Mokrý v %	poměr dílů cement / popílek	čas měření v min po zamíchání, ponecháno bez pohybu				čas měření v min po zamíchání, před měřením mícháno	NH <sub>3</sub> rozpoznatelný čichem
		5	15	30	60		
		naměřené hodnoty v PPM					
50%	1 / 1	76	78	96	92	105	ano
33%	2 / 1	45	57	51	41	40	ano
25%	3 / 1	42	39	30	10	13	ano
20%	4 / 1	36	34	23	-	-	ano
17%	5 / 1	23	25	15	-	-	ano
14%	6 / 1	21	18	10	-	-	ano
0%	1 / 0	0	0	0	0	0	ne

Z výsledků měření je patrné, že vyšší hodnoty amoniaku jsou naměřeny pro cementopopílkové směsi s poměrem 1:1 a dále, že nejvyšší hodnoty jsou naměřeny pro vodní součinitel 0,4 a poté s rostoucím vodním součinitelem postupně klesají. Doba měření má na výsledek rovněž vliv. Zde se potvrdilo, že amoniak ve směsi je detekován jak v krátké době po zamíchání, tak i ve směsi, která se nechala 60 minut odstát. Přístroj DRÄGER PAC 8000 NH<sub>3</sub> i přes vyšší pořizovací cenu (cca 20 000 Kč bez DPH) je dostatečně přesný a rychlý pro opakované používání. Navíc lze v přístroji nastavit limity, u kterých dojde při jejich překročení ke spuštění zvukového signálu a tím upozorní obsluhu.



Obr. 41 Měření amoniaku ve vzduchu těsně nad míchanou směsí pomocí analyzátoru DRÄGER PAC 8000 NH<sub>3</sub>.

#### 4.5.2 ZKOUŠKA POUŽITÍ ROZTOKU NaOH

Pro zkoušky byl použit opět popílek Opatovice a dále popílek Dětmárovice, Třebovice, Karviná a Přívoz. Všechny popílky byly odebrány na betonárnách. Poměr roztoku NaOH k popílku byl 0,5, tzn. 300 g popílku bylo smícháno se 150 g roztoku NaOH. Roztok NaOH byl připraven smísením 100 ml vody s 2 g práškového NaOH. Postup měření byl obdobný postupu popsanému v kapitole 4.5.1, tzn.:

1. smíchání popílku s roztokem NaOH
2. 30 s ruční intenzivní promíchávání v nádobě, poté uzavření nádoby
3. 30 s byla suspenze ponechána v uzavřené nádobě, viz obr. 41
4. měření přítomnosti amoniaku pomocí analyzátoru DRÄGER PAC 8000 NH<sub>3</sub> po dobu 30 s (tedy 60 s od smíchání popílku s roztokem NaOH)

Doplňkově bylo navíc měření provedeno ještě po 5 minutách a dále minimálně po 15 minutách od smíchání popílku s roztokem NaOH.

Tabulka 24 Naměřené výsledky pro popílkové směsi smíchané s roztokem NaOH.

Elektrárna / Teplárna	Datum odběru	Analyza popílků VUMO Obsah $\text{NH}_4^+$ [mg/kg]	Množství $\text{NH}_3$ po 1 minutě [ppm]	Množství $\text{NH}_3$ po 5 minutách [ppm]	Čas smíchání [hh:mm]	Čas posledního měření [hh:mm]	Doba posledního měření od smíchání [min]	Množství $\text{NH}_3$ posledního měření [ppm]
Opatovice	7.5.2020	13,25	0	0	12:48	13:22	34	5
Opatovice	12.5.2020	38,61	8	15	12:54	13:23	29	15
Opatovice	1.5.2020	20,94	5	7	13:00	13:26	26	8
Opatovice	26.5.2020	22,31	6	5	13:06	13:26	20	6
Opatovice	21.4.2020	43,66	16	22	13:13	13:42	29	23
Dětmarovice	26.3.2020	32,99	10	12	13:20	13:43	23	13
Třebovice	24.3.2020	304,51	230	-	13:35	14:08	33	296
Karviná	26.3.2020	32,02	11	13	13:39	13:59	20	10
Karviná	8.4.2020	23,92	5	5	13:45	14:02	17	5
Přivoz	8.6.2020	9,92	0	0	13:55	14:10	15	0

Z provedených měření je patrné, že při použití 2 % roztoku NaOH smíchaného s popílkem dochází, oproti použití cementu, k rychlejšímu uvolňování amoniaku a zároveň je amoniak uvolňován ve vyšší míře. Tímto testem bylo ověřeno, že použití

roztoku NaOH by mohlo být velice přínosné pro rychlé analýzy amoniaku v popílku v praxi na betonárně. Výsledky měření byly rovněž potvrzeny kontrolou popílku v laboratoři VUMO na obsah  $\text{NH}_4^+$ , což umožnilo prokázání dostatečné přesnosti přístroje DRÄGER PAC 8000  $\text{NH}_3$  pro plánované kontroly popílků na betonárně. Limitní hodnota pro rozhodnutí zda může být popílek vpuštěn do sila betonárny, zatím nebyla stanovena a je předmětem dalších testů.

#### **4.5.3 METODIKA STANOVENÍ OBSAHU AMONIAKU VE VZORKU POPÍLKU PŘED VPUŠTĚNÍM DO SILA BETONÁRNY**

Cílem metodiky je jednoduchou, rychlou a relativně levnou formou stanovit množství amoniaku ve vzorku popílku, který bude odebrán z cisterny na betonárně jako vstupní kontrola pro rozhodnutí, zda bude popílek vpuštěn do sila betonárny. S tím, že rozsah měření s dostatečnou přesností musí dosahovat hodnot 0-200 ppm  $\text{NH}_3$ .

##### **Navržený postup zkoušení:**

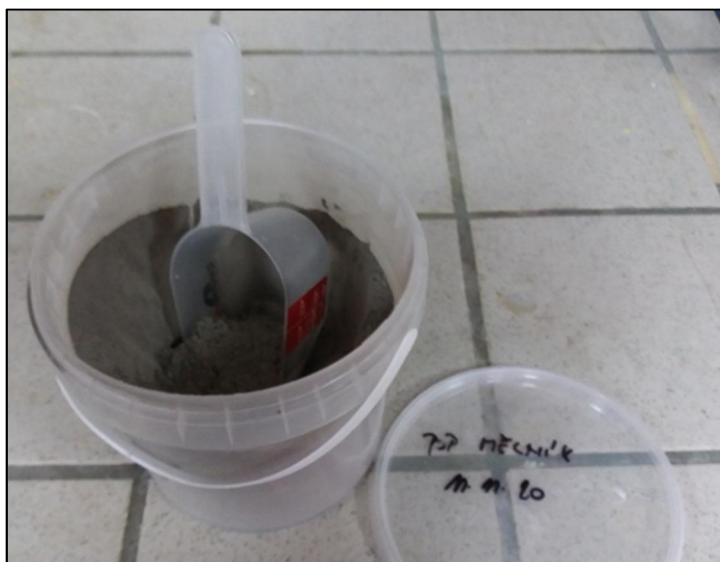
1. Provede se kontrola dokumentace k dodávce popílku, ze které se na bok odběrového kyblíku (určen k další archivaci) nesmazatelnou fixou napíše informace o lokalitě popílku (např. Mělník) s datem dodání na betonárnu a číslem dodacího listu.
2. Odběrový kyblík se naplní popílkem z cisterny např. odběr plnicím horním otvorem, výpustným ventilem nebo jiným vhodným způsobem (dle typu cisterny). Hmotnost vzorku je cca 5 kg. Kyblík těsně uzavřen víkem se ihned po zkoušce ukládá do archivu.
3. Do zkušební lahvičky (viz obrázek 42) se po vyznačenou rysku 150 ml nalije 2% roztok NaOH (hydroxid sodný s vodou). Pozn.: roztok se připraví smícháním 100 ml destilované vody s 2 g práškového/granulovaného NaOH.
4. Z odběrového kyblíku se normovou odměrkou (viz obrázek 43) odeberou tři zarovnané odměrky popílku, který se vloží do zkušební lahvičky s odměřeným zásaditým roztokem (viz obrázek 41). Rovněž je možné použít odměření popílku vážením. Na 150 ml zásaditého roztoku se odváží do zkušební lahvičky 300 g popílku.

5. Zkušební lahvička se uzavře šroubovacím víčkem a následně se 60 sekund intenzivně protřepává.
6. Ze zkušební lahvičky odstraníme víčko a k hrdlu přiložíme zapnutý přístroj DRAGER PAC 8000 NH<sub>3</sub>. Senzor přístroje je ve středu hrdla směrem dolů (viz obrázek 44).
7. Měření probíhá po dobu 30 sekund. Ihned po uplynutí doby odečteme z displeje přístroje naměřenou hodnotu, kterou zapíšeme do formuláře. Vzor navrženého formuláře viz tabulka 25.



Obr. 42 Zkušební lahvička - vlevo, objem 500 ml, průměr 70 mm, výška 170 mm, průměr hrdla 35 mm, vpravo připravený 2 % roztok NaOH, pH 12,8.





Obr. 43 Odběrový kyblík s popílkiem a normová odměrka, kyblík by měl obsahovat alespoň 5 kg popílku.



Obr. 44 Snímač přístroje DRAGER PAC 8000 NH3 - přístroj před zahájením měření - umístěn uprostřed hrdla zkušební lahvičky, musí být čidlem dolů, zde ilustrace displeje. Vlevo stopky pro měření 30 s.

Tabulka 25 Návrh záznamu o kontrolním měření amoniaku v popílku před vpuštěním do síla betonárny.

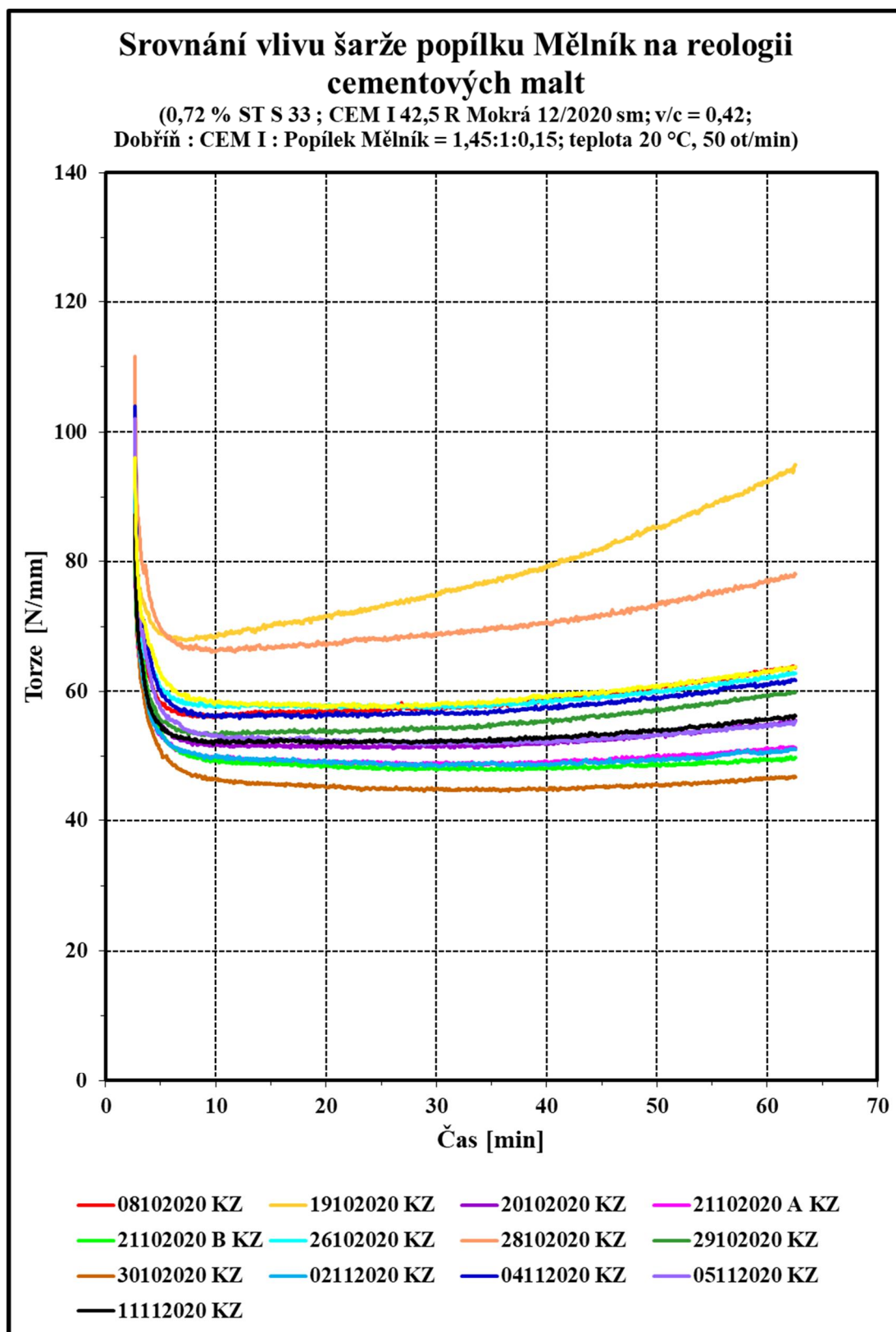
<b>Datum odběru</b>	<b>Označení popílku dle DL</b>	<b>Číslo dodacího listu (DL)</b>	<b>Výsledek měření v PPM</b>	<b>Popílek je vpuštěn do síla ANO / NE</b>	<b>Podpis pracovníka</b>

#### 4.5.4 SLEDOVÁNÍ POPÍLKU MĚLNÍK DLE METODIKY POPSANÉ V 4.5.3

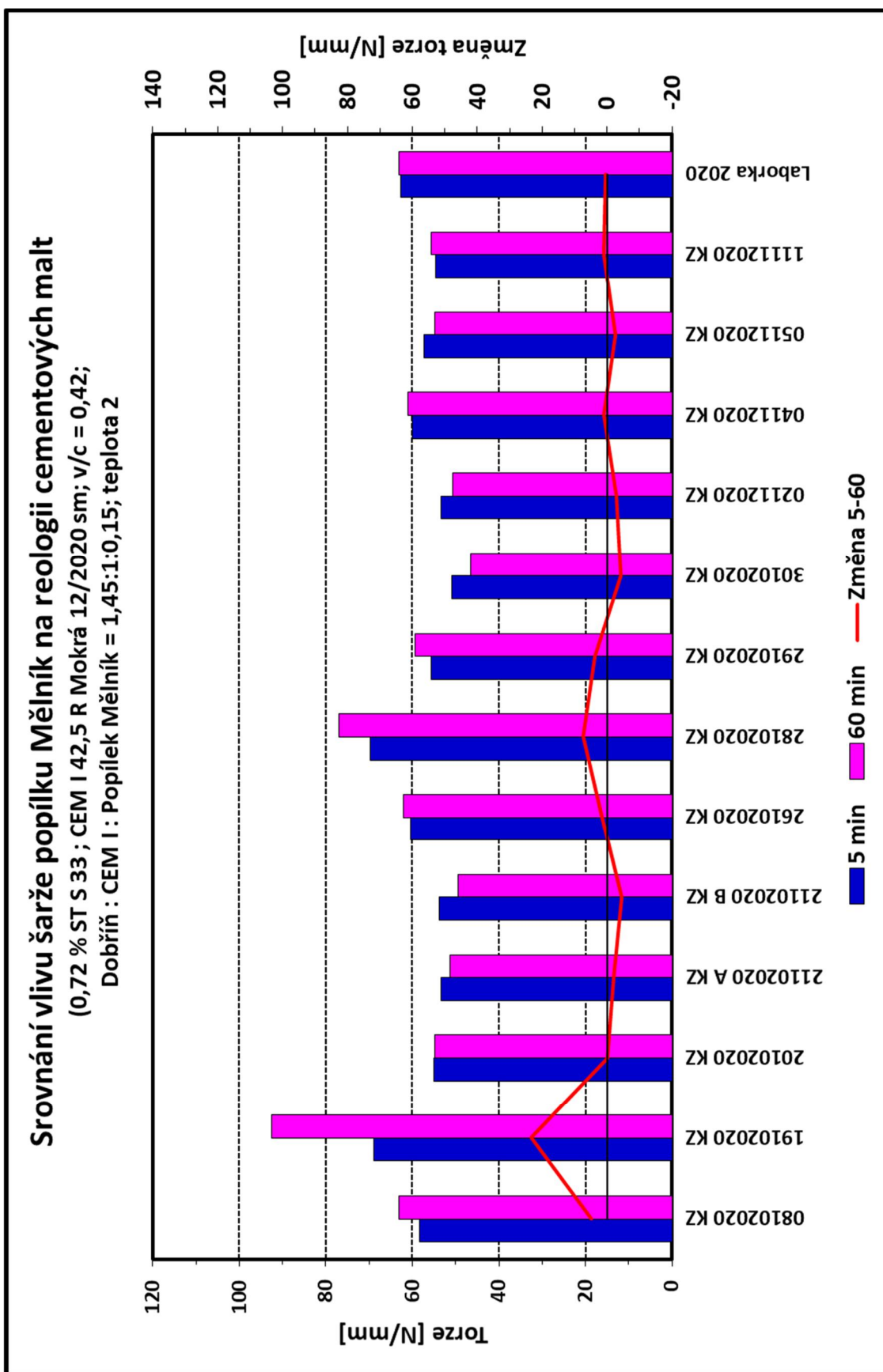
Dle metodiky popsané v kapitole 4.5.3 bylo prováděno rychlé a relativně levné měření množství amoniaku ve vzorku popílku, který byl odebrán z cisterny na betonárně jako vstupní kontrola pro rozhodnutí, zda bude popílek vpuštěn do síla betonárny. Měření bylo prováděno na popílku Mělník, který je běžně dodáván na betonárny v lokalitě Praha. Odběr popílků byl realizován v říjnu a listopadu 2020. V rámci kontroly odebraných popílků byla navíc provedena kontrola ztráty žíháním a dále kontrola reologických vlastností pomocí reometru. Složení cementopopílkové malty pro reologické zkoušky je následující: CEM I 42,5 R Mokrý : popílek Mělník : voda = 1,45 : 1 : 0,15. Dávka přísady S 33 byla 0,72 % z hmotnosti cementu. Teplota míchání 20 °C, rychlost 50 otáček/minuta.

Tabulka 26 Průběžná kontrola popílku Mělník, obsah NH<sub>3</sub>, ztráta žíháním a odpor proti míchání.

Šarže popílku	Zdroj	Stanovená hodnota NH <sub>3</sub> (ppm)	Ztráta žíháním hm. (%)	Torze = odpor vůči míchání [N/mm] v čase od přidání vody		Změna 5-60
				5 min	60 min	
08.10.2020	Mělník	0	0,5	58,3	63,2	4,9
19.10.2020	Mělník	0	1,0	69,0	92,5	23,5
20.10.2020	Mělník	0	0,4	55,0	54,9	-0,1
21.10.2020(A)	Mělník	0	0,8	53,3	51,2	-2,0
21.10.2020(B)	Mělník	0	0,5	53,8	49,5	-4,4
23.10.2020	Mělník	0	0,9	60,5	62,1	1,7
26.10.2020	Mělník	0	0,7	69,7	76,9	7,3
29.10.2020	Mělník	0	0,4	55,6	59,3	3,8
30.10.2020	Mělník	0	0,6	50,9	46,5	-4,3
02.11.2020	Mělník	0	0,6	53,5	50,7	-2,8
04.11.2020	Mělník	0	0,5	60,0	61,1	1,1
05.11.2020	Mělník	0	0,5	57,3	54,7	-2,6
11.11.2020	Mělník	0	0,2	54,7	55,7	1,0



Obr. 45 Reologické vlastnosti popílku Mělník odebíraného v průběhu října a listopadu 2020.



Obr. 46 Reologické vlastnosti – změna torze (odporu míchání) v čase 5min a 60 min popílku Mělník odebíraného v průběhu října a listopadu 2020.

Z provedených měření pomocí metodiky uvedené v kapitole 4.5.3 je patrné, že u žádného kontrolovaného vzorku popílku Mělník z období říjen až listopad 2020 nedošlo k zachycení obsahu  $\text{NH}_3$ . Z provedených měření ztráty žháním lze konstatovat, že u žádného vzorku nebyl překročen požadavek normy ČSN EN 450-1, který stanovuje maximální dovolenou hodnotu u jednotlivého vzorku 2 %. Z grafu na obrázku 45 je patrné odlišné reologické chování cementopopílkové malty u popílků z odběru 19.10.2020 a dále z odběru 28.10.2020. Ostatní sledované vzorky popílku mají přibližně stejné reologické chování. Z pohledu technologa/zákazníka betonárny se pravděpodobně betony zejména s vyšším obsahem popílku z dodávek 19.10. a 28.10.2020 budou jevit jako více vodonáročné resp. jako betony se budou projevovat rychlejší ztrátou konzistence v čase. S ohledem podzimní období, tzn. nižší teploty betonů a prostředí však tato změna nemusela být postřehnutelná. Měření bylo v praxi prokázáno zejména rychlé a operativní použití metody navržené v kapitole 4.5.3 u zaškolené obsluhy betonárny.

## 4.6 ZHODNOCENÍ PROVEDENÝCH MĚŘENÍ

V laboratoři Kloknerova ústavu bylo provedeno několik experimentálních ověření uvolněného amoniaku z cementopopílkových směsí. Zkoumány byly elektrárenské a teplárenské popílky běžně dodávané na betonárny v ČR: Dětmárovice, Chvaletice, Mělník, Opatovice, Tušimice, Počerady, Karviná, Tábor, Třebovice a Rybník. S výjimkou popílku Dětmárovice (černouhelný popílek) jsou zbylé popílky hnědouhelné. Všechny popílky jsou z elektráren či tepláren na území České republiky, výjimkou je popílek z elektrárny Rybník v Polsku.

Z provedených měření je patrné, že u všech popílků byl přístroji zachycen amoniak. Nejvyšší naměřené hodnoty jsou u popílku Opatovice (opakovaně) a popílku Třebovice. Překvapivě vysoká hodnota byla naměřena i u popílku Dětmárovice. U popílku Dětmárovice je výsledek překvapivý, neboť dle dostupných informací by močovina v elektrárně Dětmárovice neměla být používána. U popílků Opatovice a Třebovice byla překročena hodnota 50 ppt, a tudíž došlo k překročení limitů (viz kapitola 1.3.4). Z provedených měření je patrný vliv alkalického prostředí na výsledek zkoušky, kdy poměr cementu ku popílku 1:1 pro stejný popílek vedl k naměření významně vyšších hodnot než poměr 6:1. Rovněž se ukazuje důležitost nastavení správného vodního součinitele, tím se z provedených měření zdá být vodní (pojivový)

součinitel 0,5. Při hodnotě 0,4 byla směs již obtížně míchatelná a rychle tuhla, při vyšším vodním součiniteli naopak došlo k naměření nižších hodnot, což může být s ohledem na citlivost přístrojů nevýhoda při praktickém provádění měření na betonárnách. S ohledem na důležitost hygienických a pobytových limitů je nutné v měřeních dále pokračovat a to i na betonech přímo v provozu betonárny. Proto bylo cílem nalézt metodu pro rychlé kontrolní měření popílků na betonárnách před jejich naplněním do sil. Jak by mohl postup vypadat je podrobně popsáno v kapitole 4.5.3. Zde navržená metoda nabízí rychlé ověření popílku na obsah amoniaku a to pomocí aktivace 2% roztokem hydroxidu sodného. Kromě metody je však nezbytně nutné nalézt kritéria pro hodnocení těchto popílků ve vztahu k betonům z nich vyráběným.

## E ZÁVĚR

Cílem disertační práce byla optimalizace a ověření vlastností betonu s vysokým obsahem popílku (HVFAC) jak v laboratorních, tak v provozních podmínkách, které by umožnily jeho uvedení na trh v ČR. Rovněž bylo cílem zahájit sledování popílků z denitrifikace a stanovení obsahu  $\text{NH}_3$  v těchto popílcích.

Limitním optimalizovaným množstvím v navrhovaných betonech s vysokým obsahem popílku byla minimálně 30 % hmotnostní náhrada cementu popílkem. Výroba HVFAC požadovaných vlastností byla umožněna díky použitím speciálně vyvinutých superplastifikačních přísad pro tento typ betonu. Za účelem posouzení chování a vlastností betonu s vysokým obsahem popílku byly jeho vlastnosti porovnávány s vlastnostmi betonů referenčních bez přídavku popílku nebo s určitou náhradou cementu popílkem (do 30 % hm.) navržených ve smyslu ČSN EN 206+A1 pro pevnostní třídy C 12/15 – C 25/30 a vybraný stupeň vlivu prostředí XC1-4.

**Návrh receptury betonů s vysokým obsahem popílku se opírá o následující doporučení, která vzešla také z řešení této práce:**

1. Popílek z elektrárny Dětmorovice byl mezi dalšími vytypovanými popílků (z elektráren Ledvice, Chvaletice, Mělník a z teplárny Opatovice a Plzeň) zejména na základě jeho relativně nízké vodonáročnosti vybrán jako nejvhodnější popílek pro výrobu HVFAC, zatím pro oblast Moravy. Za použití popílku Dětmorovice byly vypracovány receptury HVFAC pro betonárnu Zapa Beton v Hulíně.

Použití jiných popílků se nevylučuje, nicméně docílení co nejvyšší ekonomické efektivity (co nejvyšší náhrady cementu popílkem) bude omezené. Samozřejmě je možné, že lokálně existují i popílků do betonu mající srovnatelné vlastnosti jako popílek Dětmorovice (např. popílek z teplárny Plzeň).

Pro bezproblémovou výrobu betonů s vysokým obsahem popílku je ale nutno zajistit, aby vybraný popílek pocházel vždy ze stejného zdroje daného výrobce. Při zahájení výroby popílkových betonů je vhodné ve spolupráci s vlastní nebo s externí laboratoří sledovat vytypované vlastnosti na betonárnu dodaných



šarží popílku (zkouška vodonáročnosti, měrná hmotnost, zrnitost) a vytvořit si tak dostatečnou databázi výsledků za účelem sledování jakosti popílku.

2. Betony s vysokým obsahem popílku, zvláště pro pevnostní třídy C 20/25 a vyšší, jsou díky nízkému obsahu záměsové vody viskóznější v porovnání s běžnými betony. Aby byla zajištěna jejich dobrá pohyblivost, je třeba při návrhu receptury optimalizovat množství cementového tmelu (min  $330 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ ), obsah vody z hlediska zpracovatelnosti (min  $160 \text{ l}/\text{m}^3$ ), celkový obsah pojiva (max. obsah cementu + popílku  $400 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) a obsah popílku (max.  $180 \text{ kg}/\text{m}^3$ ). Při výrobě popílkového betonu na betonárně, kde je konzistence betonu řízena za pomoci konzistoměru pracujícího na bázi sledování zatížení motoru míchačky, je třeba si uvědomit, že díky vyšší viskozitě popílkových betonů jsou při jinak stejné konzistenci (hodnocena např. zkouškou sednutím), jakou by vykazaly běžné betony stejné pevnostní třídy, konzistoměrem indikovány vyšší hodnoty, tj. beton se jeví jako hustší. Popílkové betony jsou více citlivé na kolísání materiálových vlastností všech surovin v betonu, zejména vlhkosti kameniva, než běžné betony.

Srovnání vlastností vybraných receptur betonů s vysokým obsahem popílku a referenčních betonů pro pevnostní třídy C 16/20, C 20/25, C 25/30 podle ČSN EN 206+A1 je uvedeno v tabulkách 27 a 28. Budeme-li u betonů s vysokým obsahem popílku hodnotit pevnosti ve stáří delším jak 28 dní, vychází pevnosti HVFAC vyrobeného za srovnatelných podmínek vždy vyšší, než jak je tomu u referenčního betonu navrženého na stejnou normovou pevnostní třídu. Je-li požadované pevnostní třídy v normovém stáří dosaženo „bez rezervy“, skýtají popílkové betony pojistku, že ve stáří 56 dní již budou pevnosti plně vyhovující pro předepsanou pevnostní třídu. Potenciál nárůstu dlouhodobých pevností betonů s vysokým obsahem popílku je jednou z jejich velkých předností.

Významným argumentem proti použití betonu s vysokým obsahem popílku je pomalejší nárůst pevností při nízkých teplotách v důsledku nízkého obsahu cementu, a díky tomu pomalému průběhu hydratačního procesu. Tento fakt stále platí, proto použití popílkových betonů je méně vhodné v zimním období. Vhodným opatřením proti vlivu nízkých teplot se však ukazuje být použití urychlovací přísady, která při

správném dávkování zajistí v počátečním stádiu hydratace obdobný nárůst pevností, jako mají betony bez popílku. Dalším doporučeným opatřením pro zimní období je samozřejmě také snížení náhrady cementu popílkiem.

Z pohledu provádění masivních konstrukcí se ovšem pomalejší vývin hydratačního tepla HVFAC jeví naopak jako výhoda umožňující výrobu betonu s nízkým hydratačním teplem i bez speciálního cementu, jak také jednoznačně prokázaly výsledky měření vývoje teplot během hydratace v zaizolovaných formách reprezentující vývoj teplot z 1 m<sup>3</sup> betonu.

Z tabulek 27 a 28 dále plyne, že popílkové betony mají stejnou odolnost proti působení tlakové vody (vodotěsnost) jako betony referenční (maximální hloubky průsaku jsou u popílkových betonů dokonce nižší, až na jednu výjimku – „ulitá“ receptura HF6-I – než vykazuje srovnatelný referenční beton). Odolnost proti karbonataci všech navržených betonů je velmi podobná, v případě srovnání absolutních hodnot se může u popílkových betonů jevit horší, nicméně absolutní naměřené hodnoty jsou velmi nízké a rozdíly se pohybují v rozsahu nejistoty měření.

Popílkové betony nepředstavují riziko ani z hlediska objemových změn (smrštění), u srovnatelných pevnostních tříd mají popílkové betony buď srovnatelné nebo dokonce nižší smrštění než referenční betony a to díky nižšímu množství cementu a záměsové vody v receptuře. Z důvodu sníženého podílu portlandského slínku na úkor zvýšeného podílu silikátové fáze z popílku jsou HVFAC vhodné do kyselého agresivního prostředí. Tento fakt je obecně známý, odolnost navržených HVFAC v chemicky agresivním prostředí v rámci řešení práce nebyla z důvodu časové náročnosti zkoušek ověřována.

Tabulka 27 Porovnání vlastností betonů s vysokým obsahem popílku (šedé sloupce) a referenčního betonu pro třídu C 16/20.

<b>C 16/20</b>		<b>CHP 460</b>	<b>B20-460</b>	<b>B20-HF6</b>
Místo výroby	1 m <sup>3</sup>	Hulín II	LABO	LABO
CEM II/A-LL 42,5 R Hranice	kg	248	206	170
Popílek Dětmárovice	kg	60	110	160
Kamenivo Zapa Hulín	kg	1827	1794	1832
Příspěvek		<b>Plast 460</b>	<b>Plast 460</b>	<b>Optima 316 (HF-6)</b>
Dávka přísady	kg	2,48	2,06	2,31
Skutečná voda účinná	kg	159	177	155
Objem cementového tmelu	dm <sup>3</sup>	339	354	363
Pevnost v tlaku 1 den	MPa	7,7	2,5	7,5
7 dní	MPa	18,5	17,6	19,0
28 dní	MPa	<b>25,7</b>	<b>23,1</b>	<b>24,2</b>
56 dní	MPa	30,6	30,6	33,8
Poměr 1 den/28 dní	%	30	10,8	31,0
K-hodnota		0,4	0,4	1,0
Ekvivalentní v/c		0,57	0,76	0,69
Dosažená třída betonu		<b>C 16/20</b>	<b>C 16/20*</b>	<b>C 16/20*</b>
SVP XC		<b>XC2</b>	<b>X0</b>	<b>X0</b>
Sednutí ČB – 5 min	mm	210	170	170
Hloubka průsaku tlakovou vodou	mm	31	24	20
Hloubka karbonatace (zrychlená metoda)	mm	2,0	3,0	4,0
Zdánlivá pórovitost	%	11,2	9,4	6,5
Smrštění 91 dní	mm/m	-0,534	-0,591	-0,433
Statický mod. pružnosti v tlaku-trámec	GPa	24,6	--	--
Maximální teplota při hydrataci	°C	45,9	neměřeno	33,0
Cena (pojivo+příspěvek)	Kč	452,0	393,50	381,22
Poznámka			*Pevnostní třída po 28 dnech bez rezervy, zcela vyhovující ve stáří 56 dní	Pevnostní třída po 28 dnech bez rezervy, zcela vyhovující ve stáří 56 dní

Tabulka 28 Porovnání vlastností betonů s vysokým obsahem popílku (šedé sloupce) a referenčního betonu pro třídu C 20/25 a C 25/30.

<b>C 20/25, C 25/30</b>		<b>HF6 II</b>	<b>O 224</b>	<b>REF-2</b>	<b>HF31</b>	<b>B30-HF6</b>
Místo výroby	1m <sup>3</sup>	Hulín 2	Hulín 2	Hulín 1	Hulín 1	LAB
CEM II/A-LL 42,5 R Hranice	kg	210	300	300	210	210
Popílek Dětmarovice	kg	150	0	0	165	150
Kamenivo Zapa Hulín	kg	1821	1865	1821	1790	1807
Přísada		<b>HF 6</b>	<b>Optima 224</b>	<b>Optima 224</b>	<b>HF-6</b>	<b>HF-6</b>
Dávka přísady	kg	3,24	2,9	2,85	3,34	3,60
Skutečná voda účinná	kg	149	174	169	148	152
Objem cementového tmelu	dm <sup>3</sup>	334	320	336	364	361
Pevnost v tlaku 1 den	MPa	8,0	12,2	--	--	8,1
2 dny		--	--	19,3	16,6	--
7 dní	MPa	19,5	21,5	31,9	29,5	23,9
28 dní	MPa	<b>29,6</b>	<b>28,2</b>	<b>35,5</b>	<b>33,0</b>	<b>33,2</b>
56 dní	MPa	36,0	33,7	37,9	50,8	37,6
Poměr 1 d/28 d	%	27,0	43,3	--	--	24,4
Poměr 2 d/28 d		--	--	54	50	--
K-hodnota		1,0	--	--	1,0	1,0
Ekvivalentní v/c		0,53	0,49	0,56	0,53	0,54
Dosažená třída betonu		<b>C 20/25*</b>	<b>C 20/25*</b>	<b>C 25/30</b>	<b>C 25/30*</b>	<b>C 25/30*</b>
SVP XC		<b>XC3</b>	<b>XC3</b>	<b>XC2</b>	<b>XC3</b>	<b>XC3</b>
Sednutí ČB – 5 min	mm	265	220	175	210	230
Hloubka průsaku tlakovou vodou	mm	17	19	--	--	--
Hloubka karbonatace (zrychlená metoda)	mm	--	2,0	--	--	--
Zdánlivá pórovitost	%	--	9,7	--	--	--
Smrštění 91 dní	mm/ m	--	-0,520	--	--	-0,519
Statický m. pružnosti v tlaku-trámec	GPa	25,3	25,0	--	--	--
Maximální teplota při hydrataci	°C	--	48,5	--	--	37,3
Cena (pojivo+přísada)	Kč	466,86	558,30	556,95	474,01	476,4
Poznámka		*Pevnostní třída po 28 dnech bez rezervy, zcela vyhovující ve stáří 56 dní			*Pevnostní třída po 28 dnech bez rezervy, zcela vyhovující ve stáří 56 dní	

Betony s vysokým obsahem popílku představují výhodnější ekonomické řešení ve srovnání s běžnými betony. Nejvyšších materiálových úspor lze dosáhnout zejména u betonů pro pevnostní třídu C 20/25. Obvyklé úspory při použití HVFAC by se měly pohybovat nejčastěji mezi 5 a 10 % všech materiálových nákladů. Ekologický přínos HVFAC je jednoznačný, s nadsázkou lze tvrdit, že popílkové betony jsou jedním z mála výrobků na trhu, kde se ekologické řešení neprojeví ve zdražení, ale naopak ve zlevnění výrobku.

V laboratoři Kloknerova ústavu bylo provedeno několik experimentálních ověření uvolněného amoniaku z cementopopílkových směsí. Zkoumány byly popílků běžně dodávané na betonárny v ČR: Dětmárovice, Chvaletice, Mělník, Opatovice a Tušimice. S výjimkou popílku Dětmárovice (černouhelný popílek) jsou zbylé popílků hnědouhelné. Z provedených měření je patrné, že u všech popílků byl přístroji zachycen amoniak. Nejvyšší naměřené hodnoty jsou u popílku Opatovice a překvapivě vysoká hodnota byla i u popílku Dětmárovice. U popílku Dětmárovice je výsledek překvapivý, protože dle dostupných informací by močovina v elektrárně Dětmárovice neměla být používána. U popílku Opatovice byla překročena hodnota 50 ppt, a tudíž došlo k překročení limitů (viz kapitola 1.3.4). Z provedených měření je patrný vliv alkalického prostředí na výsledek zkoušky, kdy poměr cementu ku popílku 1:1 pro stejný popílek, vedl k naměření významně vyšších hodnot než poměr 6:1.

Rovněž se ukazuje důležitost nastavení správného vodního součinitele, tím se z provedených měření zdá být vodní (pojivový) součinitel 0,5. Při hodnotě 0,4 byla již směs obtížně míchatelná a rychle tuhla, při vyšším vodním součiniteli naopak došlo k naměření nižších hodnot, což může být s ohledem na citlivost přístrojů nevýhoda při praktickém provádění měření na betonárnách. S ohledem na důležitost hygienických a pobytových limitů je nutné v měřeních dále pokračovat a to i na betonech přímo v provozu betonárny. Cílem bude nalézt metodu pro rychlé kontrolní měření popílků na betonárnách před jejich naplněním do sil. Kromě metody je nutné nalézt kritéria pro hodnocení těchto popílků ve vztahu ke z nich vyráběným betonům. Proto bylo cílem nalézt metodu pro rychlé kontrolní měření popílků na betonárnách před jejich naplněním do sil. Jak by mohl postup vypadat je podrobně popsáno v kapitole 4.5.3. Zde navržená metoda nabízí rychlé ověření popílku na obsah amoniaku a to pomocí

aktivace 2% roztokem hydroxidu sodného. Kromě metody je však nezbytně nutné nalézt kritéria pro hodnocení těchto popílků ve vztahu k z nich vyráběným betonům.

Rozšíření výroby a dodávek HVFAC, jako do jisté míry nového materiálu, naráží v praxi na omezení daná stávajícími normovými předpisy. Hodnotíme-li složení betonu s vysokým obsahem popílku (HVFAC) pro použití v agresivním prostředí SVP XC21-4, XD1-2 a XA1-3 pouze s použitím k-hodnot obecně předepsaných v ČSN EN 206+A1, získáme výsledky, které jsou v rozporu s požadavky normy a neumožnily by dodávat tyto betony pro výše uvedené SVP na trh. Jedná se o kalkulovanou hodnotu maximálního vodního součinitele (w/c) a kalkulovaný minimální obsahu cementu v betonu (viz tabulka 25 pro SVP XC 1-4).

**Jak bylo v práci ukázáno, lze prostřednictvím nově koncipovaných chemických přísad navrhnout, vyrobit i provozně ověřit betony s vysokou náhradou cementu popílkem. Vlastnosti a chování betonu s vysokým obsahem popílku je sice v některých případech specifické (vyšší viskozita čerstvého betonu, nižší robustnost), každopádně při pečlivém dodržování doporučených zásad pro výrobu a ošetřování, je jeho výroba v praxi realizovatelná a v normovém stáří (a v delším časovém horizontu) dosahuje HVFAC stejných nebo i lepších parametrů (pevnosti, trvanlivosti, objemových změn) než beton vyráběný podle požadavků ČSN EN 206+A1, a to z materiálového hlediska při zajímavé ekonomické úspoře a ekologicky šetrnému přístupu k přírodním zdrojům.**

Novou výzvou pro HVFAC betony a technology v ČR se však stane bezpečné využití denitrifikovaných popílků. Z provedených měření je již nyní patrné, že např. u popílku Opatovice A Třebovice v konkrétní dodávce došlo k naměření vysokých hodnot uvolněného amoniaku, což představuje riziko v používání takovýchto popílků do betonu jak z pohledu pracovního prostředí na betonárně (uvolňující se amoniak přímo v míchačce), tak i z pohledu jeho ukládání a v neposlední řadě z pohledu hygienických limitů pro pobytové prostory.

**Pro odběratele popílku připadají v úvahu následující logické kroky k umožnění bezpečné a ekonomické výroby z popílků s redukcí NOx:**

- Monitoring pro stanovení skutečných hodnot amonných iontů v popílcích na vstupu – nalezení metodiky provádění.
- Identifikování extrémních hodnot s aplikací na provozování technologie SNCR spojené s pracovní kázní – měřící přístroj přímo v mísícím jádru betonárny.
- Minimalizovat expedování popílků nad hodnoty 100 ppm  $\text{NH}_4^+$  ke koncovým odběratelům a provádění analýz při nakládkách materiálu – mobilní mísící přístroj.
- Metodika výpočtových modelů pro technologie betonáren s ohledem na zajištění bezpečného pracovního prostředí zpřesnit na základě souborů měření.
- Experimentální plnohodnotné testy spojené s průkazními zkouškami nezávadnosti koncových výrobků – proměnlivé receptury betonu dle aktuální „kontaminace“ popílku.
- Vývoj vhodných přísad/y pro tento typ betonu, pravděpodobně na bázi PCE.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:**

- [1] Malhotra, V.M., Mehta, P.K., High-performance high volume fly ash concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Constuction Practice and Case Histories. Second Edition, 2005, ISBN 0-9731507-2-6.
- [2] Aitcin, P.-C.: High-Performance Concretes. E & FN SPON, London 1998, s.591.
- [3] Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton. Informační centrum ČKAIT. Praha 2005. ISBN 80-86769-39-9
- [4] Aitcin, P.C. – SARKAR, S. L. – RANC, R. – LÉVY, C.: „A High Silica Modulus Cement for High Performance Concrete”, Ceramic Transactions – Advances in Cementitious Materials, Edited by S. Mindess, Vol. 16, ISBN 0-944904-33-5, 1991, pp. 103-120.
- [5] Pytlík, P.: Technologie betonu. 2. vydání.Brno: Vutium, 2000. 390 str.Učebnice sv.1. ISBN 80-214-1647-5.
- [6] ALBINGER, J. – MORENO, J.: “High- Strength Concrete: Chicago Style”, Concrete Construction, Vol. 26, No. 3, March 1991, pp. 241-245.
- [7] Bache, H. H.: „Densified Cement/Ultra-fine Particle-based Materials“. presented at the Second International Conference on Superplastificizers in Concrete, published by Aalborg Cement, Aalborg, P.O.Box 163, DK-9100 Aalborg, June 10-12, 1981, Ottawa, Canada, 12 p. pp. 1–39.
- [8] Brandštetr, J., Havlica, J.: Druhotné suroviny v maltách a betonech pro 21. století. Silika 11 (2001), č.7-8, s. 241-247.
- [9] Popílký – Peter Fečko, Mária Kušnierová, Barbora Lyčková, Vladimír Čablík, Adriana Farkošová, Ostrava 2003, ISBN: 80-248-0327-5: Aktuální základní shrnutí problematiky popílků a jejich využití
- [10] Příručka popolček v betóne – Základy výroby a použitia – Lutze/vom Berg, Trnava 2008, ISBN: 978 – 80 – 969182 – 4 – 9: Aktuální publikace o popílků a jeho využití v betonu
- [11] Stavební aktuality – Využití létavých popílků ve stavebnictví – František Vavříň, Jiří Tomek, Praha 1962, ISBN: 04 – 709 – 62: Starší publikace o využití popílků ve stavebnictví obecně
- [12] <http://cez.cz>

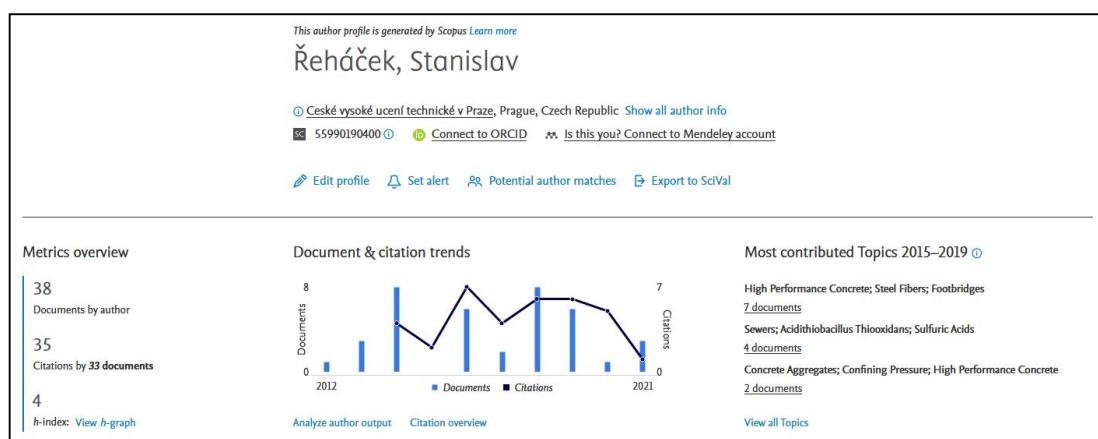


- [13] Powers, T.C.: Structure and Physical Properties of Hardened Cement Paste. J. Amer. Ceram. Soc., 41, 1958, 1, pp. 1 – 6.
- [14] Moranville – Regourd, M.: Microstructure of High Performance Concrete. In: High Performance Concrete. E & FN Spon., 1992, London, 542 p.
- [15] Popílky – Peter Fečko, Mária Kušnierová, Barbora Lyčková, Vladimír Čablík, Adriana Farkošová, Ostrava 2003, ISBN: 80-248-0327-5: Aktuální základní shrnutí problematiky popílků a jejich využití
- [16] DETWILER, G.: „High-Strength Silica Fume Concrete – Chicago Style”, Concrete International, Vol. 26, No. 3, March 1991, pp. 32-36.
- [17] [http://dbarchitektura.webzdarma.cz/prehrady/2002\\_08\\_14\\_43\\_Po\\_Orlicka\\_prehrada\\_i.jpg](http://dbarchitektura.webzdarma.cz/prehrady/2002_08_14_43_Po_Orlicka_prehrada_i.jpg)
- [18] <http://www.b-londyn.cz/hotel/the-park-lane-hotel/>
- [19] [http://www.ocf.berkeley.edu/~eldrin/photo\\_album\\_II/berkeley\\_tour/04.htm](http://www.ocf.berkeley.edu/~eldrin/photo_album_II/berkeley_tour/04.htm)
- [20] Vyhláška č.415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečištění ovzduší a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší.
- [21] MACHAČ, P.; VÁVROVÁ, J.: Co víme o nekatalytické redukci oxidů dusíku. In Aprochem 2013. Kouty nad Desnou, VŠCHT Praha. 2013.
- [22] SNOB, R.; Vliv technologie SNRC z pohledu zpracovatele a distributora popílků. In Popílky ve stavebnictví 2015. Brno, FAST VUT v Brně. 2015. p. 189-195.
- [23] HELA, R.; ŤAŽKÝ M.; Vliv SNCR na vlastnosti popílku z hlediska jeho použitelnosti do betonu, Betnářské dny 2017, ISBN 978-80-906759-0-2
- [24] AHMARUZZAMAN, M.: A review on the utilization on fly ash. In Progress in Energy and Combustion Science. 2010, Volume 36. pp. 327-363. ISSN 0360-1285
- [25] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění - přepracované znění)
- [26] Vyhláška 6/2003 kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí obytných místností a některých staveb, Ministerstvo zdravotnictví ČR, 2003
- [27] ČSN EN 206+A1+A1 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda (Duben 2018)

- [28] ČSN EN 450 -1 Popílek do betonu – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody, (Únor 2013)
- [29] Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci - ČÁST A Seznam chemických látek a jejich přípustné expoziční limity (PEL) a nejvyšší přípustné koncentrace (NPK-P)
- [30] Rostislav Šulc, Roman Snop, Jiří Neruda, František Škvára, Adéla Peterová: Zpráva k problematice popílků po technologii SNCR jako příměsi do betonu, Praha, listopad 2017
- [31] Larrimore L. Effects of ammonia from post-combustion NOx control on ash handling and use. Fuel Chemistry Division Preprints, 2002, 47 (2), 832–833.
- [32] [www.ashresources.co.za](http://www.ashresources.co.za)
- [32] Hubbard, F.H. et.al Pulverized-Fuel ash for concrete: Compositional characterization of United Kingdom PFA. Cement and Concrete Research, Vol.15, pp. 185-198, 1985.
- [33] Lutze, D., vom Berg, W.: Průručka Popolček v betóne. Základy výroby a použitia. 2. vydání, 2008, Verlag Bau+Technik GmbH 2004, Slovenské vydanie Betón Racio, s.r.o. Trnava, ISBN 978-80-969182-4-9
- [34] Malhotra, V.M.; Mehta, P.K. High-Performance, high-volume fly ash concrete for Building durable and Sustainable structures, 4. Edition, 2012, ISBN 978-0-9916737-04
- [35] Younsi, A.; Turcy Ph., Ait-Mokhtar, A.; Staquet, S.: Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interactions between hydration and drying, in: Cement and Concrete Research 43 (2013), 25-33
- [36] Meng, B.Wiens, U. Wirkung von Puzzolanen bei extrem hohen Dosierung – Grenzen der Anwendbarkeit, in: 13. Internat. Baustofftagung IBAUSIL 1997, Weimar, s. 1.0175-1.0186
- [37] zdroj:<http://www.prumyslovaekologie.cz/files/Sch%C3%A9ma%20tepeln%C3%A9%20elektr%C3%A1rny%20se%20syst%C3%A9mem%20NCR.jpg>
- [38] zdroj: <https://www.testler.cz/detektory-plynu/drager-pac-8000-nh3/> a <https://profilab24.com/en/laboratory/measurement-technology>

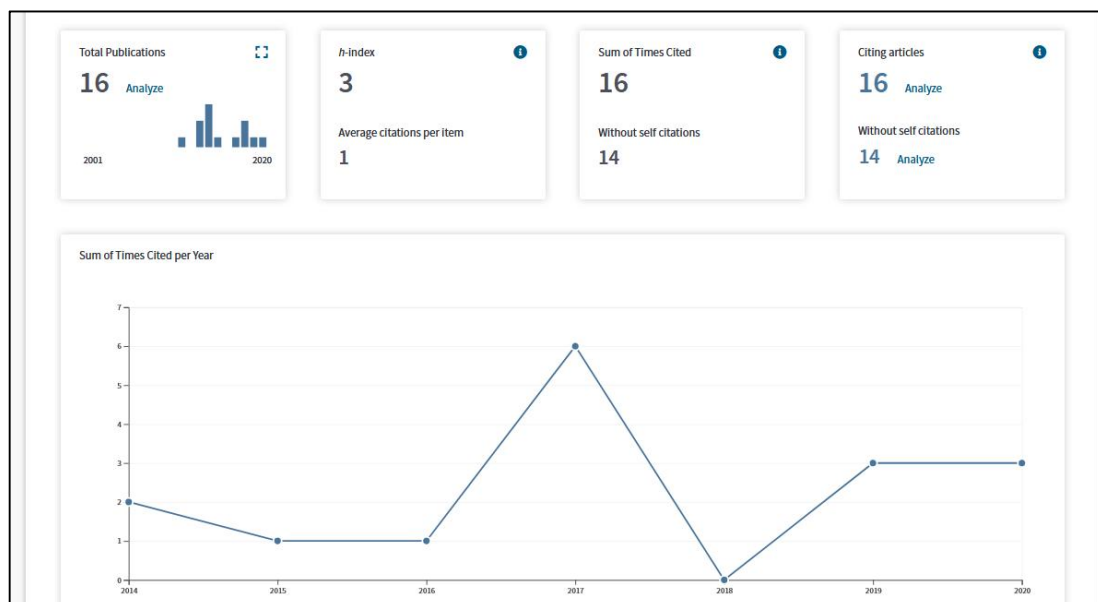
## PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA

Seznam byl přejet ze systému V3S ([www.v3s.cvut.cz](http://www.v3s.cvut.cz)). Ing. Stanislav Řeháček je jako autor nebo spoluautor veden celkem u 190 záznamů. Dle značení V3S se jedná o příspěvky typu: STA, ABS, CLA, KNI, UZV, FVZ, PAT, VZP). V souhrnu níže jsou uvedeny pouze výstupy typu článek, stať ve sborníku, kniha a abstrakt ve sborníku publikované na národních, mezinárodních, zahraničních konferencích a časopisech.



Obr. 47 Grafické znázornění publikační činnosti autora, databáze Scopus.

38 záznamů v databázi Scopus, h-index: 4.



Obr. 48 Grafické znázornění publikační činnosti autora, databáze Web of Science.

16 záznamů v databázi Web of Science, h-index: 3.

**VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA**

- [1] ŠÁCHOVÁ, H., HUŇKA, P., KOLÍSKO, J., ŘEHÁČEK, S., ČÍTEK, D., Concrete with high content of fly-ash for common use in the Czech Republic. In: Ecology and New Building Materials and Products 2014. Černá Hora, 2014-06-03/2014-06-05. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., 2014. s. 190-195. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-188-7. DOI [10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.190](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.190).
- [2] KRATOCHVÍLE, L., HUŇKA, P., DOBIÁŠ, D., KOLÍSKO, J., ŘEHÁČEK, S., Fly Ashes for HVFAC Production. In: Concrete and Concrete Structures 2013. Terchivá - Vrátná dolina, 2013-10-23/2013-10-25. Žilina: University of Žilina, 2013. s. 352-357. ISSN 1877-7058. DOI [10.1016/j.proeng.2013.09.054](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.054).
- [3] KRATOCHVÍLE, L., HUŇKA, P., KOLÍSKO, J., ŘEHÁČEK, S., Zkoušení popílků pro HVFAC betony. In: 20. Betonářské dny 2013. Hradec Králové, 2013-11-27/2013-11-28. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2013. s. 402-408. ISBN 978-80-87158-34-0.
- [4] ŘEHÁČEK, S. et al. Concrete resistance against low-pH environment. In: *9th International Conference On Concrete Under Severe Conditions - Environment and Loading*. Porto Alegre, 2019-06-05/2019-06-07. Porto Alegre: Unisinos University, 2019. DOI [10.31808/5ca6e03c5ca4f0d406ac8896](https://doi.org/10.31808/5ca6e03c5ca4f0d406ac8896).
- [5] ŘEHÁČEK, S. et al. The quality control of the concrete of the supporting structure of bridge Reg. No. V-32 in Vrchlabí. In: REITERMAN, P., ed. SPECIAL CONCRETE AND COMPOSITES 2020: 17th International Conference. Special Concrete and Composites 2020, Skalský Dvůr, 2020-10-14/2020-10-15. Melville, NY: AIP Publishing, 2021. s. 020022-1-020022-6. AIP Conference Proceedings. sv. 2322. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-4066-1. DOI [10.1063/5.0041980](https://doi.org/10.1063/5.0041980).
- [6] ŘEHÁČEK, S. et al. Damage investigation of pre-stressed cables in segmental box girder concrete bridge ev. No. 324-018 in Pardubice, Czech Republic. In: *7th Global Conference on Materials Science and Engineering*. The 7th Global Conference on Materials Science and Engineering, Xi'an, 2018-11-01/2018-11-04. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2019. ISSN 1757-8981. DOI [10.1088/1757-899X/474/1/012026](https://doi.org/10.1088/1757-899X/474/1/012026).

- [7] ŘEHÁČEK, S. et al. Quality control of the concrete and corrosion damage of cables of prestressing reinforcement of KA beams, bridge in Chomutov. In: *CONSTRUMAT 2019 - XXV International Conference and Meeting of Departments*. Zuberec, 2019-05-29/2019-05-31. London: IOP Publishing, 2019. sv. 549. ISSN 1757-8981. DOI [10.1088/1757-899X/549/1/012001](https://doi.org/10.1088/1757-899X/549/1/012001).
- [8] ŘEHÁČEK, S., J. KOLÍSKO a D. ČÍTEK. Inspection of quality of concrete of load-bearing structure and use of new materials for reconstruction, bridge across Vltava river at Zvikov. In: *BEI-2019*. BEI 2019, Honolulu, 2019-07-22/2019-07-25. The Bridge Engineering Institute, 2019. s. 305-310.
- [9] ŘEHÁČEK, S., D. ČÍTEK a J. KOLÍSKO. Quality Control of the Concrete of the Supporting Structure of Bridge Reg. No. 333-003 over the Elbe in Přelouč. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2017*. 14th International Conference on Special Concrete and Composites, Skalský Dvůr, 2017-10-10/2017-10-11. Zürich: Transtech Publications, 2018. s. 278-285. Key Engineering Materials. sv. 760. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1240-7. DOI [10.4028/www.scientific.net/KEM.760.278](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.760.278).
- [10] ŘEHÁČEK, S. et al. Issues of Concrete in Silage Pits. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. The 5th International Conference on Mechanical Engineering, Materials Science and Civil Engineering, Kuala Lumpur, 2017-12-15/2017-12-16. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2018. sv. 324. ISSN 1757-8981. DOI [10.1088/1757-899X/324/1/012023](https://doi.org/10.1088/1757-899X/324/1/012023).
- [11] ŘEHÁČEK, S., D. ČÍTEK a J. KOLÍSKO. Quality control of the concrete of the bridge reg. No. M117 in Pardubice. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 24th Conference Construmat 2018, Herlany, 2018-06-13/2018-06-15. London: Institute of Physics Publishing, 2018. s. 1-6. sv. 385. ISSN 1757-899X. DOI [10.1088/1757-899X/385/1/012045](https://doi.org/10.1088/1757-899X/385/1/012045).
- [12] ŘEHÁČEK, S. et al. Bridge ev. no. 324-018 in Pardubice, Damage Investigation of prestress cables in Segmental Box Girder Concrete Bridge. In: *CMSE 2018 Abstract Proceedings*. The 7th Global Conference on Materials Science and Engineering, Xi'an, 2018-11-01/2018-11-04. School of Materials Science and Chemical Engineering, 2018. s. 103.
- [13] ŘEHÁČEK, S. et al. Experimental Verification of Concrete Resistance Against Low-Ph Environment. In: *Fib Congress 2018, Better, Smarter, Stronger*. Fib 2018: Better - Smarter - Stronger, Melbourne, 2018-10-07/2018-10-11. Lausanne: Fib - fédération internationale du béton, 2018. s. 346-347. ISBN 978-1-877040-14-6.

- [14] ŘEHÁČEK, S. et al. Influence of Moisture on the Properties of Ternary Gypsum-Based Composites. In: *18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018 - Nano, Bio, Green ans Space - Technologies for a Sustainable Future*. 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018, Albena, 2018-06-30/2018-07-09. Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2018. s. 257-264. sv. 18. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7408-52-2. DOI [10.5593/sgem2018/6.3/S26.034](https://doi.org/10.5593/sgem2018/6.3/S26.034).
- [15] ŘEHÁČEK, S., D. ČÍTEK a J. KOLÍSKO. UHPC and NSFRC in Severe Environmental Conditions. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies, Riga, 2017-09-27/2017-09-29. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. sv. 251. ISSN 1757-899X. DOI [10.1088/1757-899X/251/1/012031](https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012031).
- [16] ŘEHÁČEK, S. et al. Cementitious Composites in Severe Environmental Conditions - First phase of Dynamic Loading, Ultrasonic Measurement and Resistance to Deicing Agents. In: *MANUFACTURING, DESIGN SCIENCE AND INFORMATION ENGINEERING, VOLS I AND II*. International Conference on Frontiers of Manufacturing and Design Science, Hong Kong, 2015-12-18/2015-12-19. Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, Inc., 2015. s. 1032-1041. ISBN 978-1-60595-300-7.
- [17] ŘEHÁČEK, S. et al. UHPC and FRC in Severe Environmental Conditions. In: *Concrete under Severe Conditions - Environment and Loading*. 8th International Conference on Concrete Under Severe Conditions - Environment & Loading, Lecco, 2016-09-12/2016-09-14. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc., 2016. s. 412-419. Key Engineering Materials. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-621-9. DOI [10.4028/www.scientific.net/KEM.711.412](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.711.412).
- [18] ŘEHÁČEK, S. et al. Assessment of concrete quality of load-bearing structure of the bridge across Otava river No. 121-006 near Zvikov after fifty years of operation in severe environmental conditions. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2016*. Speciální betony 2016, Bystřice nad Pernštejnem, Lísek, 2016-10-13/2016-10-14. Curich: Trans Tech Publications, 2017. s. 72-78. Key Engineering Materials. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1079-3. DOI [10.4028/www.scientific.net/KEM.722.72](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.722.72).
- [19] ŘEHÁČEK, S. et al. Inspection of quality of concrete of load-bearing structure, bridge no. 121-007 across Vltava River at Zvikov. In: *Bridges in Danube Basin*. 9th International Conference „Bridges in Danube Basin 2016“, BDB 2016, Žilina, 2016-09-30/2016-10-01. Žilina: EDIS - Publishing Institution of the University of Zilina, 2016. s. 137-138. ISBN 978-80-554-1249-8.

- [20] ŘEHÁČEK, S. et al. UHPC and FRC in Severe Environmental Conditions, Resistance Against Freeze-thaw Cycles, Aggressive Chemical Agents and Dynamic Loading. In: *1st International Interactive Conference on Ultra-High Performance Concrete*. Des Moines, Iowa, 2016-07-18/2016-07-20. Ames, Iowa: Iowa State University, 2016. DOI [10.21838/uhpc.2016.49](https://doi.org/10.21838/uhpc.2016.49). Dostupné z: [http://www.extension.iastate.edu/registration/events/UHPCPapers/UHPC\\_ID\\_49.pdf](http://www.extension.iastate.edu/registration/events/UHPCPapers/UHPC_ID_49.pdf)
- [21] ŘEHÁČEK, S. et al. Cementitious Composites in Severe Environmental Conditions - Dynamic Loading. In: SMETANOVÁ, L., M. NEJEDLÍK a M. DRDLOVÁ, eds. *Ecological and New Building Materials and Products 2015*. Černá Hora, 2015-06-02/2015-06-04. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2015. s. 69-75. ISBN 978-3-03835-587-8. DOI [10.4028/www.scientific.net/AMR.1124.69](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1124.69).
- [22] ŘEHÁČEK, S. et al. Impact Testing of Concrete Using a Drop-weight Impact Machine. In: KOSTELECKÁ, M., ed. *Proceedings from 21st Czech Concrete Day 2014*. 21. Betonářské dny 2014, Hradec Králové, 2014-11-26/2014-11-27. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd., 2015. s. 225-228. Advanced Materials Research. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-474-1. DOI [10.4028/www.scientific.net/AMR.1106.225](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1106.225).
- [23] ŘEHÁČEK, S. et al. Impact Resistance of Fibre-reinforced Concrete. In: REITERMAN, P., ed. *Special Concrete and Composites 2014*. 11th International Conference Special Concrete and Composites 2014, Skalský Dvůr, 2014-10-16/2014-10-17. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 2014. s. 48-53. Advanced Materials Research. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-317-1. DOI [10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.48](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.48).
- [24] ŘEHÁČEK, S. et al. Effect of different type of load tests on impact resistance of fibre reinforced Concrete Specimens. In: *Improving Performance of Concrete Structures*. The Fourth International fib Congress, Mumbai, 2014-02-10/2014-02-14. Hyderabad: Universities Press, 2014. s. 764-770. ISBN 978-81-7371-920-2.
- [25] ŘEHÁČEK, S. et al. Impact Resistance of Thin-Walled Shell Structures. In: *Applied Mechanics and Materials*. 6th International Scientific Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering, Donovaly, 2014-05-26/2014-05-29. Durnten-Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2014. s. 267-270. ISSN 1660-9336. ISBN 978-3-03835-197-9. DOI [10.4028/www.scientific.net/AMM.617.96](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.617.96).

- [26] ŘEHÁČEK, S. et al. Impact Resistance of steel fibre reinforced Thin-Walled Shell Structures. In: DRDLOVÁ, M., M. NEJEDLÝ a L. SMETANOVÁ, eds. *Ecology and New Building Materials and Products 2014*. Černá Hora, 2014-06-03/2014-06-05. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., 2014. s. 203-206. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-188-7. DOI [10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.203](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.203).
- [27] ŘEHÁČEK, S. et al. Two type of impact load tests, tested on fibre reinforced concrete specimens. In: KOTEŠ, P. a A. ČAVOJCOVÁ, eds. *Concrete and Concrete Structures 2013*. Terchivá - Vrátná dolina, 2013-10-23/2013-10-25. Žilina: University of Žilina, 2013. s. 278-283. ISSN 1877-7058. DOI [10.1016/j.proeng.2013.09.043](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.043).
- [28] ŘEHÁČEK, S. et al. UNCONVENTIONALLY SHAPED TESTING SPECIMENS RELATING TO THE IMPACT RESISTANCE OF FIBRE REINFORCED CONCRETE. In: LIÍ, Z.J. et al., eds. *Concrete under Severe Conditions*. Concrete under Severe Conditions 2013, Nanjing, 2013-09-23/2013-09-25. Cachan: RILEM Publications, 2013. s. 1774-1781. ISBN 978-2-35158-124-7.
- [29] ŘEHÁČEK, S. et al. Different Type of Impact Load Tests on Fibre Reinforced Concrete Specimens. In: BILISZCZUK, J. et al., eds. *CCC 2013 - Concrete Structures in Urban Areas*. Central European Congress on Concrete Engineering 2013, Wrocław, 2013-09-04/2013-09-06. Wrocław: Dolnoslaskie wydawnictwo edukacyjne, 2013. s. 440-443. ISBN 978-83-7125-229-7.
- [30] ŘEHÁČEK, S. et al. IMPACT RESISTANCE OF FIBRE REINFORCED CONCRETE. In: *8th International Conference, Concrete in Low Carbon Era - book of abstract*. Dundee, 2012-07-09/2012-07-11. Dundee: University of Dundee, 2012. s. 171.
- [31] ŘEHÁČEK, S. et al. EFFECT OF A SHAPE OF THE SPECIMENS ON IMPACT RESISTANCE OF FIBRE REINFORCED CONCRETE. In: *Durability of Concrete Structures*. CCC 2012 Durability of Concrete Structures, Plitvice Lakes, 2012-10-04/2012-10-06. Zagreb: SECON-CSSE, 2012. s. 309-314. ISBN 978-953-7621-14-8.
- [32] ŘEHÁČEK, S. et al. THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF TEST SPECIMENS RELATING TO THE IMPACT RESISTANCE TEST OF FIBRE REINFORCED CONCRETE. In: *6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. Rome, 2012-06-13/2012-06-15. Roma: Università di Roma, 2012. s. 1-6.



- [33] ŘEHÁČEK, S. et al. IMPACT RESISTANCE OF FIBRE REINFORCED CONCRETE. In: *8th International Conference, Concrete in Low Carbon Era*. Dundee, 2012-07-09/2012-07-11. Dundee: University of Dundee, 2012. s. 1665-1671. ISBN 978-0-9573263-0-9.
- [34] ŘEHÁČEK, S. et al. Impact Resistance of Fibre Reinforced Cementitious Composites. In: *The 7th Central European Congress on Concrete Engineering 2011. Innovative Materials and Technologies for Concrete Structures*, Balatonfüred, 2011-09-22/2011-09-23. Lausanne: Fib - fédération internationale du béton, 2011. s. 273-276. Fib Hungary. ISBN 978-963-313-036-0.
- [35] ŘEHÁČEK, S., I. ŠIMŮNEK a P. HUŇKA. New Procedures for Evaluating Impact Resistance of Fibre reinforced Cementitious Composite. In: KHRAPKO, M. a O. WALLEVIK, eds. *Proceedings of the 9th International Symposium on High performance Concrete*. 9th International Symposium on High Performance Concrete, Rotorua, 2011-08-09/2011-08-11. Auckland: New Zealand Concrete Society, 2011. s. 16. ISBN 978-0-473-19287-7.
- [36] ŘEHÁČEK, S., I. ŠIMŮNEK a P. HUŇKA. Effect of Size and Shape of the Specimen on Impact Resistance of Steel Fibre Reinforced Concrete. In: CZARNECKI, L., ed. *Material Problems in Civil Engineering*. The Sixth Conference on Material Problems in Civil Engineering, Cracow, 2011-06-20/2011-06-22. Krakow: Politechnika Krakowska, 2011. s. 331-338. ISBN 978-83-7242-607-9.
- [37] ŘEHÁČEK, S. et al. Impact Resistance of Steel Fibre Reinforced Concrete. In: KOHOUTKOVÁ, A., V. VYTLAČILOVÁ a T. DVORSKÝ, eds. *Fibre Concrete 2011 - Technology, Design, Application (Collection of Abstracts)*. Fibre concrete 2011, Praha, 2011-09-08/2011-09-09. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2011. s. 91-92. ISBN 978-80-01-04836-8.

**Práce byla vypracována s podporou grantů:**

Grantový projekt FR-TI3/747 s názvem BETONY S VELMI VYSOKÝM OBSAHEM POPÍLKU V TRANSPORTBETONU – HVFAC, řešený v roce 2011-2014.

Grantový projekt FW01010539 s názvem BEZPEČNÉ VYUŽITÍ POPÍLKŮ Z TECHNOLOGIE REDUKCE NOX NA BETONÁRNÁCH ČMB, řešený v roce 2020 – 2023.

Grantový projekt SGS OHK1-064/12 s názvem RÁZOVÁ ODOLNOST VLÁKNOBETONU, řešený v roce 2012.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ:**

$E$	modul pružnosti v MPa;
$\sigma$	zatěžovací napětí v N/mm <sup>2</sup> ;
$\varepsilon$	poměrné přetvoření;
$\nu$	Poissonovo číslo;
$l$	počáteční délka prutu v m;
$\Delta l$	celkové zkrácení (prodloužení) v m;
$A$	průřezová plocha v m <sup>2</sup> ;
$\sigma_T$	napětí v tělese MPa;
$\alpha_T$	součinitel teplotní roztažnosti K <sup>-1</sup> ;
$\Delta T$	teplotní rozdíl ve °C;
$\Delta S$	rozdíl v napětí;
$\Delta e$	rozdíl v poměrném přetvoření;
$F$	působící síla odečtená na lisu v N;
$b$	šířka trámce v mm;
$h$	výška trámce v mm;
$l$	rozpětí trámce v mm;

**SEZNAM TABULEK:**

- Tabulka 1 Popílek Chvaletice, Mělník, Opatovice a Dětmárovice
- Tabulka 2 Chemické složení některých popílků v USA a Kanadě
- Tabulka 3 Složení HVFAC v závislosti na pevnosti v tlaku v  $\text{kg/m}^3$
- Tabulka 4 Chemické složení popílků a cementu CEM II/A-LL 42,5 R Hranice a CEM I 42,5 R Radotín a jejich objemová hmotnost a index pucolánového potenciálu
- Tabulka 5 Třídy popílku dle velikosti PPI
- Tabulka 6 Měrný povrch popílků a cementu v  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Měrný povrch popílků je průměr ze 4 dílčích stanovení
- Tabulka 7 Velikost částic v mikronech, které jsou zastoupeny s četností 10, 50 (střední velikost částic) a 90 % objemu. Červeně vyznačená pole značí největší velikost částice a modře vyznačené značí nejmenší velikost částice pro danou četnost.
- Tabulka 8 Stanovení vodonáročnosti popílků podle EN 450-1 příloha B.
- Tabulka 9 Index účinnosti popílků po 28 dnech v kombinaci s CEM II/A-LL 42,5 R Hranice. Pro zajímavost uveden i index účinnosti vypočtený z pevnosti v tahu za ohybu. Poznámka: místo normového písku byl při zkoušce použit 0-4 Kaznějov.
- Tabulka 10 Zhodnocení vlivu vodonáročnosti popílku na pevnost malty při různém způsobu výroby zkušebních těles.
- Tabulka 11 Receptura referenční cementové malty a cementopopílkové malty s různým popílkem a s náhradou cementu popílkem 0 – 70 % hm. Zkoušeno při stejné konzistenci resp. při stejné dávce záměsové vody.
- Tabulka 12 Přehled charakteristických vlastností jednotlivých popílků.
- Tabulka 13 Ohodnocení jednotlivých charakteristik popílků na základě pořadí od 1 do 6 (6 je nejlepší).
- Tabulka 14 Návrh receptur popílkových betonů pro nalezení optimálního množství cementového tmelu a maximální možné náhrady cementu popílkem Dětmárovice.
- Tabulka 15 Shrnutí výsledků laboratorních zkoušek na betonech provedených za účel stanovení optimálního množství cementového tmelu a obsahu

- popílku. Kolaps znamená sednutí ČB podle ČSN EN 12350-2 vyšší jak 240 mm.
- Tabulka 16 Složení na 1 m<sup>3</sup> a stanovené vlastnosti betonů vyrobených při provozních zkouškách.
- Tabulka 17 Přehled výsledků druhého kola provozních zkoušek.
- Tabulka 28 Výběr základních údajů z receptury betonů, u kterých bylo provedeno stanovení objemových změn.
- Tabulka 19 Požadavky ČSN EN 206+A1 na maximální průsak vody betonem při zkoušce dle ČSN EN 12390-8 pro různé stupně vlivu prostředí.
- Tabulka 20 Výsledky zkoušky vodotěsnosti dle ČSN EN 12390-8. Referenční receptury betonu jsou zvýrazněny.
- Tabulka 21 Výsledky stanovení hloubky karbonatace a pórovitosti betonu zrychlenou metodou
- Tabulka 22 Naměřené výsledky pro jednotlivé cementopopílkové směsi.
- Tabulka 23 Naměřené výsledky pro jednotlivé cementopopílkové směsi.
- Tabulka 24 Naměřené výsledky pro popílkové směsi smíchané s roztokem NaOH.
- Tabulka 25 Návrh záznamu o kontrolním měření amoniaku v popílku před vpuštěním do sila betonárny.
- Tabulka 26 Průběžná kontrola popílku Mělník, obsah NH<sub>3</sub>, ztráta žíháním a odpor proti míchání.
- Tabulka 27 Porovnání vlastností betonů s vysokým obsahem popílku (šedé sloupce) a referenčního betonu pro třídu C 16/20.
- Tabulka 28 Porovnání vlastností betonů s vysokým obsahem popílku (šedé sloupce) a referenčního betonu pro třídu C 20/25 a C 25/30.

**SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ:**

- Obr. 1 Pozice hydraulických a pucolánových látek v ternárním diagramu [5].
- Obr. 2 Schéma vzniku popílku [11].
- Obr. 3 Kulovitá zrna popílku [2].
- Obr. 4 Nepravidelný tvar částic popílku [13].
- Obr. 5 Rentgenové difraktogramy různých popílků [14].
- Obr. 6 Přehrada Orlík – použití popílkobetonů z důvodu snížení vývinu hydratačního tepla, 1956 - 1961 [17].
- Obr. 7 Park Lane Hotel - užití HVFAC na vyztužené sloupy, Canada, 1988 [18].
- Obr. 8 Wurster Hall, University of California – HVFAC byl použit na pilíře a základy, USA, 2001 [19].
- Obr. 9 Schéma tepelné elektrárny se systémem SNCR [37].
- Obr. 10 Popílek bez SNCR 3000x zvětšeno.
- Obr. 11 Popílek po SNCR 3000x zvětšeno.
- Obr. 12 Reologie analyzovaných popílků [23].
- Obr. 13 Graf koncentrací amoniaku ve vzduchu po betonáži za použití popílku s obsahem amoniaku (ppm) při rychlosti ventilace 5,4 m<sup>3</sup>/min, 10 m<sup>3</sup>/min a 50 m<sup>3</sup>/min [22].
- Obr. 14 Graf - modelový výpočet obsahu amoniaku v betonu při dávce cementu 300 kg a 100,150 a 200 kg popílku s 50 a 100 ppm amoniaku.
- Obr. 15 Hranice obsahu amoniaku v popílku pro komerční použití [31].
- Obr. 46 Stanovení jemnosti popílků – zůstatek na síti 0,045 mm – prosévání za sucha.
- Obr. 17 Stanovení jemnosti popílků - zůstatek na síti 0,063 mm - za sucha. Doplněna jemnost cementu CEM II/A-LL 42,5 R Hranice a CEM I 42,5 R Radotín.
- Obr. 18 Histogram rozdělení velikosti částic testovaných popílků a cementu.
- Obr. 19 Souhrnná křivka zrnitosti popílků a cementu z laserového granulometru.
- Obr. 20 Vliv náhrady cementu CEM II/A-LL 42,5 R Hranice testovanými popílky v množství 0 – 70 % na počáteční konzistenci cementopopílkové malty při stejném obsahu vody.

- Obr. 21 Vliv náhrady cementu CEM I 42,5 R Radotín testovanými popílkami v množství 0 – 70 % na počáteční konzistenci cementopopílkové malty při stejném obsahu vody.
- Obr. 22 Vliv náhrady cementu popílkem na relativní velikost pevnosti v tlaku po 28 dnech. Referenční malta je 100 %, absolutní hodnota pevnosti v tlaku této malty je 35 MPa.
- Obr. 23 Vliv náhrady cementu popílkem na relativní velikost počátečního rozlití. Referenční malta je 100 %, absolutní hodnota rozlití této malty je  $160 \pm 10$  mm
- Obr. 24 Vliv 30 % a 70 % hm. náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku po 28 dnech.
- Obr. 25 Vliv náhrady cementu popílkem na relativní velikost pevnosti v tlaku po 28 dnech. Ref. malta je 100 %, průměrná absolutní hodnota pevnosti v tlaku této malty je 38,7 MPa.
- Obr. 26 Vliv náhrady cementu popílkem na obsah vody nutné pro dosažení stejné výchozí konzistence. Hodnoty vyšší jak 100 % znamenají, že obsah vody byl vyšší než v referenční maltě bez popílku (100 %).
- Obr. 27a a 27b  
Betonové bloky vyráběné v rámci provozních zkoušek popílkového betonu na betonárně v Hulíně. Obrázek 27a je ilustrativní, nebyl pořízen při samotné betonáži.
- Obr. 58a a 28b  
28a - Vzhled betonu podle receptury H31-2 (s přísadou HF 6) po zkoušce sednutím v čase 5-10 min. 28b - Vzhled betonu podle receptury H33 (s přísadou HF 13 po zkoušce sednutím v čase 5 – 10 min.
- Obr. 29 Vývoj teplot během hydratace z betonu vyrobeného na betonárně, receptury betonu viz tab.17.
- Obr. 60 Vývoj teplot během hydratace z betonu vyrobeného v laboratoři, receptury betonu viz tab.15.
- Obr. 31 Měřicí zařízení pro diskrétní měření délkových změn zkušebních trámů
- Obr. 32 Smrštění betonu – vzorky odebrané při provozních zkouškách v Hulíně.
- Obr. 33 Smrštění betonu – vzorky odebrané při laboratorních zkouškách.
- Obr. 34 Smrštění betonu – průměrné hodnoty z obou provedených odběrů.

- Obr. 35 Výsledky zkoušky vodotěsnosti včetně vyznačení limitních hodnot, které připouští ČSN EN 206+A1-1. Graf zachycuje průměrné hodnoty průsaku a průměr  $\pm$  směrodatnou odchylku
- Obr. 36 Zkušební tělesa po vyjmutí z atmosféry urychlující karbonataci betonu.
- Obr. 37 Vysokotlaká rtuťová porozimetrie – distribuce pórů.
- Obr. 38 Vysokotlaká rtuťová porozimetrie – četnost pórů
- Obr. 39a, 39b Přístroj Dräger accuro vlevo a přístroj Dräger NH3 PAC 8000 [38].
- Obr. 40 Výsledek měření po 1 min a 30 min se odečte z detekční trubičky – modrofialově zbarvená část, stupnice v ppm je přímo na trubičce.
- Obr. 41 Měření amoniaku ve vzduchu těsně nad míchanou směsí pomocí analyzátoru DRÄGER PAC 8000 NH<sub>3</sub>.
- Obr. 42 Zkušební lahvička - vlevo, objem 500 ml, průměr 70 mm, výška 170 mm, průměr hrdla 35 mm, vpravo připravený 2 % roztok NaOH, pH 12,8.
- Obr. 43 Odběrový kyblík s popílkem a normová odměrka, kyblík by měl obsahovat alespoň 5 kg popílku.
- Obr. 44 Snímač přístroje DRAGER PAC 8000 NH<sub>3</sub> - přístroj před zahájením měření - umístěn uprostřed hrdla zkušební lahvičky, musí být čidlem dolů, zde ilustrace displeje. Vlevo stopky pro měření 30 s.
- Obr. 45 Reologické vlastnosti popílku Mělník odebíraného v průběhu října a listopadu 2020.
- Obr. 46 Reologické vlastnosti – změna torze (odporu míchání) v čase 5min a 60 min popílku Mělník odebíraného v průběhu října a listopadu 2020.
- Obr. 47 Grafické znázornění publikační činnosti autora, databáze Scopus. 38 záznamů v databázi Scopus, h-index: 4.
- Obr. 48 Grafické znázornění publikační činnosti autora, databáze Web of Science. 16 záznamů v databázi Scopus, h-index: 3.