

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební



**Zhodnocení vlivu vybraných složek
na vlastnosti vysokohodnotného betonu**

**Evaluation of the influence of selected
components on high-performance concrete
properties**

HABILITAČNÍ PRÁCE

Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Praha 2020

Poděkování

Velice rád bych poděkoval za spolupráci dlouholetému kolegovi Petru Bílému, který se se mnou účastnil velkého množství výzkumných úkolů a je spoluautorem velké části mých publikací. Významné poděkování také patří mojí manželce Věře, která umožnila vznik této práce svojí obětavostí a byla také prvním kritickým hodnotitelem. Ke vzniku práce přispěly i obě mé dcery, a to tolerancí a dlouhým spánkem.

Abstrakt

Práce prezentuje výsledky výzkumu zabývajícího se hledáním vhodných složek pro recepturu vysokohodnotného betonu. V textu jsou analyzovány a kriticky zhodnoceny dva typy čedičového kameniva, tři typy cementu (CEM I 42,5 R Radotín, CEM I 42,5 R Mokrý a CEM I 52,5 R Mokrý) a tři typy příměsí (metakaolin, mikrosilika a popílek). Z kritického zhodnocení přínosů jednotlivých typů jsou stanovena doporučení pro použití v recepturách vysokohodnotného betonu. V textu je dále uveden příklad sestavení receptury vysokohodnotného betonu, která byla následně aplikována v řadě konstrukcí vyráběných v průmyslových podmínkách. Práce obsahuje i nový způsob míchání vysokohodnotného betonu, s jehož pomocí lze docílit zlepšení vlastností vysokohodnotného betonu.

Klíčová slova

Latentně hydraulické příměsí, vysokohodnotný beton, UHPC, postup míchání, receptura betonu, aplikace UHPC

Abstract

The thesis presents the results of research aimed at the selection of suitable components of high-performance concrete (HPC). The text analyses and critically evaluates two types of basalt aggregates, three types of cement (CEM I 42.5 R Radotín, CEM I 42.5 R Mokrý and CEM I 52.5 R Mokrý) and three types of supplementary cementitious materials (metakaolin, silica fume and fly ash). The recommendations for their use in HPC mixtures are derived from the critical evaluation of contributions. The work also gives an example of optimization of HPC mixture that was applied in a variety of structures in industrial conditions. Finally, a new method of homogenization of HPC that allows to improve material properties is introduced.

Keywords

Supplementary cementitious materials, high-performance concrete, UHPC, homogenization procedure, concrete mixture, UHPC application

Obsah

Abstrakt.....	3
Abstract.....	4
1. Úvod.....	7
2. Kamenivo.....	8
2.1. Ideální zrnitost kameniva	8
2.2. Alkalicko-křemičitá reakce	11
2.3. Výběr vhodného zdroje kameniva	13
2.4. Interakční tranzitní zóna.....	17
2.4.1. Nanoindentace	20
2.4.2. Spektrální analýza.....	21
2.5. Praní kameniva.....	24
2.5.1. Ověření vlivu praní hrubého kameniva na vlastnosti betonu	24
2.5.2. Rozbor výsledků přínosu praní kameniva.....	31
3. Cement.....	33
3.1. Výběr vhodného druhu cementu pro vysokohodnotný beton.....	33
3.1.1. Užité vlastnosti zkoumaných cementů.....	33
3.1.2. Vývoj mechanických pevností zkoumaných cementů v čase	34
3.1.3. Chemické porovnání zkoumaných cementů	36
3.2. Rozbor výsledků výběru vhodného cementu.....	37
4. Příměsi vhodné pro částečnou náhradu cementu	38
4.1. Ověření vlivu příměsí na vlastnosti cementu nebo betonu	39
4.1.1. Chemické složení příměsí a cementu.....	41
4.1.2. Porovnání velikosti částic příměsí	42
4.1.3. Stanovení vlivu příměsí na vývoj hydratačního tepla	44
4.1.4. Stanovení vlivu příměsí na tahovou a tlakovou pevnost cementové malty.....	49
4.1.5. Stanovení vlivu příměsí na rychlost nárůstu tlakové pevnosti	50
4.1.6. Stanovení vlivu příměsí na počátek a konec tuhnutí.....	51
4.1.7. Stanovení vlivu příměsí na velikost smršťování způsobeného vysycháním	52
4.1.8. Stanovení vlivu příměsí na mechanické vlastnosti betonu.....	57
4.1.9. Stanovení vlivu příměsí na velikost ITZ	60
4.2. Rozbor výsledků zkoumání vlivu náhrad cementu na vlastnosti betonu	61
5. Drátky.....	66
5.1. Vliv drátků na nakypření kameniva	68
5.2. Homogenita vysokohodnotného betonu	69

5.2.1.	Ověření rovnoměrnosti rozložení drátků u navrhovaného betonu	75
5.2.2.	Rozbor výsledků stanovení maximální dávky drátků	77
6.	Vlastní receptura vysokohodnotného betonu	78
7.	Vývoj postupu míchání vysokohodnotného betonu	81
7.1.	Úprava dávkování vody a vliv na mechanické vlastnosti	81
7.2.	Úprava dávkování příměsí a vliv na mechanické vlastnosti	90
8.	Aplikace vysokohodnotného betonu	92
8.1.	Prvky drobné architektury	92
8.1.1.	Venkovní lavička ČVUT	92
8.1.2.	Konferenční stůl	98
8.1.3.	Obkladový prvek	100
8.1.4.	Mostní zábradlí	102
8.2.	Cyklopointy v obci Chocenice	106
8.3.	Prvky se zvýšenou odolností proti výbuchu	115
8.3.1.	Panel se zvýšenou odolností proti výbuchu	115
8.3.2.	Bezpečnostní lavička	128
8.3.3.	Ochranný kryt	131
9.	Závěr	134
10.	Literatura	136
11.	Seznam použitých zkratk	144

1. Úvod

Beton je v současné době nejpoužívanějším stavebním materiálem ve všech oborech stavitelství. Zároveň je také velmi častým předmětem výzkumu řady odborníků. Obojí je dáno tím, že ze všech stavebních materiálů pouze u betonu lze poměrně jednoduše změnit jeho vlastnosti a vytvořit tak velmi odlišný materiál. To dává možnost používat beton od stabilizací zemních konstrukcí, přes nosné prvky pozemních a dopravních staveb až ke speciálním konstrukcím atomových elektráren, vojenských staveb nebo dokonce prvků strojního inženýrství, ale třeba i pro prvky drobné architektury, dekorační předměty nebo nábytek a šperky. Ve všech těchto případech se používá materiál shodně nazývaný beton, ale z pohledu užitných vlastností mají mezi sebou materiály těchto aplikací jen málo společného. Změníme-li poměrové zastoupení jednotlivých složek, kvalitu vstupních surovin, případně doplníme-li recepturu o další složku v dávce jednotek procent, můžeme získat materiál se zcela odlišnými vlastnostmi.

Vytvoření receptury betonu, která je průmyslově použitelná, a přitom splňuje požadavky, které jsou kladeny na čerstvý beton zhotovitelem a na ztvrdlý beton statikem, je proces náročný na znalosti i zkušenosti. Tentýž typ vstupní suroviny má u různých výrobců různé vlastnosti, a proto je vždy důležité zvolit pro danou aplikaci správného dodavatele. Dokonce i složky betonu jednoho výrobce mohou mít v čase proměnné vlastnosti, což je třeba v receptuře vždy zohlednit, aby měl výsledný betonový produkt vlastnosti v čase pokud možno konstantní.

Vlastnosti ztvrdlého betonu by měly být vždy využity tak, aby zhotovená konstrukce byla trvanlivá, ekologická a ekonomická. Ve stavební praxi jsou bohužel realizovány mnohé případy, kdy je používán vysokohodnotný beton pro konstrukce, které neumí plně využít jeho potenciál, což v těchto případech znamená plýtvání neobnovitelnými zdroji i finančními prostředky.

Habilitační práce volně navazuje na téma disertační práce autora. Obě práce se zabývají technologickými aspekty vývoje receptury betonu se zaměřením na vysokohodnotný beton. Autorem dříve rozpracované základní principy vlivu cementu, vody a kameniva na návrh receptury betonu jsou v této práci rozšířeny a prohloubeny. Významný je přínos v oblasti úpravy kameniva pro vysokohodnotný beton (kapitola 2) nebo vlivu latentně hydraulických příměsí, které jsou zhodnoceny na základě jejich účinků na vlastnosti cementové pasty a na vlastnosti vysokohodnotného betonu (kapitola 0). Všechny poznatky získané v této práci vycházejí z realizovaných zkoušek, které jsou uvedeny včetně receptury a podmínek vyhodnocení, aby uvedené informace byly relevantní pro další výzkum nebo posloužily k objasnění vlivu dané složky na vlastnosti betonu.

Všechny dílčí zkoušky různých vstupních surovin sloužily k naplnění hlavního cíle práce, kterým bylo sestavení receptury vysokohodnotného betonu ze surovin dostupných v České republice, a to včetně stanovení ideálního postupu míchání. Splnění cíle prokazují četné aplikace receptury v prvcích a konstrukcích uvedených v kapitole 8, které byly ve většině případů realizovány v průmyslových podmínkách, což dokládá úspěšný transfer technologického postupu z laboratorního prostředí do průmyslových podmínek. Původnost a inovační potenciál vytvořené receptury a postupu míchání dokládají patenty, kterými jsou oba vynálezy chráněny.

2. Kamenivo

Mechanicko-fyzikální vlastnosti kameniva mají významný vliv na vlastnosti výsledného betonu, protože kamenivo zaujímá zhruba dvě třetiny až tři čtvrtiny objemu betonu. Kamenivo ovlivňuje především tlakovou pevnost, objemovou stabilitu a trvanlivost betonu. Zároveň úprava vlastností betonu pomocí kameniva bývá jednou z nejlevnějších, protože cena vlastního kameniva je velmi nízká, pokud není významně ovlivněna dopravou.

Pro vysokohodnotné betony se používají nejvyšší druhy kameniva, aby se dosáhlo co nejlepších parametrů betonu. Kameniva s nejvyššími pevnostmi pocházejí z vyvřelých hornin, které krystalizovaly za ideálních podmínek. V opačném případě mohou být i kameniva z vyvřelých hornin pro beton nevhodná. Základní mechanické vlastnosti hornin jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti vybraných hornin[1].

Hornina	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul pružnosti [GPa]
žula, syenit	160 – 280	40 – 70
diorit, gabro	170 – 300	40 – 100
křemenný porfyr, andezit	180 – 300	25 – 65
čedič, melafyr	290 – 400	55 – 115
diabas	180 – 250	70 – 90
křemenec, droba	150 – 300	60 – 75
křemenný pískovec	120 – 200	10 – 45
vápenec dolomit	80 – 180	20 – 85
rula	160 – 280	10 – 30
amfibolit	170 - 280	45 - 50

2.1. Ideální zrnitost kameniva

Druhým nejvýznamnějším parametrem kameniva po mineralogickém složení je zrnitost. Zrnitost kameniva určuje poměrové zastoupení velikostí zrn ve vzorku kameniva. Ideální zrnitost je taková, kdy menší zrna odpovídají svou velikostí právě mezerám mezi většími zrny. Tím je dosaženo vzniku jen minimálního množství dutin mezi zrny kameniva. V betonu budou tyto dutiny vyplněny cementem, který je však po mechanické a trvanlivostní stránce horším materiálem než kamenivo, a proto je důležité velikost dutin minimalizovat, k čemuž slouží

definované křivky zrnitosti, např. Füllerova křivka. Použitím této křivky zrnitosti vznikne velice hutný beton, který bude málo pohyblivý a z důvodu zpracovatelnosti bude nutné přidat značné množství vody a použít velmi efektivní hutnicí prostředky. V praxi se takovéto křivky zrnitosti využívá pro vibrolisované nebo válcované betony.

Füllerova křivka zrnitosti je dána vztahem [2]:

$$P = 100 \cdot (d / D_{\max})^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

kde P je propad sítem o velikosti otvoru d ,

$D_{\max}$ velikost maximálního zrna kameniva.

Pro běžně hutněné betony bylo nutné ideální křivku zrnitosti upravit navýšením množství jemných zrn, která se chovají obdobně jako například kuličky ve valivém ložisku a umožňují lepší pohyblivost směsi. Nevýhodou navýšení množství jemných zrn je významný nárůst měrného povrchu kameniva, který musí být pokryt cementem. Ideální křivku zrnitosti takto upravil J. Bolomey, který vztah (1) rozšířil o součinitel A , zohledňující vliv zpracovatelnosti [2].

$$P = A + (100 - A) \cdot (d / D_{\max})^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

kde P je propad sítem o velikosti otvoru d ,

$D_{\max}$ velikost maximálního zrna kameniva,

A koeficient zpracovatelnosti, dle Tab. 2.

Tab. 2 Hodnoty součinitele zpracovatelnosti [2]

Kamenivo	Součinitel konzistence A pro Bolomeyův vztah		
	tuhá S1	plastická S2, S3	tekutá S4, S5
těžené	8	10	12
drcené	10	12	14

Pokud je dávka cementu v navrhované receptuře již známa, lze ji z podílu pevných částí (kamenivo + cement) vytknout a výše zmíněné rovnice se upraví do následující podoby.

Füller-Thomsonův vztah:

$$P = \frac{100 \cdot (d / D_{\max})^{\frac{1}{2}} - C}{100 - C} \cdot 100. \quad (3)$$

Bolomeyův vztah:

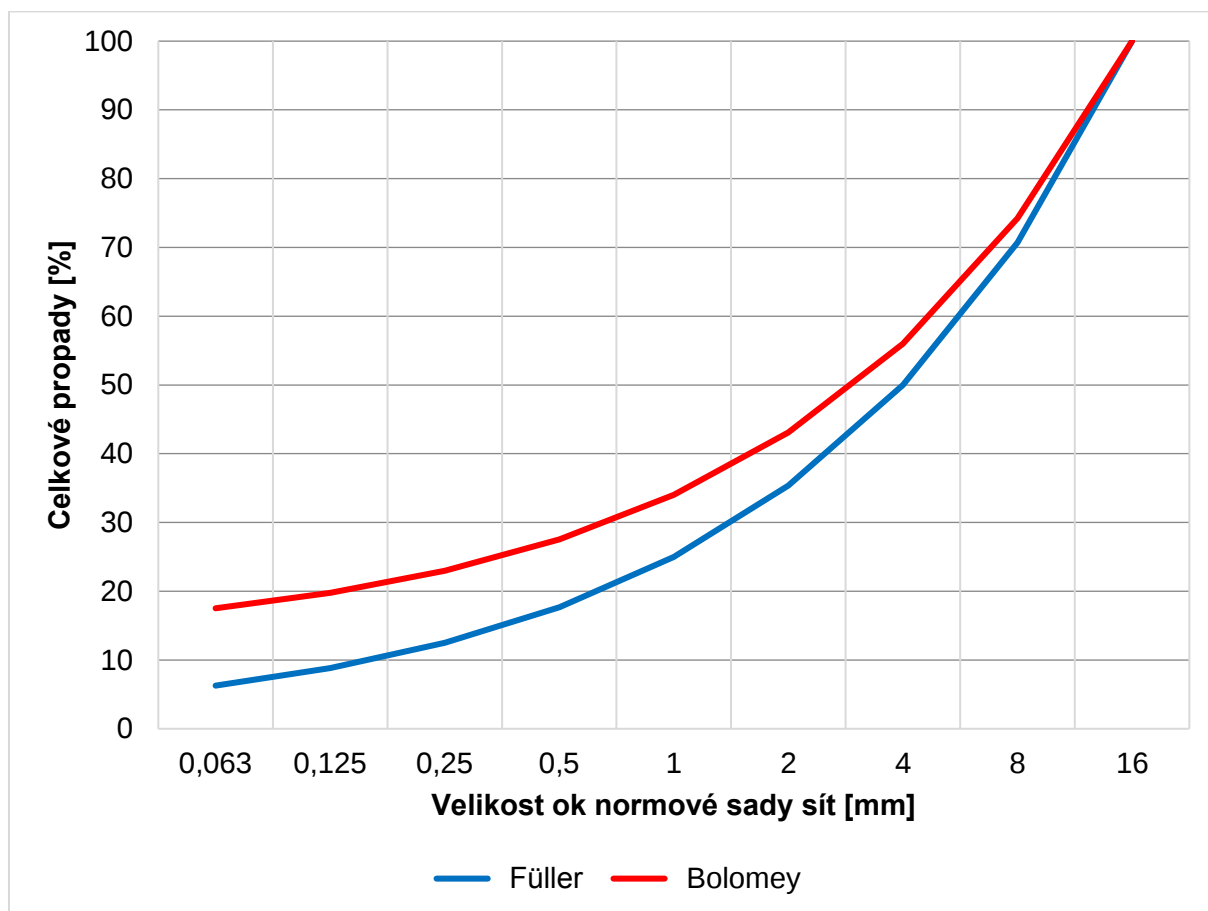
$$P = \frac{A + (100 - A) \cdot (d / D_{\max})^{\frac{1}{2}} - C}{100 - C} \cdot 100 \quad (4)$$

kde C je vyjádřeno vztahem $C = \frac{c}{c+a} \cdot 100$, (5)

c je množství cementu [kg/m³],

a je celkové množství kameniva [kg/m³].

Grafické znázornění obou rovnic je na Obr. 1. Z grafu je dobře patrné navýšení množství jemných částic na úkor hrubých, které Bolomey navrhl. Tímto je stále zaručeno, že navrhovaný beton bude hutný a zároveň bude celá směs více pohyblivá, tzn. snáze hutnitelná. Ve stavební praxi se křivka zrnitosti podle Bolomeye využívá pro betony hutněné ponornými vibrátory nebo při výrobě na vibračních stolech.



Obr. 1 Ukázka ideální křivky zrnitosti podle Füllera a Bolomeye.

2.2. Alkalicko-křemičitá reakce

Alkalicko-křemičitá reakce (ASR) je dlouhodobá chemická reakce, která vede k narušení struktury a zhoršení materiálových vlastností betonu. Může způsobit destrukci betonu bezprostředně po realizaci konstrukce, ale i po letech užívání konstrukce, což činí tento destruktivní proces velmi nebezpečným. Vysokohodnotný beton, který obsahuje vysokou dávku cementu, a tedy i alkálií, a značné množství křemene v kamenivu, je potenciálně vystaven vzniku ASR, a proto je této problematice věnována pozornost. Obecně alkalicko-křemičitá reakce potřebuje pro svůj rozvoj podle Ichikawy [3] splnění tří podmínek:

- reaktivní SiO_2 , který se nachází v kamenivu,
- přítomnost alkálií,
- vlhkost.

Reaktivnost SiO_2

Podle Bílka [4] všechny druhy kameniva obsahují reaktivní SiO_2 , ale vliv na ASR je dán rychlostí jeho reaktivnosti (rozpuštěností). Rozpuštěnost a vysrážení SiO_2 se řídí termodynamickými a kinetickými faktory, které právě rozhodují o potenciální nebezpečnosti kameniva. Mezi faktory patří: druh krystalu SiO_2 , pH betonu, teplota betonu, velikost kameniva spolu s jeho měrným povrchem a přítomnost dalších prvků nebo sloučenin, které rozpouštění SiO_2 zpomalují, např.: $\text{Al}(\text{OH})_3$. Bílek [4] dále označuje vulkanické horniny za potenciálně velmi nebezpečné, především drobu, rohovec a bulžník. Ke stejným závěrům došla i Seidlová [5], která se ve své práci věnovala zkoušení vulkanických hornin k náchylnosti na ASR a pro svůj výzkum použila různá ložiska v Čechách. Seidlová ve své práci uvádí Tab. 3, ze které je patrné, že výše zmíněné horniny jsou také ve třídě vysoké reaktivnosti. Pro vývoj receptury vysokohodnotného betonu popisovaný v rámci této práce se předpokládá použití čediče z kamenolomu Soutěsky nebo Bílčice. Seidlová totiž zařadila čedič do třídy s nízkou reaktivností.

Přítomnost alkálií

Cementy používané pro vysokohodnotné betony jsou převážně z třídy CEM I o vaznosti 42,5 nebo 52,5, které obsahují vysoké množství alkálií. Dále podle Šaumana [6] nedávný přechod způsobu výroby cementu z mokrého na suchý sice ušetří $\frac{1}{4}$ energie, ale množství alkálií v cementu ještě zvýší.

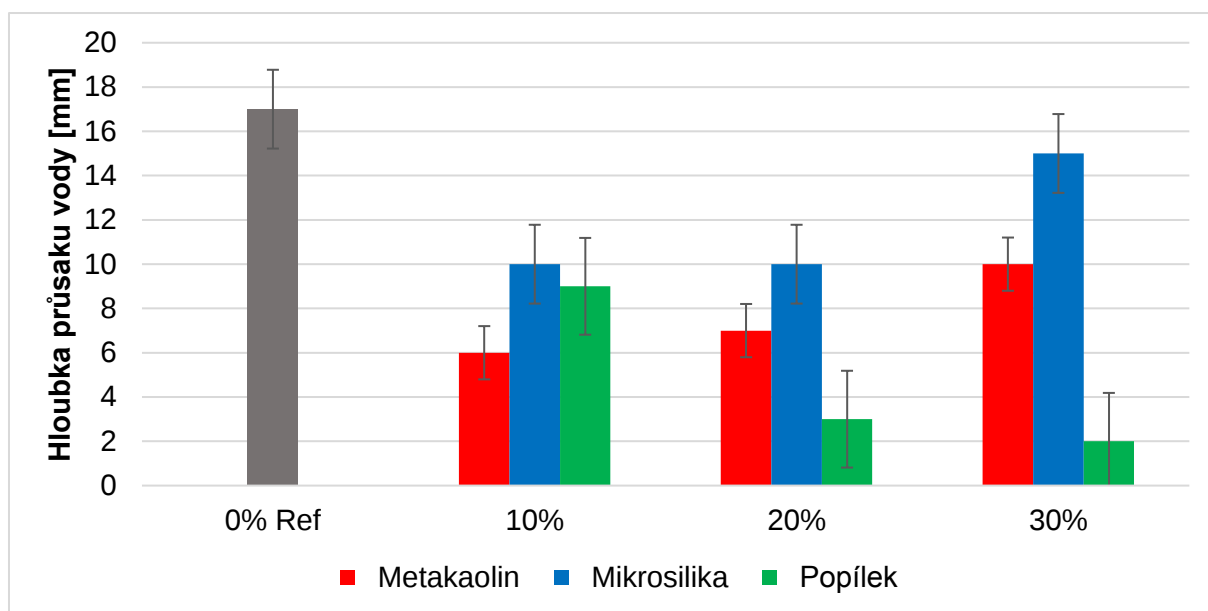
Celkové množství alkálií v cementu výrobce betonu ovlivnit nemůže, ale může ovlivnit dávku cementu. Extrémní snižování dávky cementu však není pro vysokohodnotné betony přípustné. Existuje pro ně jen jediný možný způsob úpravy množství alkálií, a to částečná náhrada cementu příměsí. Bílek [4] dokázal, že 20% náhrada hmotnosti cementu metakaolinem redukuje délkovou změnu způsobenou ASR pod rozlišovací schopnost měření. Podobné výsledky získal i s 30% náhradou hmotnosti cementu elektrárenským popílčkem. Při vývoji receptury vysokohodnotného betonu v rámci této práce byla také použita latentně hydraulická příměs s předpokládanou výší náhrady 10 až 20 % z hmotnosti cementu. Rozsáhlý realizovaný experiment je popsán v kapitole 4.

Tab. 3 Informativní rozdělení hornin podle reaktivnosti s alkáliemi [5].

Reaktivnost	Skupina hornin	Petrografický druh
Nízká	Magmatické	Granit, granodiorit, gabro, čedič , melafyr, diabas, spilit, znělec
	Sedimentární - zpevněné - nezpevněné	Vápence bez přítomnosti rohvců,
		Čistý křemitý písek (z druhohorních pískovců)
	Metamorfované	Granulit, amfibolit, hadec, krystalický vápenec
Střední	Magmatické	Ryolit, porfyr, porfyrit, melafyr s mandlovci
	Sedimentární - zpevněné - nezpevněné	Droba, slepencové droby
		Písek, štěrkopísek (dle oblasti výskytu)
	Metamorfované	Pararula, ortorula, rohovec, metamorfované prachovce, prachovcové břidlice
Vysoká	Magmatické	Ryolit, porfyr, porfyrit, vulkanické sklo, sopečný tuf, andezit
	Sedimentární - zpevněné - nezpevněné	Droba, vápenec s rohovcem organického původu, křemenec, dolomit ¹⁾
		Písek, štěrkopísek (dle oblasti výskytu)
	Metamorfované	Rohovec, metadroba, bulžník, kvarcit, deformované křemenné agregáty, pararula, ortorula
Vysvětlivky: ¹ U dolomitu se jedná o alkalicko – karbonátovou reakci - ACR (dedolomitizaci) s doprovodnou škodlivou objemovou změnou betonu - bez tvorby gelů.		

Vlhkost

Přínosy vysokohodnotného betonu se projeví nejvíce u konstrukcí vystavených vnějším klimatickým podmínkám, protože tyto betony jsou proti nim značně odolné. Z tohoto důvodu je nutné vlhkost cíleně sledovat a upravovat. Avšak vysokohodnotné betony mají velmi hutnou strukturu s minimem pórů a kapilár, čímž je omezen transport vody do jádra konstrukce a vlhkost ovlivňuje pouze povrchovou vrstvu. Experimenty provedené autorem této práce pro beton s různou dávkou náhrady cementu latentně hydraulickou příměsí například potvrdily, že navrhovaný beton je velmi hutný, protože průměrná hloubka průniku tlakové vody podle ČSN EN 12390-8 [7] je 7,5 mm. Výsledky měření jsou na Obr. 2 a jednotlivé receptury jsou uvedeny v Tab. 16.



Obr. 2 Výsledky měření hloubky průsaku tlakové vody.

Riziko alkalicko-křemičité reakce by u vysokohodnotných betonů při použití čedičového kameniva mělo být nízké. Je nutné si podmínky vzniku ASR uvědomovat při výběru kameniva, protože ve vysokohodnotných betonech jsou obsaženy vysoké dávky cementu, a tedy množství alkálií je dané.

2.3. Výběr vhodného zdroje kameniva

Vzhledem k mechanickým vlastnostem ukázaným v Tab. 1 a náchylnosti k alkalicko-křemičité reakci podle Tab. 3 bylo pro vyvíjenou recepturu zvoleno kamenivo čedičové. Jako zdroj byly vybrány dva kamenolomy - Soutěšky a Bílčice.

Kamenolom Soutěšky se nachází cca 6 km od Děčína proti proudu řeky Ploučnice. Česká geologická služba hodnotí lom takto: *Ložisko leží v centrální části Českého středohoří na pravém břehu řeky Ploučnice a tvoří morfologicky výrazný hřbet příkře upadající k jihu až jihozápadu. Ložiskovou výplň představuje kompaktní hornina šedočerné barvy, petrograficky určená jako nefelinový bazanit s proměnlivým podílem analcimu a natrolitu. Vznik ložiska se předpokládá na období oživení vulkanické činnosti v Českém středohoří v průběhu miocenu. K výstupu magmatu došlo pravděpodobně na trhlíně v křídovém podloží. Čedičové magma se pak rozlilo do tektoniky predisponované deprese směrem do údolí Ploučnice. Charakteristickým znakem ložiska je dokonalá sloupcovitá odlučnost. Sloupky dosahují průměru 15 - 30 cm, mají hladké a rovné hrany a dobrou štípatelnost kolmo k jejich ose. Hornina má hustě porfyrickou strukturu s ofitickou až granulofitickou strukturou základní hmoty [8].*

Kamenolom Bílčice se nachází nedaleko Opavy. Charakteristika kamenolomu podle České geologické služby: *Kamenolom Bílčice se nachází 27 km jihozápadně od Opavy. Lokalita je součástí lávového proudu Chřibského lesa stratovulkánu Velký Roudný. Lávový proud je kvartérního stáří a nasedá na pleistocenní štěrky a částečně na karbonské (kulmské) sedimenty. Vlastní ložisko je součástí dvou na sebe nasedajících lávových proudů. Spodní je*

tvořený nefelinickým bazanitem, svrchní alkalickým olivinickým bazaltem. Obě horniny (makroskopicky obtížně odlišitelné) jsou rovnocennou surovinou a v technické praxi jsou nazývány čedičem. Báze proudu je v prostoru obnaženém lomem ukloněna cca 5° k SV.

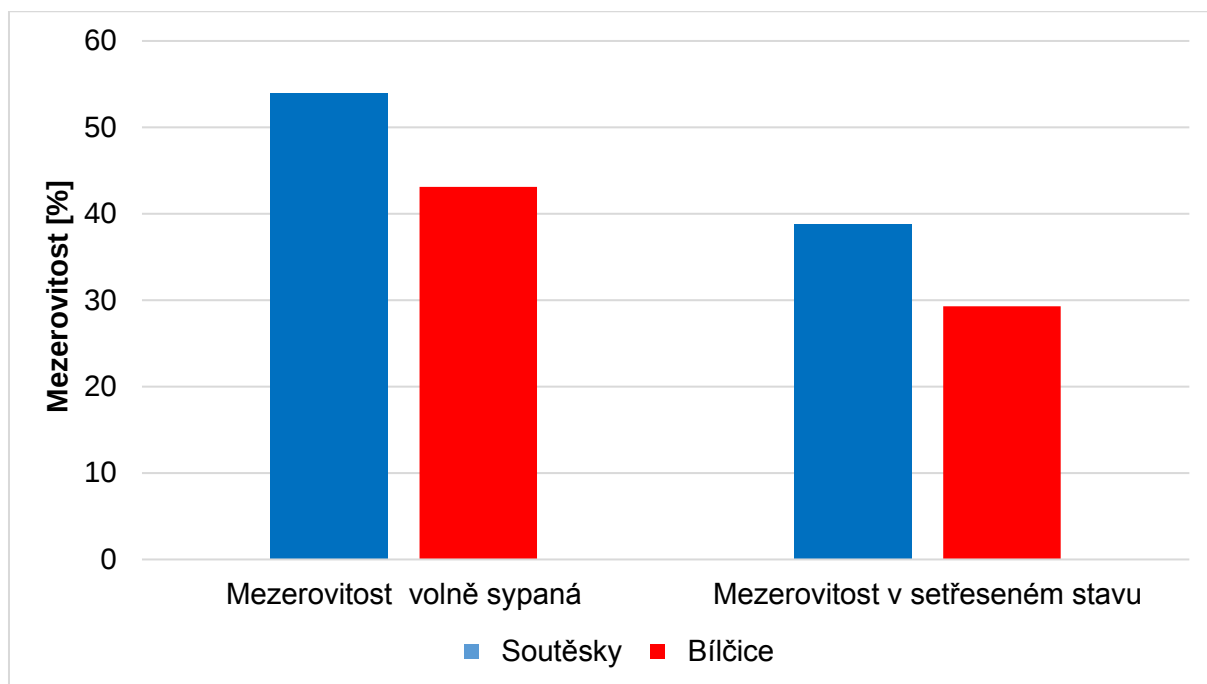
Na ložisku bylo dokumentováno několik typů čediče. Nejčastější je tmavě šedý, kompaktní nevýrazně porfyrický čedič. V jemnozrnné základní hmotě jsou řídké vyrostlice zeleného olivínu velikosti prvních mm, maximálně do 1 cm (někdy idiomorfně omezené). Ojediněle byly zjištěny suboválné xenolity, tvořené převážně bílým krystalickým křemenem a šedavě zeleným chloritem. V některých partiích jsou poměrně četné prázdné dutinky nepravidelného tvaru o velikosti max. prvních mm. Hornina je velmi pevná, většinou sloupcovitě odlučná. Sloupce o tloušťce prvních desítek cm jsou poměrně nepravidelné, často příčně rozpukané, charakteristický je jejich miskovitý povrch. Méně často jeví čedič deskovitou nebo nepravidelnou odlučnost. Druhým nejvýznamnějším typem je tmavě šedý až černý, často světleji mramorovaný, nevýrazně porfyrický **čedič s kuličkovitým (bobovitým) rozpadem**. Oba základní typy čediče do sebe přecházejí často bez ostrého rozhraní. V generelu je možno pozorovat pruhy jednotlivých typů o mocnosti prvních m zhruba paralelní s bází lávového proudu. Směrem k jihovýchodu přibývá kuličkovitého čediče na úkor kompaktního. Na bázi lávového proudu a na styku čedičového tělesa s tufovými vložkami při jeho okraji se vyskytuje silně pórovitý hnědavě tmavě šedý čedič struskovitěho vzhledu. V jihozápadní části lomu, v odvodňovacím příkopu a jeho okolí, byly v okrajové části čedičového tělesa nalezeny vložky okrového tufu [8].

Tab. 4 Porovnání základních vlastností obou kameniv.

Vlastnost	Kamenolom Soutěsky	Kamenolom Bílčice	Zkušební postup
Objemová hmotnost	3060 kg/m ³	2950 kg/m ³	ČSN EN 1097-5
Nasákavost	0,6 %	0,5 %	ČSN EN 1097-6
Tvarový index	1:3	1:1,5	ČSN EN 933-4
Rizikovost na reakci s alkáliemi	0,020 % po 16 dní	0,018 % po 16 dní	ČSN EN 1744-1
Mrazuvzdornost	F = 1,0 %	F = 0,6 %	ČSN EN 1367-1

Základní mechanické vlastnosti jsou pro oba kamenolomy dosti podobné, až na tvarový index, který je pro kamenolom Soutěsky horší. Problém s tvarovým indexem je popsán již v geologické zprávě, kde je uvedeno, že dochází k štípání čedičových sloupků kolmo k jejich ose. Štípání sloupků, stejně jako i jednotlivých zrn, je způsobeno podmínkami, za kterých čedič krystalizoval. Ke štípání obvykle dochází v případě, kdy se horké magma vylilo do moře a došlo tak k jeho rychlému zchlazení. Pokud se magma vylíje do horniny, je jeho chladnutí mnohem pomalejší a hornina lépe krystalizuje, což se projevuje ve vyšší kvalitě kameniva. Při prováděných zkouškách se ukázala tato vlastnost jako velmi omezující, protože se v kamenivu objevovala zrna s tvarovým indexem horším než 1:3, což už není pro použití v betonu přípustné.

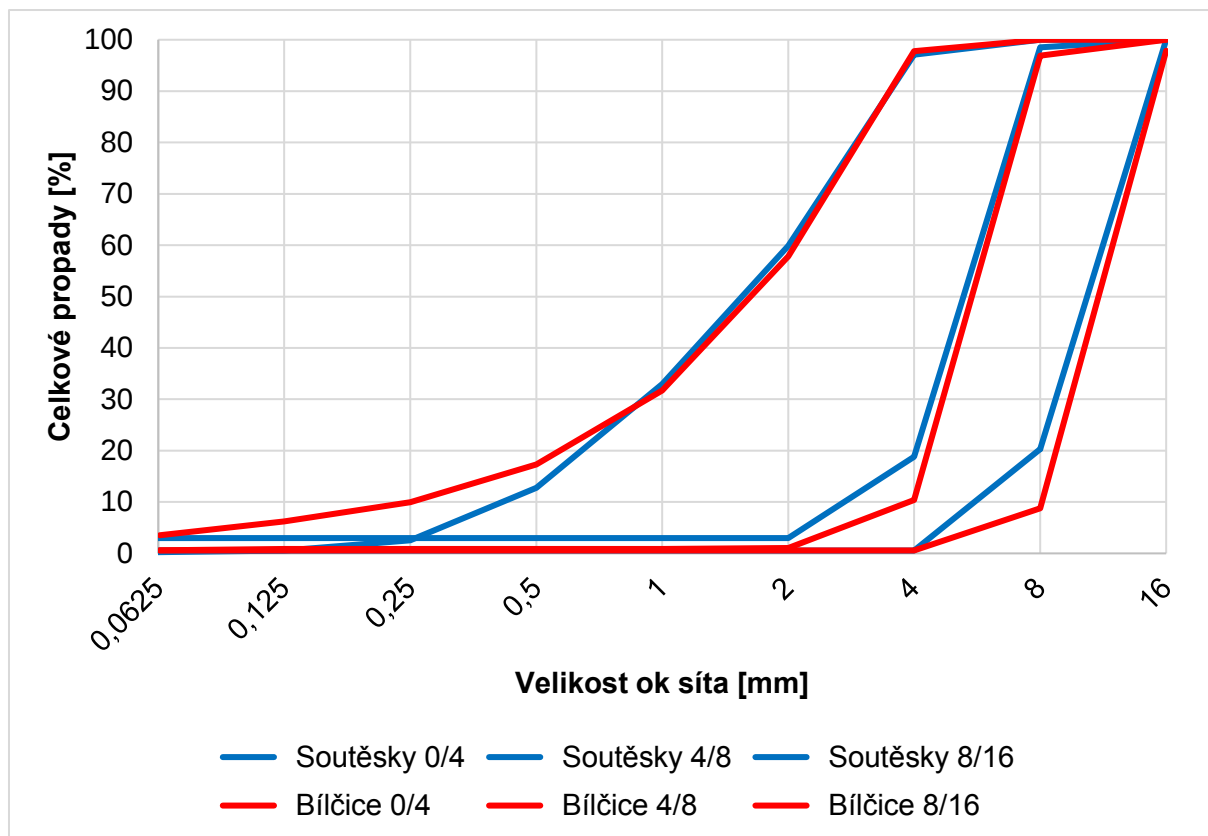
Nevhodný tvarový index zrn z kamenolomu Soutěšky se projevila i při měření mezerovitosti, protože jak ve volně sypaném, tak v setřeseném stavu vykazovalo kamenivo mezerovitost o 25 % větší než vzorek z kamenolomu Bílčice. Zvětšení mezerovitosti o 25 % by znamenalo nutnost použití značného množství jemných zrn, aby vzniklé mezery byly vyplněny.



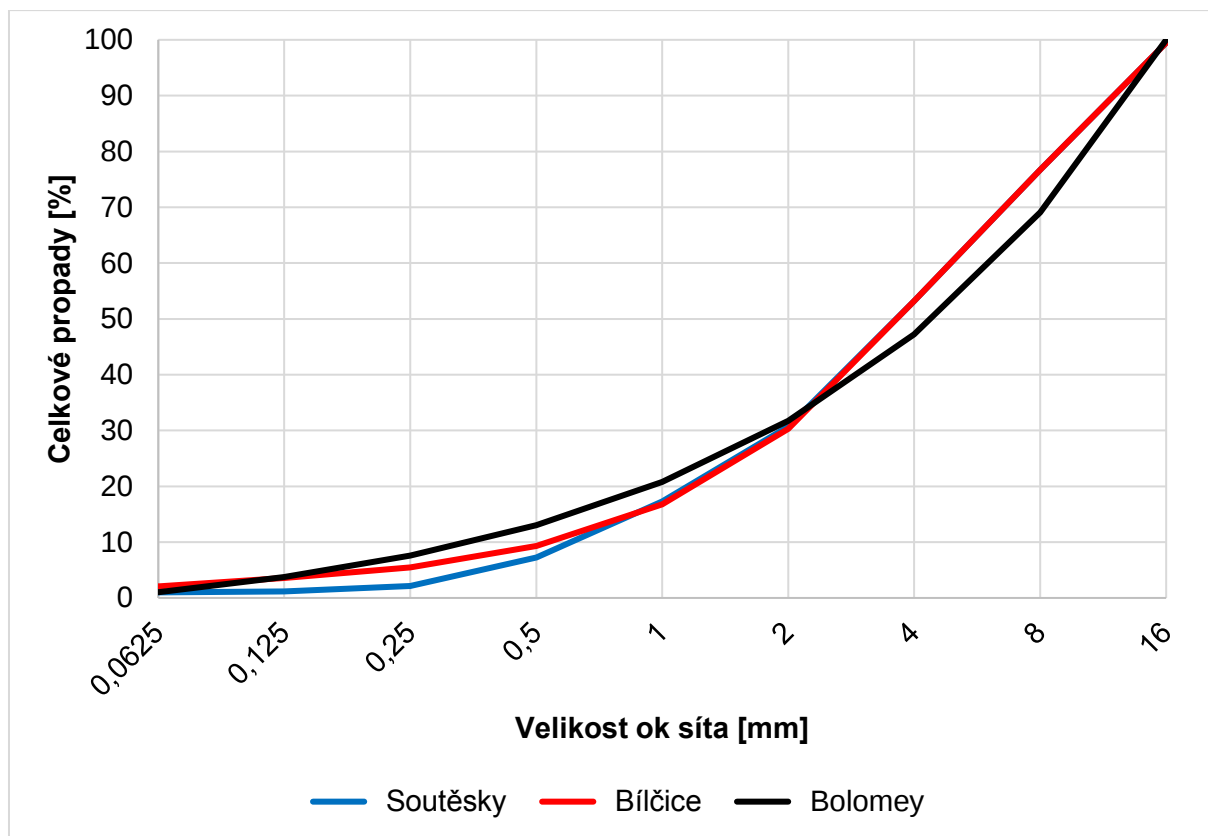
Obr. 3 Porovnání mezerovitosti kameniv.

Nejdůležitějším úkolem před návrhem receptury betonu je stanovit hmotnostní poměr míchání dodávaných frakcí kameniva tak, aby se výsledná zrnitost co nejvíce přibližovala ideální křivce. Prvním krokem bylo změření zrnitosti dodávaných frakcí kameniva z obou kamenolomů. Výsledek měření je uveden na Obr. 4. Oba typy kameniva jsou si granulometricky opět velmi podobné, jen kamenivo z Bílčic vykazuje větší množství jemných částic, které mohou zhoršovat vlastnosti výsledného betonu, jak je detailně popsáno v kapitole 2.5. V druhém kroku byl stanoven poměr míchání dodávaných frakcí tak, aby se granulometrie co nejvíce přiblížila Bolomeyově křivce, popsané v kapitole 2.1. Ve výpočtu Bolomeyovy křivky byla uvažována dávka cementu 500 kg/m^3 , což způsobuje, že ideální křivka zrnitosti na Obr. 5 začíná od hodnoty 0 %. Na Obr. 1 začíná originální Bolomeyova křivka na hodnotě 19,5 %, protože se zde dávka cementu nezohledňuje. Z idealizovaných křivek zrnitosti vyšel poměr míchání pro jednotlivé frakce, který je:

- 0/4 : 4/8 : 8/16 v poměru 2,0 : 1,0 : 1,0 – Soutěšky,
- 0/4 : 4/8 : 8/16 v poměru 2,2 : 1,0 : 1,05 – Bílčice.



Obr. 4 Porovnání granulometrie jednotlivých kameniv.



Obr. 5 Optimalizované křivky zrnitosti a jejich porovnání s Bolomeyovou křivkou.

Všechny realizované zkoušky kameniva vykázaly velmi podobné výsledky, lišily se pouze hodnotou tvarového indexu. Při pozdějších zkouškách se u betonu vyrobeného za použití kameniva z lomu Soutěsky potvrdil vliv nevhodného tvarového indexu, a to jak u čerstvého, tak u ztvrdlého betonu. Čerstvý beton byl méně pohyblivý a pro dosažení stejných parametrů konzistence bylo nutné zvýšit dávku superplastifikátoru. Beton měl také nižší kvalitu povrchu než při použití kameniva z Bílčic. Během destruktivních zkoušek ztvrdlého betonu bylo pozorováno usměrnění plochých zrn kameniva, takže beton vykazoval různé výsledky pro různé směry zatěžování, což je pro izotropní materiál nepřijatelné. Pro další vývoj receptury vysokohodnotného betonu bylo tedy dále používáno jen kamenivo z Bílčic.

2.4. Interakční tranzitní zóna

Vysokohodnotné betony mají nízký vodní součinitel a z tohoto důvodu i velice hutnou cementovou pastu. Při výrobě vysokohodnotného betonu se dále využívá kvalitní kamenivo o vysoké tlakové pevnosti a modulu pružnosti, které je nejpevnějším prvkem celé struktury betonu. V případě jednoosé tlakové zkoušky betonu splňující předchozí dvě podmínky dochází podle Aitcina [9] ke vzniku trhlin právě v přechodové oblasti mezi zrnem kameniva a ztvrdlou cementovou pastou, která se nazývá interakční tranzitní zóna (ITZ). Ztvrdlá cementová pasta i zrna kameniva totiž vykazují vyšší pevnosti než oblast ITZ.

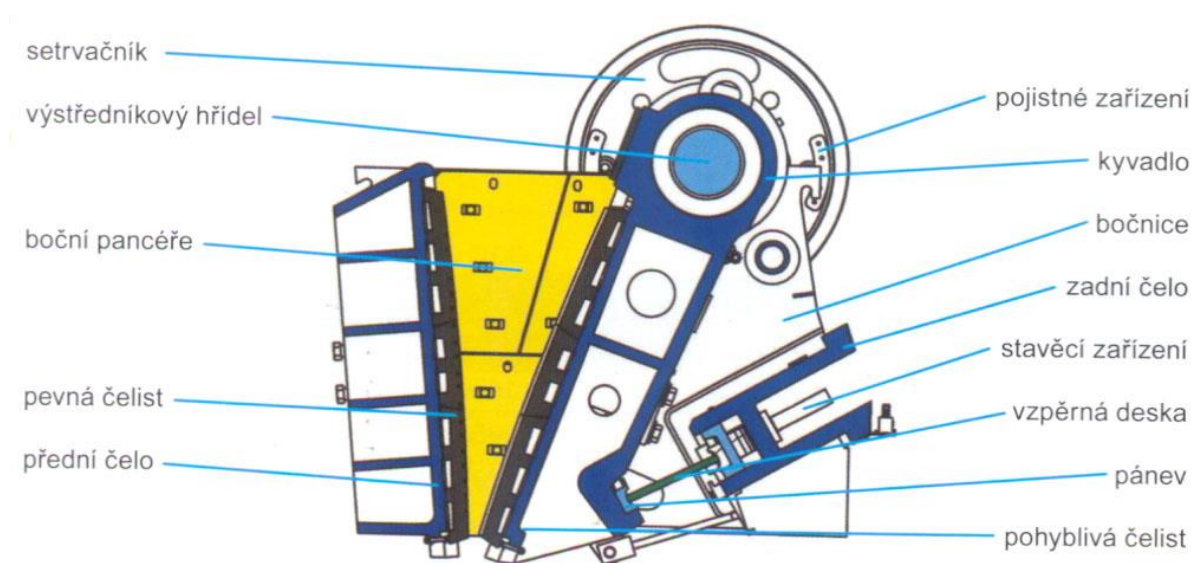
Ze statistického pohledu lze celou strukturu betonu rozdělit na řetězec prvků, které zastupují jednotlivé složky a každý prvek má stejnou pravděpodobnost porušení. Tato pravděpodobnost je ekvivalentní pravděpodobnosti výskytu Griffithovy trhliny kritické délky. Jestliže se taková trhlina šíří, elementy se postupně porušují. Protože betonová krychle je tvořena řetězcem prvků, signalizuje porušení jednoho prvku selhání celé krychle. Proto o celkové pevnosti betonové krychle rozhoduje prvek s nejmenší pevností, nikoliv průměrná pevnost všech elementů [2].

Zlepšení mechanických vlastností ITZ ve vysokohodnotném betonu (u běžných betonů také, ale přínos na tlakovou pevnost není tak výrazný) zvýší podle Masoa [10] jeho tlakovou pevnost, podle Bentura a Alexandera [11] se může jednat až o 30% nárůst. V ITZ má totiž cementová pasta vyšší vodní součinitel z důvodu fyzikálního zadržování vody a z důvodu jemného prachu zachyceného na povrchu zrn kameniva.

Lokální zvýšení vodního součinitele vede k lokálnímu nárůstu pórovitosti, a tedy k poklesu mechanických vlastností a trvanlivosti. Výzkum provedený Cwizernem a Penttalou [12] sledoval poškození mikrostruktury HPC různými druhy solí a mrazem. Výsledek jejich výzkumu jasně ukazuje, že veškeré škodlivé vlivy, kterým byl beton vystaven, se nejprve začaly projevovat v ITZ.

Jemný prach se dostává na povrch kameniva především procesem jeho výroby. Kamenivo pro vysokohodnotné betony se nejčastěji získává pomocí clonových odstřelů horniny, které se posléze drtí v drtičích. Drtič je jednoduché zařízení, které slouží k zmenšování kamenných bloků až na kamenivo. Nejčastěji se používají čelistové drtiče, což jsou zařízení, která se skládají ze dvou desek z velmi tvrdé a ořezuvzdorné manganové oceli. Jedna čelist je vždy pevná a s druhou pohybuje motor nebo hydraulický píst. Pro zvýšení účinnosti stroje je pohyblivá čelist doplněna o setrvačnick. Během chodu stroje se pohyblivá čelist přibližuje a oddaluje od pevné čelisti, tím dochází k tlakovému namáhání zrn kameniva. Obě čelisti mezi sebou svírají ostrý úhel, takže při rozlomení zrna na menší části dojde k propadu zrna do

nižších částí drtiče, kde se celý proces opakuje. Pro drcení tvrdých hornin je čelistový drtič efektivnější než například drtič odrazový, který je vhodnější pro měkké horniny.



Obr. 6 Schéma čelistového drtiče [13].

Po procesu drcení nastává třídění kameniva, nejčastěji pomocí několika sít, která mají různě velká oka a jsou uložena nad sebou a ve sklonu 15 až 20°. K sítům jsou připevněny vibrátory a jsou uložena na pružných podložkách. Sklon sít spolu s vibrací uvádí do pohybu jednotlivá zrna kameniva, která postupně propadávají otvory v sítích. Na konci síta je většinou umístěn pásový dopravník, který jednotlivé frakce kameniva odvádí na deponii.



Obr. 7 Třídíčka kameniva [13].



Obr. 8 Třídíčka kameniva s pásovými dopravníky [14].

Colleparidi [2] a Pytlík [15] uvádějí, že pokud nejsou jemné částice odstraněny, mohou oslabovat vazbu mezi kamenivem a cementovou matricí a zhoršovat tak mechanické vlastnosti betonu. Podle Colleparidiho [2] v důsledku toho nenastane přímo nebezpečí degradace konstrukce, proto nemůže být považována přítomnost jemných částic za stejně nebezpečnou, jako je přítomnost chloridů, síranů nebo reaktivních složek, které mají na trvanlivost betonu zásadní vliv. Pytlík [15] dále zmiňuje, že jemné částice ulpělé na zrnech hrubého kameniva mohou snížit mrazuvzdornost betonu.

Problematikou jemných částic se zabývají kromě vědeckých publikací také normy, a to ČSN EN 12620+A1 [16], která uvádí, že jemné částice v kamenivu se mohou považovat za neškodné, pokud je splněna podmínka, že celkový obsah jemných částic je menší než 3 %. Nikde však není přesně definováno, co je jemná částice. Norma ČSN EN 12620+A1 [16] považuje za jemnou částici kamenný prach do velikosti 0,063 mm, zatímco norma ČSN EN 206+A1 [17] považuje za jemnou částici veškeré pevné složky do velikosti 0,125 mm.

Nepříznivý účinek jemných částic na povrchu kameniva pro ITZ lze eliminovat praním hrubého kameniva. Cepuritis a Mørtzell [18] experimentálně ověřili, že při použití praného kameniva dojde ke zlepšení zpracovatelnosti betonu. Ke stejnému závěru dospěl Aitcin [9], pouze svá zjištění vyjádřil inverzně.

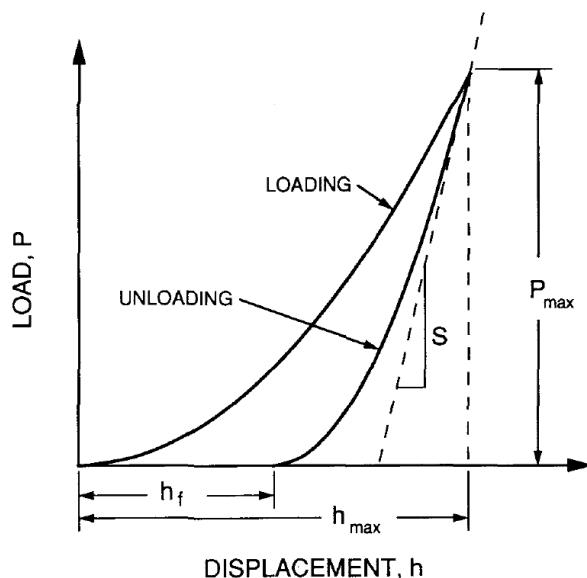
Oba nepříznivé vlivy (lokální zvýšení vodního součinitele a přítomnost jemného prachu) lze eliminovat, a tím zlepšit vlastnosti ITZ. Aitcin [9] navrhuje vliv lokálně zvýšeného vodního součinitele minimalizovat snížením celkového vodního součinitele betonu a problém s jemnými částicemi vyřešit praním kameniva. Obě úpravy vedou z mikroskopického hlediska ke stejnému výsledku, tedy ke snížení pórovitosti ITZ.

Další možností, jak zlepšit přechodovou oblast mezi zrnem kameniva a cementovou pastou, je redukce tloušťky ITZ, které lze dosáhnout použitím vhodné příměsi. Monteiro a Mehta [19] [20] hodnotí jako nejlepší příměs mikrosiliku, která dokáže snížit tloušťku ITZ z 50 μm na 10 μm .

Při vývoji vlastní receptury vysokohodnotného betonu i pro její následnou modifikaci byla věnována značná pozornost chování ITZ v daném betonu. U ITZ byla zkoumána její tloušťka a mechanické vlastnosti pomocí mikromechanických zkoušek. Jednalo se především o nanoindentaci, která byla doplněna výsledky spektrální analýzy. Mikromechanické zkoušky byly využity především při ověřování vlivu praní hrubého kameniva na změnu tloušťky ITZ (viz kapitola 2.5) a při hledání vhodné částečné náhrady cementu (viz kapitola 4).

2.4.1. Nanoindentace

Zkoušky nanoindentací probíhaly na přístroji Hysitron TI 700 tak, že přes inkriminovanou oblast byl proveden lineární scan. Postup scanování byl následující - do matrice byl vtlačen nanoindentor do hloubky 150 nm po dobu 5 sekund a následně byla hloubka držena po dobu 60 sekund, čímž byl do značné míry potlačen vliv krátkodobého dotvarování a viskoelastivity materiálu. Poslední fází bylo odtížení po dobu dalších 5 sekund. Scan pokračoval posunem nanoindentoru o 10 μm , kde se celý proces opakoval. Během celého procesu byla zaznamenávána síla a z odlehčovací větve diagramu byl vypočítán modul pružnosti podle Hookova zákona.



Obr. 9 Schéma zatěžování nanoindentoru [21].

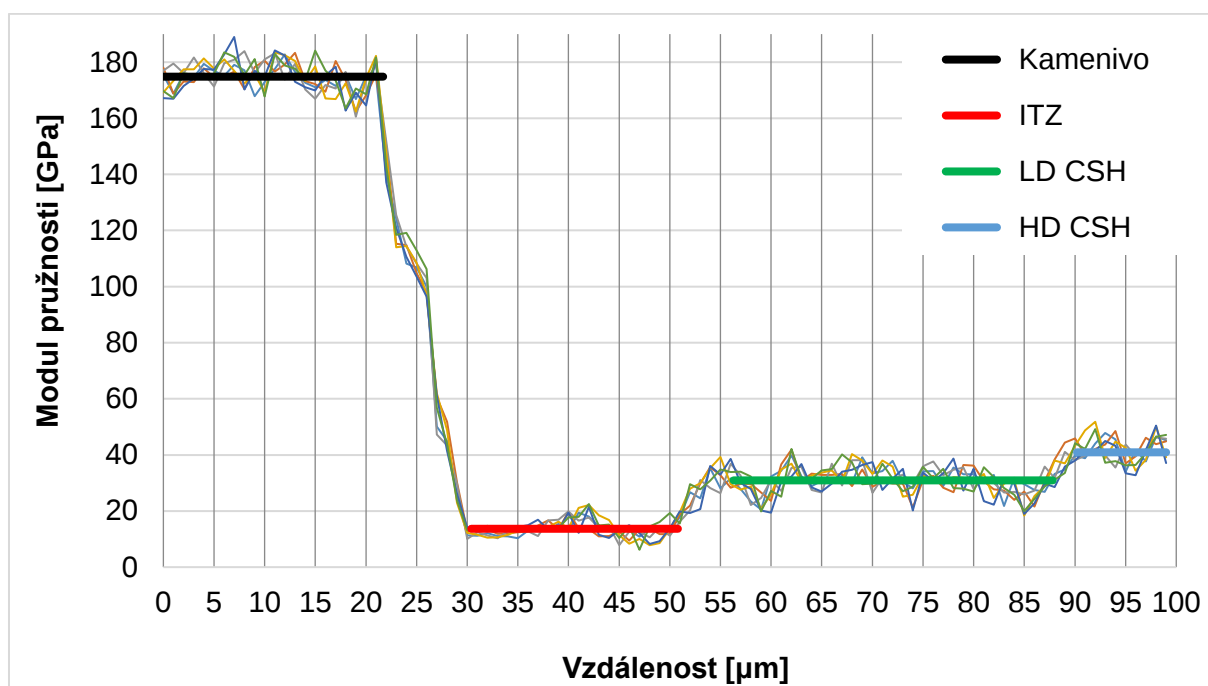
Ze získaných dat byl sestaven průběh modulu pružnosti v liniovém scanu, tedy přes přechod mezi zrnem kameniva a cementovou pastou. Z průběhu byly stanoveny rozsahy čtyř základních fází materiálu – kameniva, ITZ, LD CSH a HD CSH, viz Obr. 10.

Jako **ITZ** byla označena oblast s nejnižším modulem pružnosti, protože právě v přechodové oblasti mezi zrnem kameniva a cementovou pastou dochází k lokálnímu zvýšení vodního součinitele. Ke zvýšení vodního součinitele dochází vlivem stěnového efektu kameniva, které na svém povrchu váže více vody, než je běžný obsah v okolním prostředí. Lokální zvýšení vodního součinitele je umocněno i přítomností prachových částic na povrchu zrn kameniva.

CSH je hydrát křemičitanu vápenatého, který vznikl reakcí C_3S a C_2S s vodou. CSH nemá pevné složení, ale stechiometricky obsahuje přibližně 2x více CaO než SiO_2 [22].

LD CSH – jedná se o CSH (kalcium-silikát-hydrát) s nízkou hustotou, jehož mezerovitost je větší než 36 %. LD CSH se tvoří rychle a v počátečních fázích hydratace, vznikající krystalizační jádra se navzájem jen lehce dotýkají a tím vzniká hmota, která obsahuje značné množství kapilár a pórů [23].

HD CSH – jedná se o CSH s vysokou hustotou, jehož mezerovitost je menší než 26 %. HD CSH vzniká v pozdějších fázích hydratace a jednotlivé vznikající krystaly prorůstají mezi sebe, čímž vzniká pevnější hmota. Přechodová oblast mezi LD a HD CSH je označena jako LP CSH (Loose-Packed CSH) [23].



Obr. 10 Ukázka výsledků z měření modulu pružnosti nanoindentací.

2.4.2. Spektrální analýza

Druhým způsobem stanovování ITZ byla spektrální analýza prováděná elektronovým mikroskopem Phenom ProX se zvětšením 20 – 130 000x, doplněným o rentgenovou spektroskopii pro prvkovou analýzu.

Z důvodu urychlení analýzy probíhalo měření v jednotlivých bodech, které byly rozloženy přes přechod mezi kamenivem a cementovou pastou. V každém bodě byly vyhledány relevantní chemické prvky a z nich bylo dopočteno zastoupení jednotlivých sloučenin, viz Tab. 6.

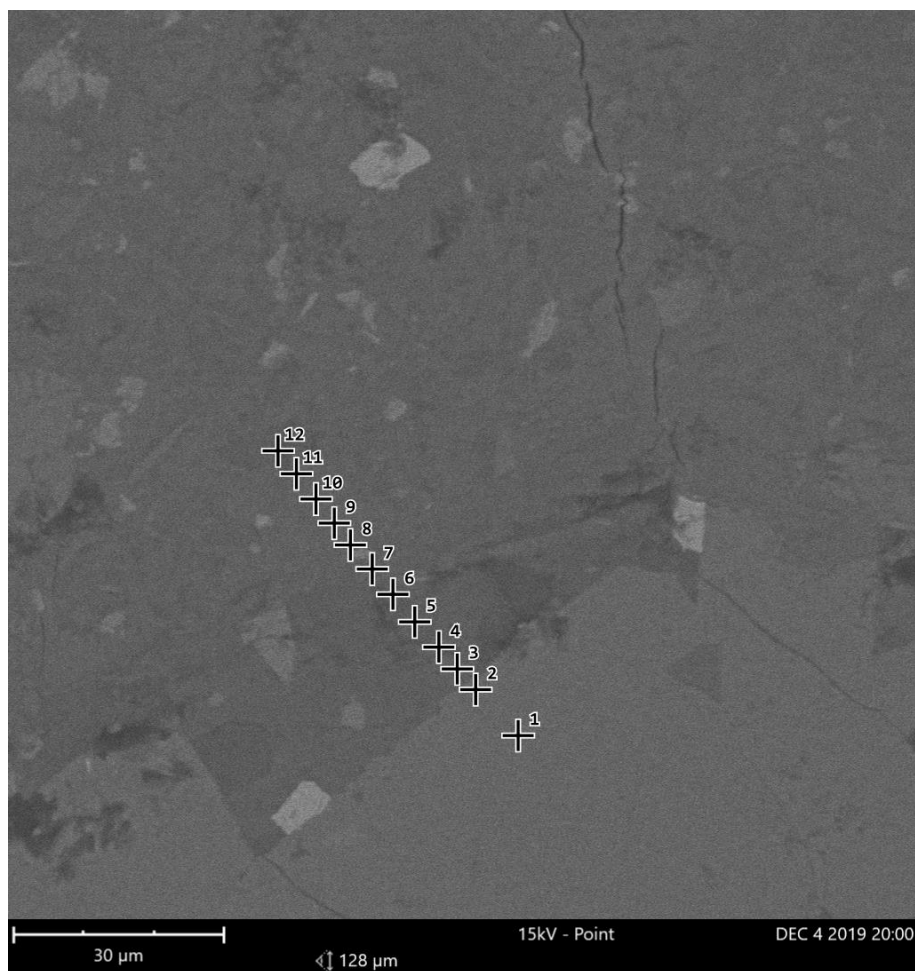
Po chemické analýze bylo nutné ze zastoupení jednotlivých prvků určit základní oblasti přechodu mezi zrnem kameniva a cementovou pastou, stejně jako v předchozím případě:

- CSH – hydrát křemičitanu vápenatého
- CH – hydroxid vápenatý $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- AFm – sloučenina Al_2O_3 s Fe_2O_3 s jedním molem CaSO_4 (vznik při reakci C_3A s vodou).

Zastoupení jednotlivých fází vycházelo z výzkumu Kjellsena a kol. [24], který publikoval následující tabulku. Podle Tab. 5 je možné určit přechodovou oblast na základě poměrů chemických prvků zjištěných během spektrální analýzy.

Tab. 5. Kritéria pro zařazení do jednotlivých fází [24].

CSH	$0,8 \leq \text{Ca} / \text{Si} \leq 2,5$	$(\text{Al} + \text{Fe}) / \text{Ca} \leq 0,2$	
CH	$\text{Ca} / \text{Si} \geq 10$	$(\text{Al} + \text{Fe}) / \text{Ca} \leq 0,04$	$\text{S} / \text{Ca} \leq 0,04$
AFm	$\text{Ca} / \text{Si} \geq 4,0$	$(\text{Al} + \text{Fe}) / \text{Ca} > 0,4$	$\text{S} / \text{Ca} > 0,15$

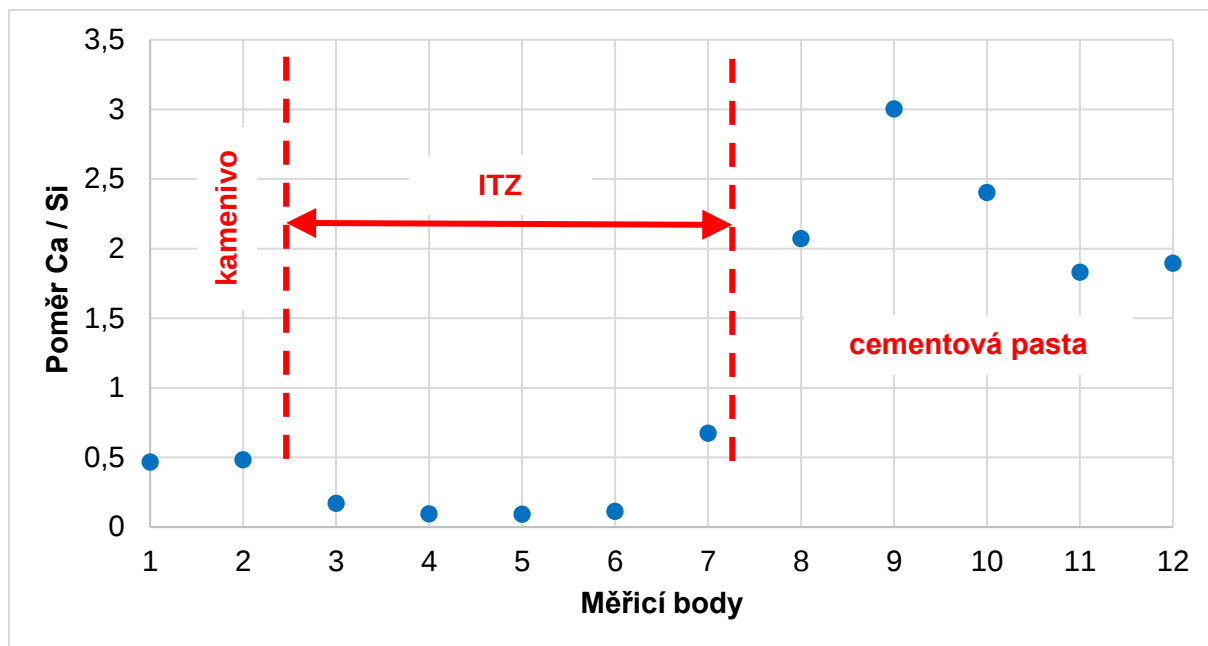


Obr. 11 Zvětšený vzorek z elektronového mikroskopu s vyznačenými body měření.

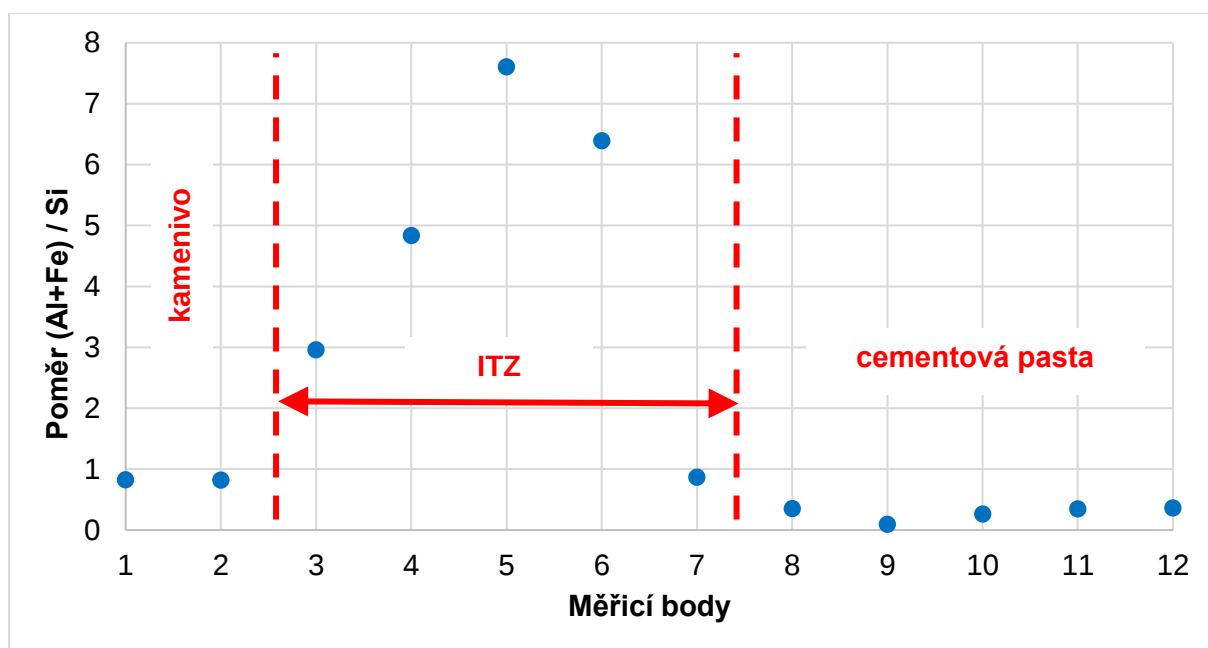
Tab. 6 Ukázka výsledků spektrální analýzy v bodě 1 (zrno kameniva).

Nalezené prvky	Poměrové zastoupení [%]	Váhové zastoupení [%]	Detekované oxidy	Váhové zastoupení oxidů [%]
Si	15,16	20,01	SiO ₂	47,01
Ca	7,09	13,36	CaO	20,52
Mg	5,99	6,85	MgO	12,47
Al	4,11	5,21	Al ₂ O ₃	10,82
Fe	1,70	4,45	Fe ₂ O ₃	6,99
Na	1,21	1,30	Na ₂ O	1,93
K	0,11	0,21	K ₂ O	0,27

Naměřené hodnoty ukazují, že žádný analyzovaný bod nesplnil podmínku pro AFm (poměr $\text{Ca/Si} > 4,0$), která by podle Rossignola [25] měla ukazovat na oblast ITZ. V těchto případech Rossignolo [25] doporučuje vyznačit tloušťku ITZ pomocí změny chování $(\text{Al} + \text{Fe}) / \text{Si} > 0,4$ (viz Obr. 13). Podle těchto pravidel byla stanovena tloušťka ITZ v ukázkovém vzorku na 23 μm .



Obr. 12 Poměr mezi Ca / Si v jednotlivých bodech měření.



Obr. 13 Poměr mezi (Al+Fe) / Si v jednotlivých bodech měření.

Pro stanovení tloušťky ITZ v této práci je vždy použita jedna z uvedených metod nebo jejich kombinace. V jednotlivých případech se liší pouze počty vzorků a hustota scanování přechodové oblasti mezi kamenivem a cementovou pastou.

2.5. Praní kameniva

Podle předpokladu z předchozí kapitoly by praní kameniva mělo zlepšit vlastnosti ITZ, a tím zvýšit i tlakovou pevnost vysokohodnotného betonu. Praní hrubých zrn kameniva je možné realizovat pomocí bubnové pračky nebo v krajním případě jen vodní clony. Bubnová pračka je rotační buben s lopatkami, který má osu rotace mírně nakloněnou. Ve spodní části je voda a zde je také přiváděno znečištěné kamenivo. Rotací bubnu je kamenivo následně vynášeno k horní části a cestou dojde k jeho očištění. Velká výhoda tohoto systému je uzavřený vodní okruh, jehož použití je ekonomické i ekologické. Znečištěná voda je posléze odčerpána do usazovacích nádrží a následně opět použita. Druhým, méně ekologickým způsobem je praní pomocí vodní clony, která může být umístěna na konci pásového dopravníku. Tento systém je zpravidla otevřený a vyžaduje neustálé dodávky vody.



Obr. 14 Bubnová pračka kameniva [13].



Obr. 15 Ukázka vodní clony [26].

2.5.1. Ověření vlivu praní hrubého kameniva na vlastnosti betonu

Teoretické předpoklady pozitivního přínosu praní kameniva byly experimentálně ověřeny pro čtyři různé receptury vysokohodnotného betonu. První byla referenční, další tři receptury obsahovaly určitý podíl jedné z uvedených latentně hydraulických příměsí – mikrosiliky (20 % hmotnosti cementu), popílků (30 % hm. c.) nebo metakaolinu (20 % hm. c.). Jednotlivé podíly jemných částí byly stanoveny na základě kapitoly 3.2.1. Použité pojivové složky byly:

- Portlandský cement CEM I 42,5 R Mokrý (Českomoravský cement, a.s.),
- Metakaolin „Mefisto L05“ (České lupkové závody a.s.), označení „Met“,
- Mikrosilika „Stachesil S“ (Stachema CZ s.r.o.), označení „Mic“,
- Popílek „ETU EN 450“ (Tušimice II, ČEZ a.s.), označení „Pop“.

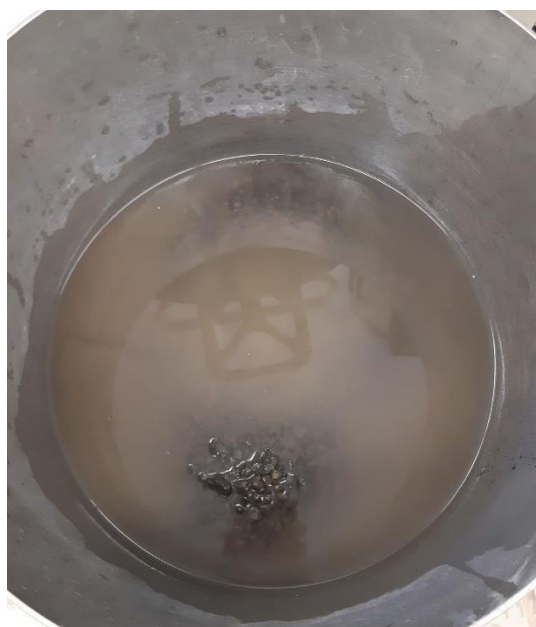
Zkoušky pozitivního vlivu praní hrubého kameniva proběhly na zkušebních tělesech vyrobených podle Tab. 7. Kamenivo bylo použito čedičové z kamenolomu Bílčice. Přínos praní kameniva byl ověřován na samotném kamenivu a pak na betonu vyrobeném z tohoto kameniva. U čerstvého betonu byla porovnávána konzistence pomocí zkoušky sednutí a u ztuhlého betonu byly porovnávány mechanické vlastnosti, a to hodnoty tlakové pevnosti a modulu pružnosti. Následně byly provedeny i mikromechanické zkoušky, které se zaměřily na vlastnosti ITZ. Všechna zkušební tělesa byla vyrobena ve dvou variantách, a to pro hrubé kamenivo bez úpravy a pro hrubé kamenivo prané.

Tab. 7 Receptura vyráběného betonu.

Složka	Specifikace	Ref [kg/m ³]	Mic [kg/m ³]	Pop [kg/m ³]	Met [kg/m ³]
cement	CEM I 42,5 R	800	640	560	640
příměs	mikrosilika	0	160	0	0
	popílek	0	0	240	0
	metakaolin	0	0	0	160
voda	-	210	252	177,1	216
w/b	-	0,26	0,26	0,27	0,27
kamenivo (čedič)	frakce 8/16	320	320	320	320
	frakce 4/8	390	390	390	390
	frakce 0/4	730	730	730	730
SPF	Stachement	25,0	30,0	29,5	28,0

Testy kameniva

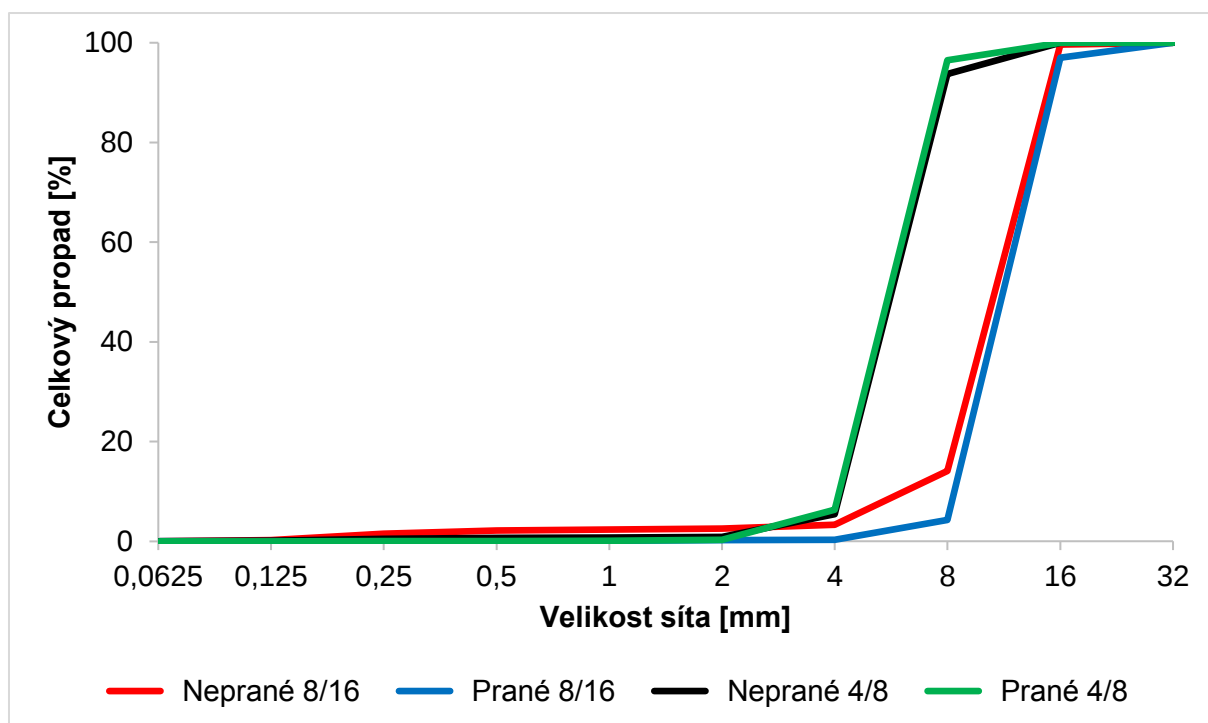
Praní kameniva probíhalo tak, že se hrubé kamenivo uložilo do vodní lázně v míchacím zařízení a následně bylo spuštěno míchání malou rychlostí po dobu 20 s. Poté bylo kamenivo sušeno v sušárně při teplotě 105 °C do ustálení hmotnosti. Před praním a po praní kameniva byla provedena prosévací zkouška, jejíž výsledky jsou ukázány na Obr. 18 a Obr. 19.



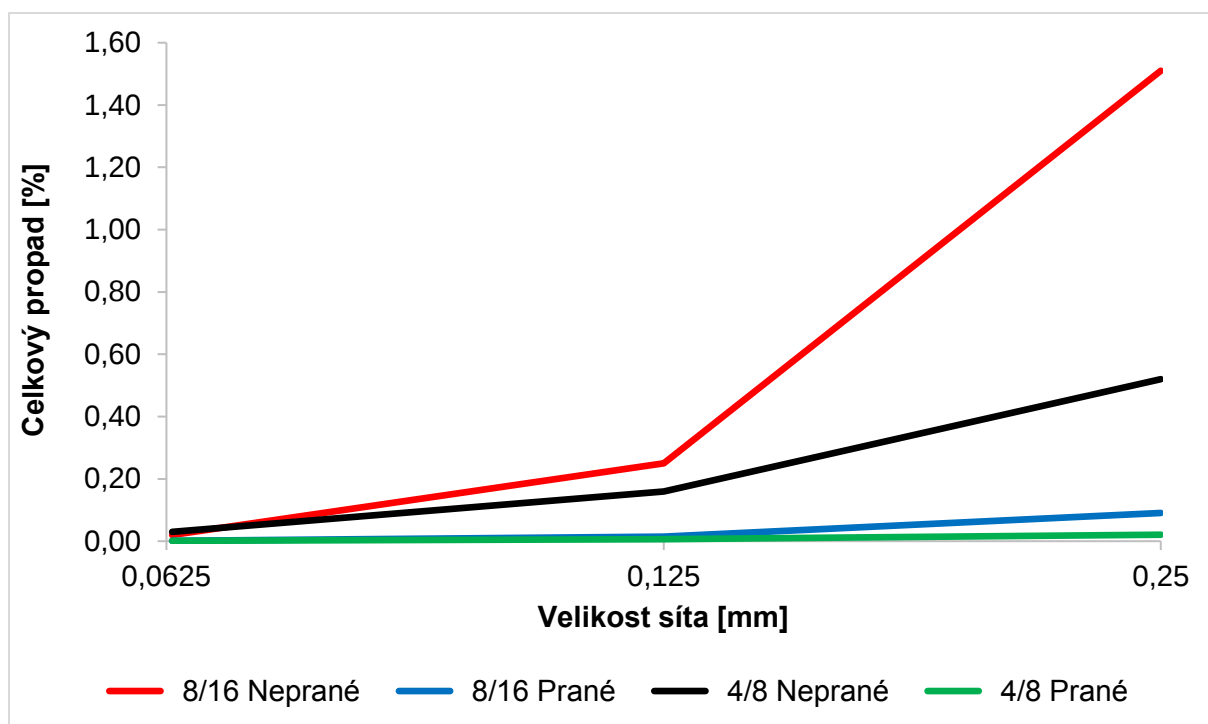
Obr. 16 Pohled do míchačky během praní kameniva.



Obr. 17 Sušení kameniva.



Obr. 18 Celkové porovnání křivky zrnitosti nepraného a praného kameniva.



Obr. 19 Zvětšený výsek porovnání křivky zrnitosti nepraného a praného kameniva.

Vliv praní kameniva není na celkové křivce zrnitosti prakticky zřetelný. Efekt je ale dobře pozorovatelný, pokud se zaměříme pouze na počátek křivky zrnitosti, tedy do velikosti zrna kameniva 0,25 mm, viz Obr. 19. Zde je jasně patrné, že došlo k odlupení jemných částí ulpělých na povrchu hrubých zrn.

Zkoušky konzistence čerstvého betonu

Všechny vzorky byly vyráběny podle receptury uvedené v Tab. 7, nebyla tedy provedena žádná korekce vody pro prané kamenivo. Konzistence byla měřena zkouškou sednutí kužele podle normy ČSN EN 12350-2 [27]. Naměřené hodnoty (viz Tab. 8) potvrzují předpoklad stanovený Cepuritisem a Mørtsellem [18] o zlepšení konzistence betonu při použití praného kameniva. Zjištěné zlepšení je však velmi malé. V některých případech došlo ke změně třídy konzistence z S3 na S4, ale to bylo způsobeno tím, že již před praním kameniva byla konzistence betonu na pomezí tříd konzistence.

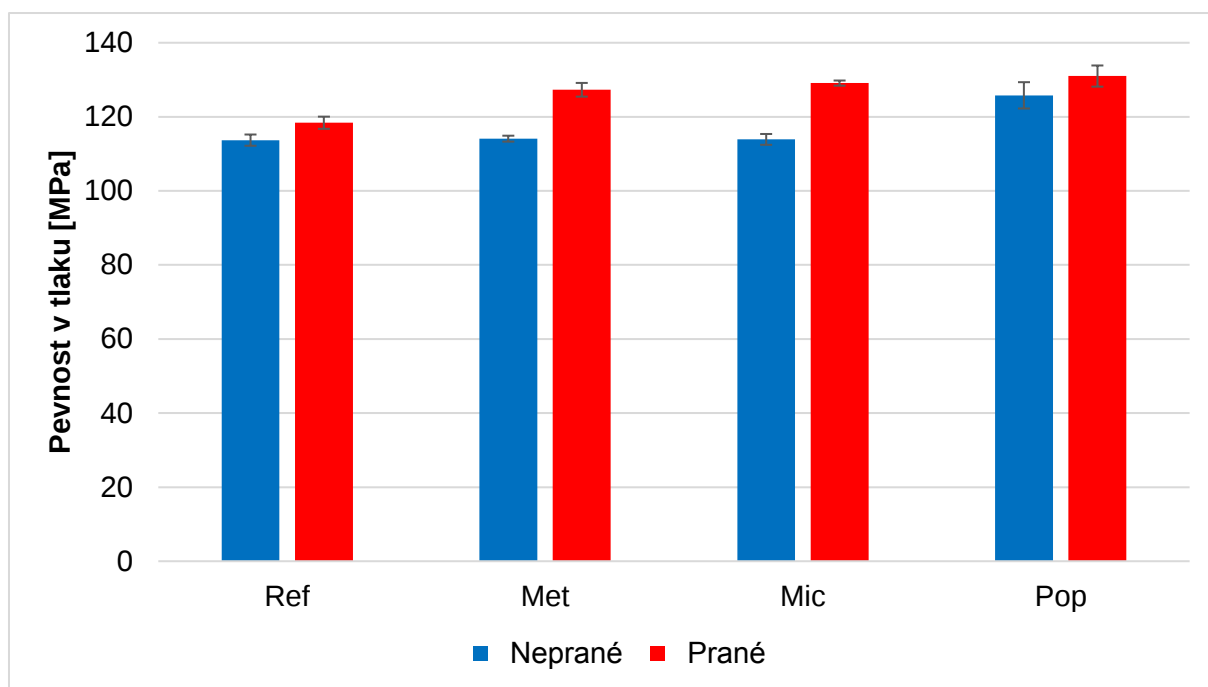
Tab. 8. Výsledky zkoušky konzistence.

Kamenivo	Receptura	Sednutí [mm]	Třída konzistence
Neprané	Ref	190	S4
	Mic	140	S3
	Met	150	S3
	Pop	120	S3
Prané	Ref	200	S4
	Mic	170	S4
	Met	180	S4
	Pop	130	S3

Zkoušky mechanických vlastností

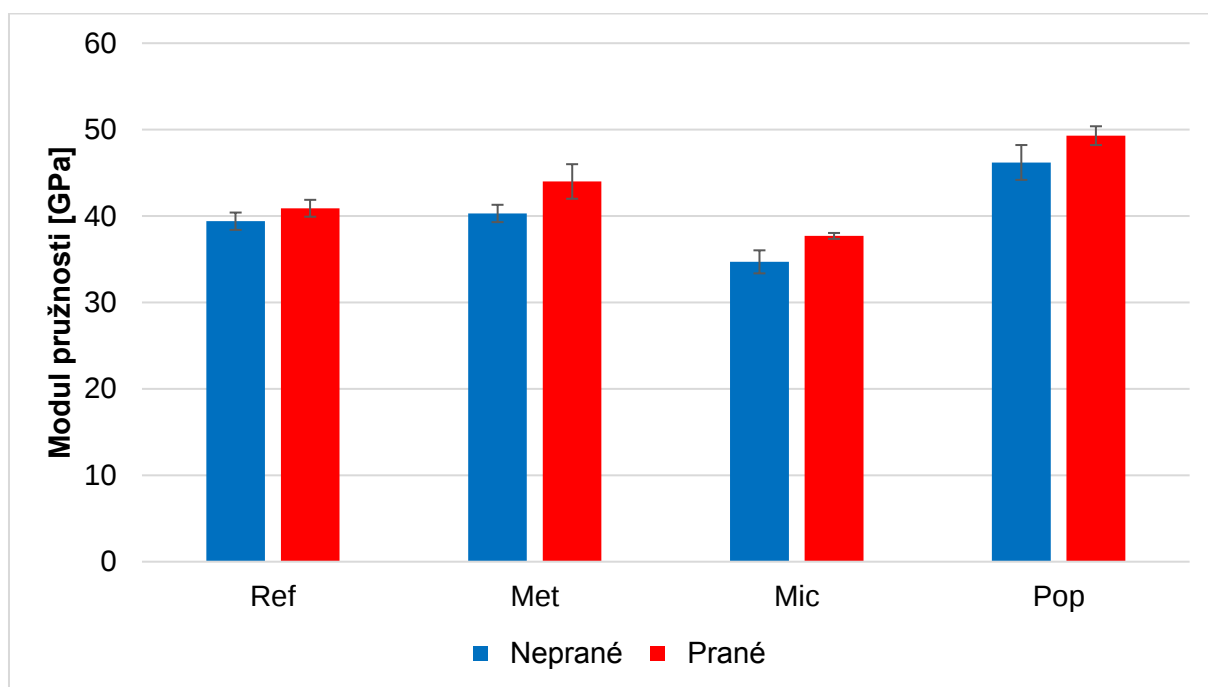
Dominantním ukazatelem efektivity praní kameniva byla tlaková pevnost. Tlaková pevnost se měřila na krychlích o hraně 150 mm. Z každé receptury bylo vyrobeno 12 zkušebních těles (6 těles z nepraného a 6 těles z praného kameniva). Zkoušení probíhalo ve stáří 28 dní od betonáže a podle platné normy ČSN EN 12390-3 [28]. Prezantované výsledky jsou vždy aritmetickým průměrem z realizovaných měření.

Tlakové pevnosti nepraného kameniva vycházely pro všechna zkušební tělesa přibližně stejně. Výjimkou byla jen receptura s mikrosilikou, kde byl rozdíl v tlakové pevnosti mezi praným a nepraným kamenivem o něco málo vyšší. Obecně praní hrubého kameniva vždy zvýšilo tlakovou pevnost betonu zhruba o 10 %.



Obr. 20 Výsledky tlakových pevností betonu s nepraným a praným kamenivem.

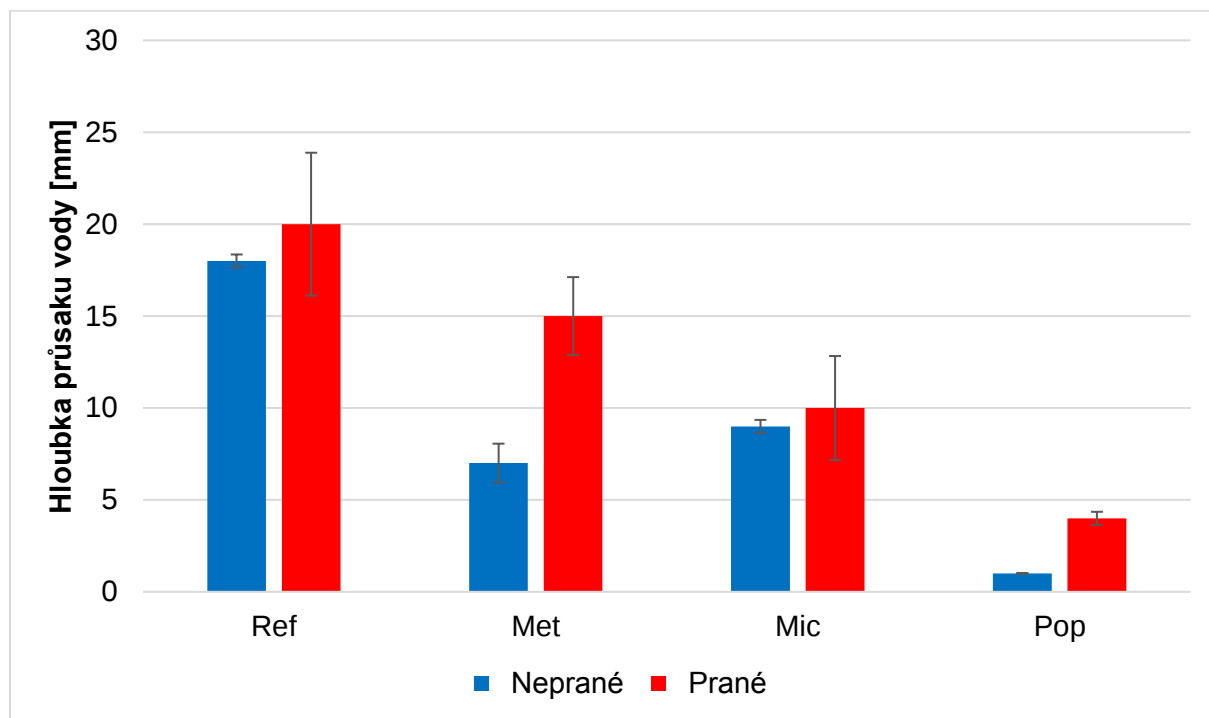
Druhou sledovanou mechanickou vlastností byl statický modul pružnosti. Měření probíhalo na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm. V tomto případě bylo vyrobeno jen 6 zkušebních těles od každé receptury (3 tělesa z nepraného a 3 tělesa z praného kameniva). Zkouška probíhala podle normy ČSN EN 12390-13 [29]. Prezentované výsledky jsou opět aritmetickým průměrem z realizovaných měření. Před zkouškou byla všechna zkušební tělesa zakoncována pomocí zabroušení. Broušení povrchu je u vysokohodnotných betonů prakticky jediná správná možnost úpravy povrchu pro statickou zkoušku modulu pružnosti podle České betonářské společnosti [30].



Obr. 21 Výsledky statického modulu pružnosti betonu s nepraným a praným kamenivem.

Výsledky zkoušek modulu pružnosti potvrdily pozitivní účinek praní kameniva u všech vzorků, ale nárůst hodnoty modulu pružnosti byl menší než u tlakové zkoušky, cca 7 %.

Poslední makromechanickou zkouškou bylo měření hloubky průsaku tlakové vody. Měření probíhalo podle normy ČSN EN 12390-8 [31] na zkušebních krychlích o hraně 150 mm. Podle každé receptury bylo vyrobeno 6 zkušebních těles od každé receptury (3 tělesa z nepraného a 3 tělesa z praného kameniva). Prezentované výsledky jsou opět aritmetickým průměrem z naměřených hodnot.



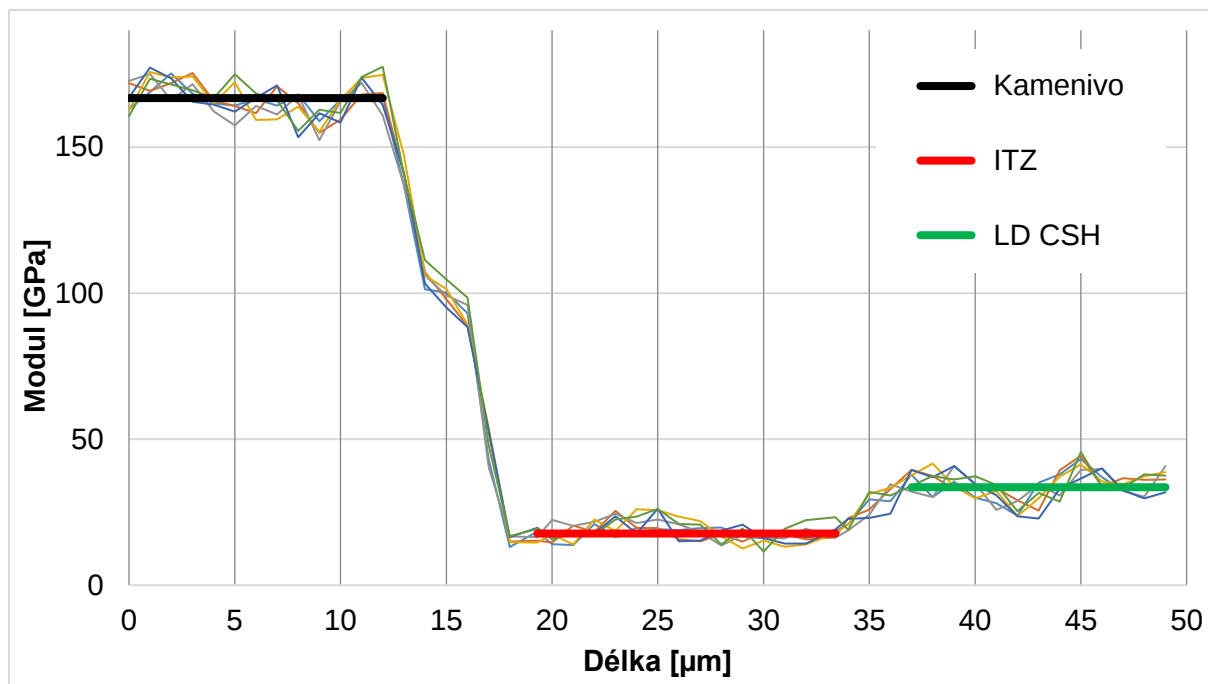
Obr. 22 Výsledky hloubky průsaku tlakové vody do betonu s nepraným a praným kamenivem.

Všechny výsledky vykazovaly velký rozptyl hodnot a těžko lze vysledovat mezi jednotlivými materiály nějakou tendenci. Pro referenční beton a beton s mikrosilikou se výsledná hodnota příliš nezměnila, ale pro recepturu s popílkem a metakaolinem byla změna významná, přičemž odstraněním jemných částic kameniva došlo k nárůstu hloubky průsaku.

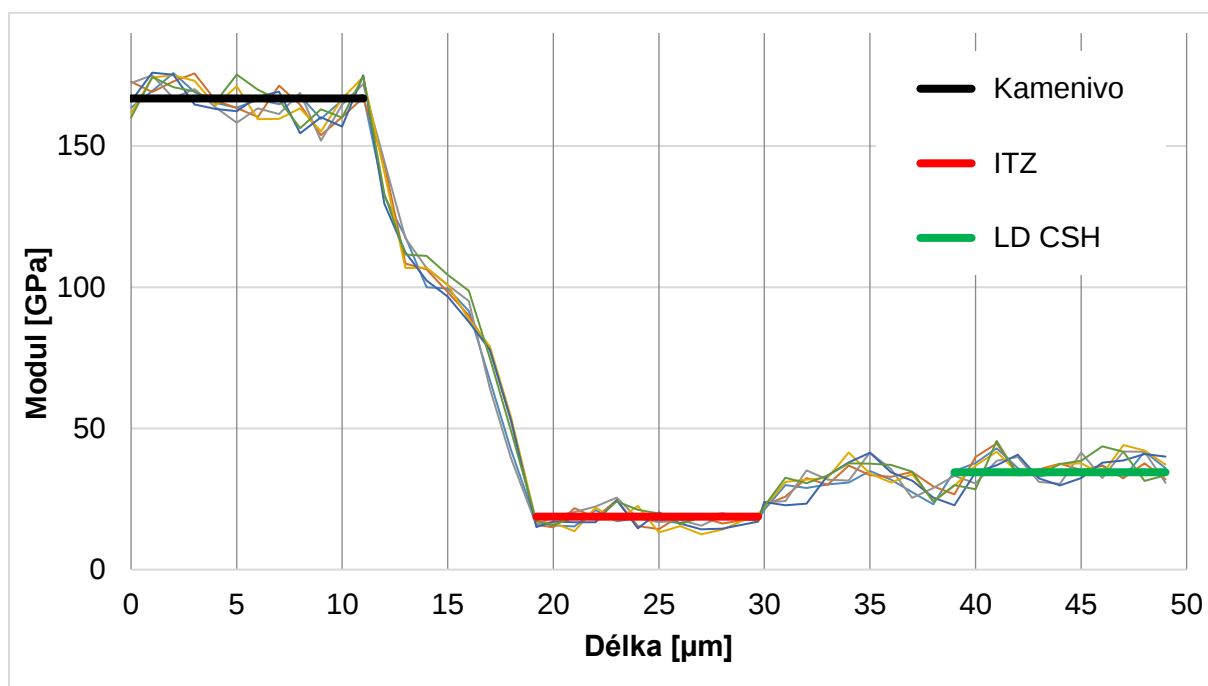
Mikromechanické zkoušky

Ověření pozitivního účinku praní hrubého kameniva na tloušťku ITZ a její mechanické vlastnosti probíhalo podle postupu popsaného v kapitole 2.4 tak, že byl z každého materiálu zhotoven jeden mikromechanický vzorek a na každém vzorku bylo realizováno šest měření vlastností ITZ.

Ze všech realizovaných zkoušek se nejvíce redukovala tloušťka ITZ u receptury s mikrosilikou, jak ukazují Obr. 23 a Obr. 24. U těchto vzorků došlo k redukci tloušťky ITZ o 25 %, což představuje pokles z 14,1 μm pro neprané kamenivo na 10,5 μm pro prané kamenivo. Detailní výsledky jsou patrné z Tab. 9.



Obr. 23 Záznam z liniových scanů u receptury s mikrosilikou pro neprané kamenivo [32].



Obr. 24 Záznam z liniových scanů u receptury s mikrosilikou pro prané kamenivo [32].

Tab. 9 Výsledky z mikromechanických testů betonu vyrobeného z praného a nepraného kameniva [32].

Receptura	Tloušťka ITZ [μm]	Redukce tloušťky ITZ [%]	Modul pružnosti LD CSH [GPa]	Modul pružnosti HD CSH [GPa]	Modul pružnosti kameniva [GPa]
Ref neprané	21,7	6,0	30,96 ± 3,63	41,03 ± 4,04	174,73 ± 5,49
Ref prané	20,4		30,92 ± 4,76	40,93 ± 5,08	174,82 ± 5,46
Mic neprané	14,1	25,5	33,54 ± 2,68	47,73 ± 4,14	166,79 ± 8,48
Mic prané	10,5		38,48 ± 4,67	48,77 ± 4,52	166,83 ± 5,82
Pop neprané	15,8	10,1	33,22 ± 4,43	51,52 ± 4,71	161,63 ± 5,46
Pop prané	14,2		33,22 ± 4,43	51,52 ± 4,71	161,63 ± 5,46
Met neprané	19,3	19,1	35,00 ± 4,71	54,61 ± 5,41	169,78 ± 5,50
Met prané	15,6		34,11 ± 3,64	52,59 ± 3,29	168,84 ± 8,53

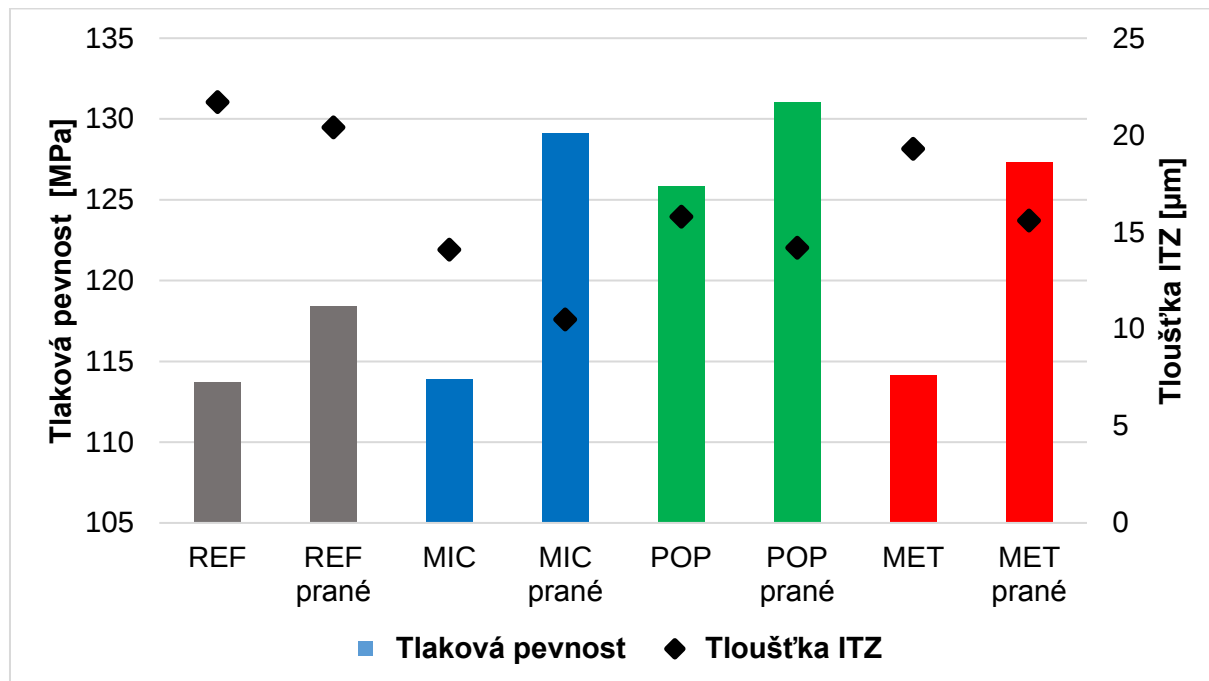
2.5.2. Rozbor výsledků přínosu praní kameniva

Výsledky zkoušek potvrdily předpoklady stanovené Collepardim [2] a Pytlíkem [15]. U sledovaných receptur bylo největšího přínosu dosaženo v případě pevnosti v tlaku. Hodnoty pro recepturu s mikrosilikou a metakaolinem byly zlepšeny o 12 – 13 %, pro recepturu bez příměsí a recepturu s popílkem jen o 4 %. Při uvážení aktuálního ceníku společnosti Českomoravský štěrk, a.s. praní hrubého kameniva zvýší cenu kameniva o 50 Kč/t oproti kamenivu nepranému. Zvýšení nákladů na výrobu 1 m³ zkoumaných betonů představuje cca 70 Kč, což by pro recepturu s mikrosilikou a metakaolinem byla zcela přijatelná cena za znatelné zlepšení pevnosti v tlaku.

Modul pružnosti rovněž u všech receptur po vyprání kameniva vzrostl (o 4 – 9 %), avšak změna tohoto parametru byla menší než odchylky měření, a proto je neprůkazná. V souladu s teoretickými závěry stanovenými Bolomeyem [2] došlo u všech receptur s praným kamenivem ke zvýšení hodnoty průsaku tlakovou vodou. Nárůst pro referenční recepturu a recepturu s mikrosilikou byl menší než 10 %. Rozdíly pro recepturu s popílkem a metakaolinem byly zásadní (+300 %, resp. +100 %), avšak absolutní naměřené hodnoty zůstaly stále velmi nízké (menší než 20 mm).

Zkoušky konzistence čerstvého betonu nepotvrdily závěry prezentované Cepuritisem a Mørtsellem [18]. Praním kameniva došlo ke zlepšení konzistence, ale změna byla velice malá. Hlavní důvod v rozdílných závěrech mezi prezentovanými výsledky a výsledky Cepuritis a MørtSELL [18] je v maximálním zrně kameniva. V realizovaných testech bylo použito maximální zrno kameniva 16 mm, ale Cepuritis a MørtSELL [18] používali $D_{max} = 4$ mm. Obecně z Lyseho pravidla [2] vyplývá, že použitím větších zrn kameniva zlepšíme zpracovatelnost. Je tedy možné, že změna měrného povrchu kameniva způsobená praním je menší pro kameniva s velkým D_{max} než pro kameniva s malým D_{max} . V tomto případě by pak změna konzistence byla pro velké D_{max} menší, což odpovídá naměřeným výsledkům.

Mikromechanické zkoušky ukázaly stejné výsledky, jako byl předpoklad Aitčina [9] – praní kameniva snižuje tloušťku ITZ, což se projevilo u všech testovaných vzorků. Ze získaných dat bylo možné sestavit závislost mezi nárůstem hodnoty tlakové pevnosti a poklesem tloušťky ITZ. Když z latentně hydraulických přísad vyloučíme mikrosiliku, která má řádově jinou jemnost mletí než ostatní látky, dostaneme dobrou shodu pro všechny ostatní vzorky, tedy že snížení tloušťky ITZ o 1 μm zvýší tlakovou pevnost betonu přibližně o 3,5 MPa, viz Tab. 10. Z grafu na Obr. 25 je dobře patrné, že nárůst tlakové pevnosti je vždy doprovázen poklesem tloušťky ITZ u všech zkoušených vzorků.



Obr. 25 Porovnání tloušťky ITZ s tlakovou pevností.

Tab. 10 Stanovení závislosti mezi redukcí ITZ a zvýšením tlakové pevnosti.

Označení	Tlaková pevnost [MPa]	Nárůst tlakové pevnosti vlivem praní kameniva [%]	Tloušťka ITZ [μm]	Redukce tloušťky ITZ [%]	Redukce o 1 μm zvýší tlakovou pevnost o [MPa]
Ref	113,7	4,13	21,7	5,99	3,6
Ref prané	118,4		20,4		
Mic	113,9	13,35	14,1	25,53	4,2
Mic prané	129,1		10,5		
Pop	125,8	4,13	15,8	10,13	3,3
Pop prané	131,0		14,2		
Met	114,1	11,57	19,3	19,17	3,6
Met prané	127,3		15,6		

3. Cement

Dosažení nejvyšších mechanických vlastností je u vysokohodnotného betonu možné pouze při použití nejvhodnějšího typu cementu. Nejvhodnější typ nemusí být nutně cement s nejvyšší vazností, ale záleží vždy na jeho složení a kvalitě zdroje surovin pro jeho výrobu. V České republice se nevyrábí cement výlučně určený pro vysokohodnotné nebo vysokopevnostní betony. Tato skutečnost má dva důvody. Předně je objem výroby vysokohodnotných betonů zlomkový proti běžnému betonu, a tedy i speciálního cementu by se spotřebovávalo jen zanedbatelné množství, což by výrazně zvýšilo již tak vysokou cenu vysokohodnotného betonu. Druhým důvodem je, že i s dosavadními produkty cementářského průmyslu se dá zhotovit beton s tlakovou pevností kolem 200 MPa, což je zcela dostačující hodnota.

3.1. Výběr vhodného druhu cementu pro vysokohodnotný beton

Pro vývoj receptury vysokohodnotného betonu byly testovány tři produkty firmy Českomoravský cement, a.s., které byly mezi sebou porovnány z různých hledisek. Porovnání probíhalo ve spolupráci s výrobcem. Vhodnými kandidáty byly zvoleny následující cementy:

- CEM I 42,5 R závod **Radotín**
- CEM I 42,5 R závod **Mokrá**
- CEM I 52,5 R závod **Mokrá**

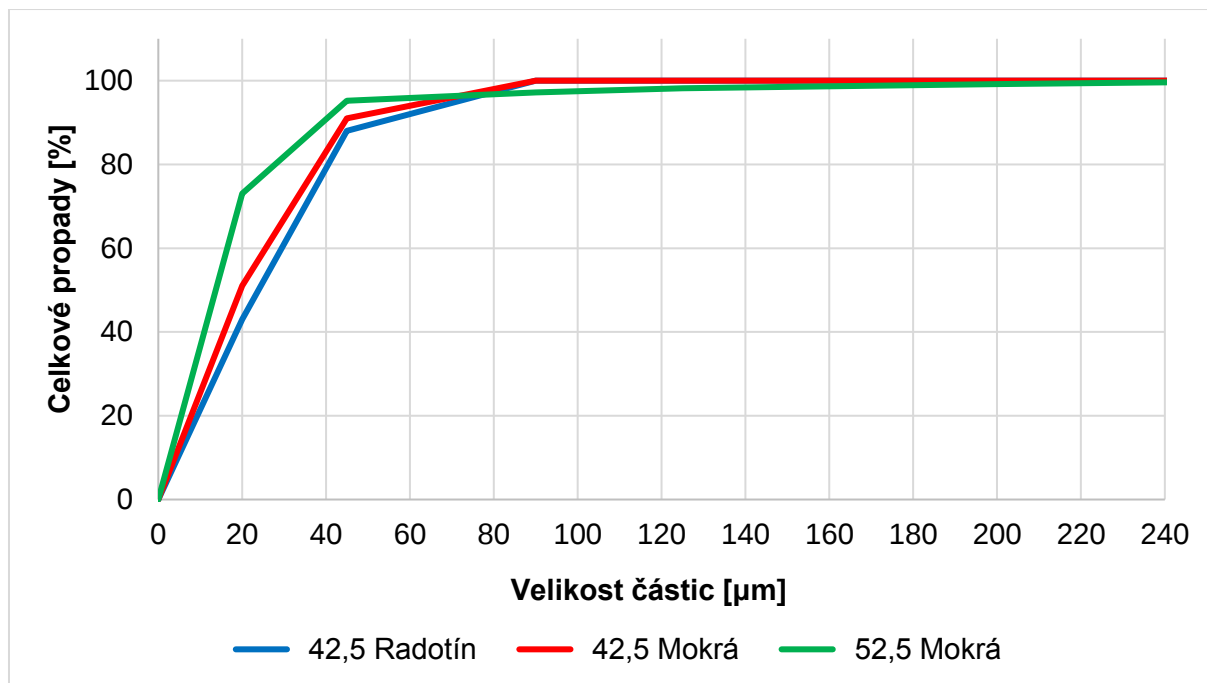
3.1.1. Užité vlastnosti zkoumaných cementů

První porovnání bylo zaměřeno na užité vlastnosti zkoušených cementů, jako jsou časy počátku a konce tuhnutí. Z výsledků uvedených v Tab. 11 je patrné, že rozdíl mezi cementy třídy 42,5 je minimální. Výrazný rozdíl je mezi třídou 42,5 a 52,5, kde je počátek i konec tuhnutí urychlen zhruba o 60 minut. Časový úsek mezi počátkem a koncem tuhnutí je ale pro oba cementy z Mokré zhruba stejný. Cement z Radotína má pomalejší tuhnutí, časový úsek mezi počátkem a koncem tuhnutí je o 35 % delší než u cementů z Mokré.

Tab. 11 Užité vlastnosti zkoumaných cementů [33].

Vlastnost	CEM I 42,5 R Radotín	CEM I 42,5 R Mokrá	CEM I 52,5 R Mokrá
Počátek tuhnutí [min]	199	188	139
Konec tuhnutí [min]	280	256	195
Délka tuhnutí [min]	81	68	56
Měrný povrch [m ² /kg]	360	391	508
Měrná hmotnost [kg/m ³]	3 080	3 110	3 140
Hydratační teplo – 7 dní [J/g]	320	310	370

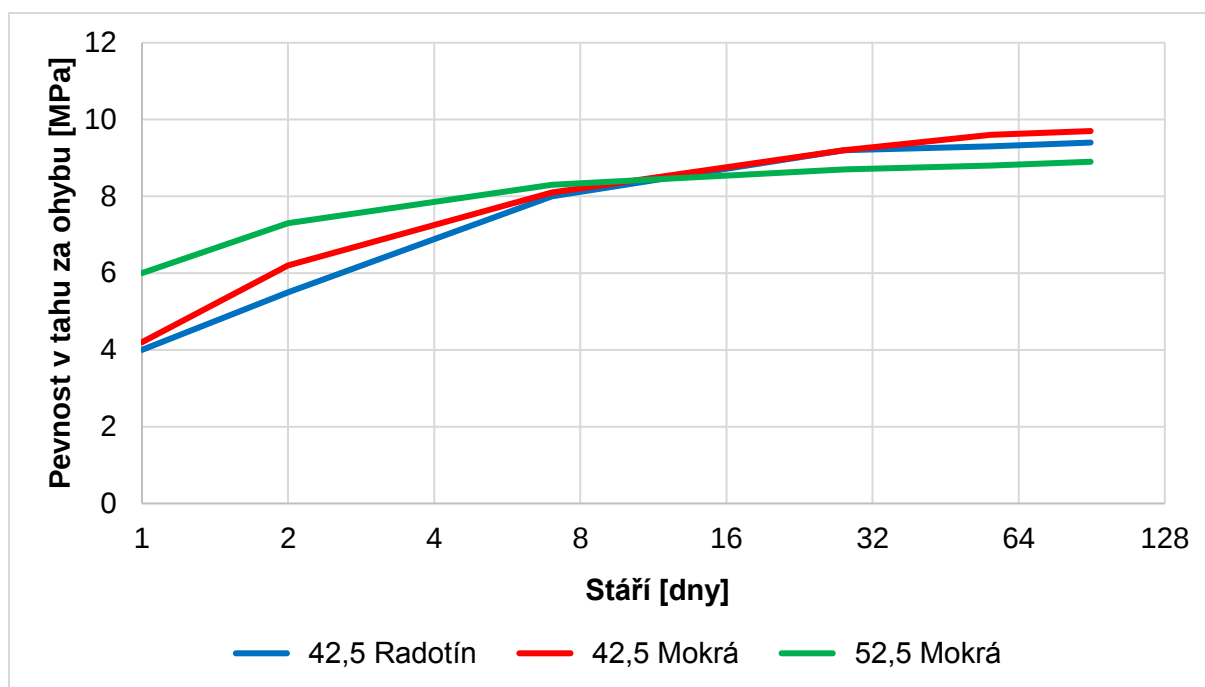
Jemnost mletí cementu je určující parametr pro chování cementu během počátku hydratace, proto byla velikost částí cementu zkoumána detailněji pomocí laserové granulometrie. Výsledek je na Obr. 26. Z výsledku je patrné, že oba cementy třídy 42,5 mají nejen podobný měrný povrch, ale i podobné zastoupení jednotlivých velikostí částic. Rozdílné hodnoty byly naměřeny pro cement třídy 52,5, který je jemněji mletý.



Obr. 26 Křivka zrnitosti cementu, pořízená pomocí laserové granulometrie [33].

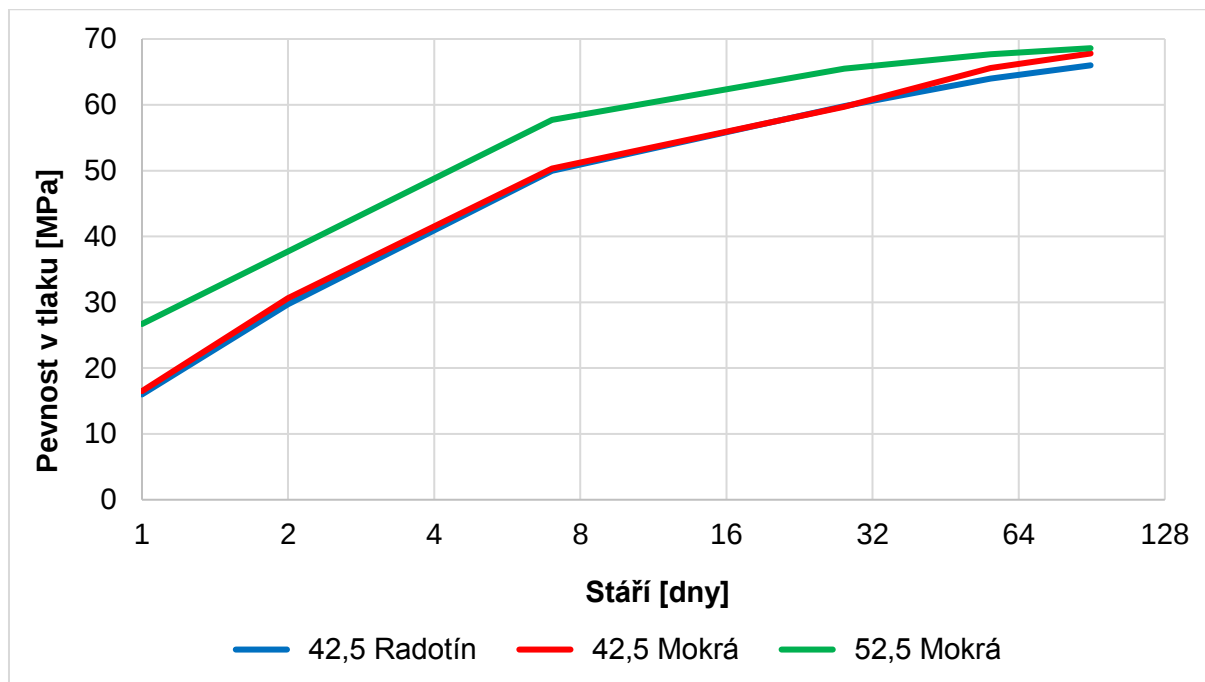
3.1.2. Vývoj mechanických pevností zkoumaných cementů v čase

Zkoušení mechanických vlastností probíhalo na cementových trámcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm vyrobených a zkoušených podle normy ČSN EN 196-1 [34]. Zkoušení probíhalo vždy na třech zkušebních tělesech a ve stáří vzorku 1, 2, 7, 28, 56 a 90 dní.



Obr. 27 Vývoj pevnosti v tahu za ohybu na trácích 40 x 40 x 160 mm [33].

Nejprve byla na trácích měřena tahová pevnost cementové malty. Tahová pevnost byla zjišťována pomocí tříbodové ohybové zkoušky. Na zbytcích zkušebních těles po tahové zkoušce byla stanovena tlaková pevnost cementové malty při zkoušce se zatěžovací plochou o velikosti 40 x 40 mm.



Obr. 28 Vývoj tlakové pevnosti cementové pasty na zbytcích tráců 40 x 40 x 160 mm [33].

3.1.3. Chemické porovnání zkoumaných cementů

Poslední porovnávací zkouškou bylo zjištění zastoupení jednotlivých slínekových minerálů. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 12 a uvedené hodnoty byly dodány výrobcem cementu. Dopady rozdílného zastoupení slínekových minerálů na vlastnosti cementu objasňuje Tab. 13, ve které jsou uvedeny základní vlastnosti jednotlivých slínekových minerálů.

Tab. 12 Zastoupení slínekových minerálů pro jednotlivé druhy cementu [33].

Vlastnost	CEM I 42,5 R Radotín	CEM I 42,5 R Mokrá	CEM I 52,5 R Mokrá
C ₃ S [%]	73	67	67
C ₂ S [%]	6	11	11
C ₃ A [%]	9	7	7
C ₄ AF [%]	9	11	11

Tab. 13 Základní vlastnosti slínekových minerálů [15].

Slínekový minerál		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Počátek reakce po zamíchání s vodou		2–4 hodiny	14-16 dnů	ihned	5–10 minut
Objemová stálost		stálý	stálý	nestálý	stálý
Smrštění		střední	malé	výrazné	malé
Chemická odolnost		úměrná	úměrná	malá	dobrá
Hydratační teplo kJ.kg ⁻¹		500	250	1 350	420
Pevnost v tlaku v MPa	za 28 dní	50	10	5	3
	za 180 dní	65	50	8	5
Stupeň hydratace v %	za 3 dny	61	18	56	31
	za 7 dní	69	30	62	44
	za 28 dní	73	48	82	66
	za 180 dní	74	66	96	91

3.2. Rozbor výsledků výběru vhodného cementu

Z realizovaného srovnání cementů jasně vyplývá, že obě pevnostní třídy cementu vyrobené v závodě Mokrá se liší pouze jemností mletí. Tuto skutečnost dokazuje Tab. 12, kde je patrné stejné zastoupení jednotlivých slínekových minerálů u obou cementů z Mokré. To naznačuje stejné vstupní suroviny pro výrobu i stejný výrobní postup. Z Tab. 11 a Obr. 26 vyplývá, že jediný rozdíl mezi oběma cementy je v jemnosti mletí, která se liší o cca 30 %. Jemnější mletí má u cementu 52,5 za následek urychlení počátku a konce tuhnutí zhruba o 60 minut, ale také vyšší vývoj hydratačního tepla o cca 20 %. Jemnější mletí se pozitivně projevilo na rychlejším nárůstu tlakové pevnosti v počátečních fázích hydratace, od stáří vzorků 56 dnů a dále byl rozdíl v takové pevnosti mezi jednotlivými vzorky minimální.

Rozdíl mezi oběma cementy třídy 42,5 byl až na rozdíly v zastoupení slínekových minerálů prakticky minimální a bylo obtížné rozhodnout, který z cementů je vhodnější. Rozhodujícím faktorem bylo nakonec hledisko trvanlivosti, a tedy zastoupení C_4AF , které je u cementu z Mokré vyšší. Vyráběný beton by měl mít vzhledem k plánovanému využívání pro exteriérové konstrukce vyšší chemickou odolnost.

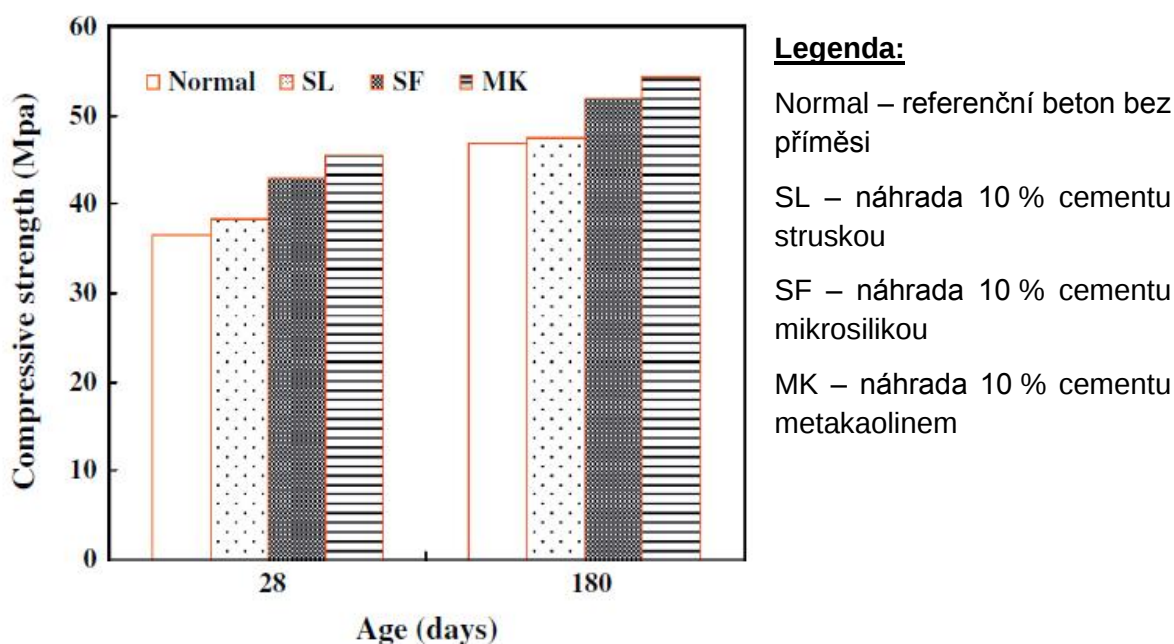
Jako nejvhodnější typ cementu pro vývoj vysokohodnotného betonu byl vybrán cement CEM I 42,5 R závod Mokrá. Má sice pomalejší průběh hydratace ve srovnání s cementem CEM I 52,5 R závod Mokrá, ale s tím je spojen i nižší vývoj hydratačního tepla, což je u betonu s vysokou dávkou cementu nesporná výhoda. Nárůst tlakových pevností je u cementu CEM I 42,5 R závod Mokrá pomalejší než u CEM I 52,5 R závod Mokrá, ale v pozdějším stáří betonu se tato nevýhoda minimalizuje. Pokud by výroba prvků z vysokohodnotného betonu probíhala v betonárnách, bude i s cementem CEM I 42,5 R závod Mokrá a jeho vysokou dávkou zajištěn dostatečně rychlý nárůst pevnosti, aby bylo možné konstrukci odbednit po 24 hodinách.

4. Příměsi vhodné pro částečnou náhradu cementu

Receptury vysokohodnotného betonu téměř vždy využívají latentně hydraulické příměsi pro částečnou náhradu cementu. Využití těchto přísad má pro beton několik výhod [35]:

- zvýšení hutnosti mikrostruktury,
- redukce tloušťky ITZ,
- snížení hodnoty vývinu hydratačního tepla,
- finanční a ekologická úspora.

Zvýšení hutnosti mikrostruktury je založeno na stejném principu jako u vyrovnání křivky zrnitosti kameniva, jak ukazuje kapitola 2.1. Pravděpodobně nejkomplexnější výzkum vlivu latentně hydraulických příměsí provedl Duan a kol. [36], který zkoušel zvýšit hutnost betonu pomocí strusky, mikrosiliky a metakaolinu. Příměsi nahrazující 10 % z hmotnosti cementu fungovaly jednak jako mikroplnivo a jednak pomáhaly chemicky při rekrystalizaci ettringitu na monosulfát. Pozitivní vliv příměsí se projevil větší mírou u starších vzorků než u vzorků s normovým stářím 28 dní. To je dáno tím, že příměsi zpomalují hydrataci portlandského cementu, jak dokázal Ťažký a Hela [37]. Proto i Duan [36] zkoušel tlakové pevnosti ve stáří vzorků 28 a 180 dní.



Obr. 29 Vliv příměsí na tlakovou pevnost betonu [36].

Redukce tloušťky ITZ je způsobena tím, že uvedené příměsi (metakaolin, mikrosilika a popílek) obsahují velké množství reaktivního oxidu křemičitého (SiO_2) [38], který reaguje s hydroxidem vápenatým (Ca(OH)_2), jenž je ve zvýšené míře obsažen v ITZ. Touto reakcí dochází podle Ambilyho [39] k redukci tloušťky ITZ, protože společnou reakcí SiO_2 a Ca(OH)_2 vzniká CSH, který je nositelem pevnosti betonu.

Snížení hodnoty vývinu hydratačního tepla snížením maximálních špiček tepelného toku je dáno rozložením průběhu hydratace do delšího časového úseku, protože hodnota celkového tepla, které vzniklo hydratací, je prakticky konstantní. Výzkum zabývající se vlivem příměsí na vývin hydratačního tepla provedl Šiler [40] nebo Snelson a kol. [41], který zjistil, že v případě použití metakaolinu lze snížit první špičku tepelného toku, která nastává cca 2 minuty po smíchání cementu s vodou až o 35 % při 15% náhradě cementu. Druhý vrchol tepelného toku nastával po cca 8 hodinách od smíchání cementu s vodou a zde je možné dosáhnout redukce až o 20 %.

Při použití popílku došlo k největšímu snížení tepelného toku při 10% náhradě cementu, a to u prvního vrcholu o 25 % a u druhého vrcholu o 20 %. Pokles tepelného toku u popílku potvrdil i výzkum Dittricha [42], ale jeho naměřené poklesy špiček tepelného toku jsou nižší než u Snelsona a kol. [41]. Dittrich zjistil, že při 30% náhradě cementu popílkem dojde k redukci druhé špičky tepelného toku pouze o 10 %.

4.1. Ověření vlivu příměsí na vlastnosti cementu nebo betonu

Při vývoji vlastní receptury vysokohodnotného betonu se předpokládalo využití příměsí pro jejich pozitivní vlivy, které uvádí předchozí kapitola. Bylo však nutné vybrat vhodný typ příměsí a především výši náhrady cementu. Z tohoto důvodu byl proveden rozsáhlý výzkum, kde byly nejprve zkoumány jednotlivé příměsí samostatně, pak byl jejich vliv ověřován na cementových pastách a následně teprve v receptuře betonu. Tento postup byl zvolen z důvodu pracnosti. V prvních fázích výzkumu bylo možné otestovat široký rozsah velikosti náhrady cementu, který byl postupně zužován podle toho, jaký přínos daná velikost náhrady měla. Ve všech následných zkouškách byla příměs kombinována s cementem CEM I 42,5 R, závod Mokrá od výrobce Českomoravský cement, a.s., protože byl tento cement předem vybrán jako nejvhodnější pro recepturu vysokohodnotného betonu (viz kapitola 3.1). Pro stanovení optimální dávky náhrady byly zvoleny tři typy příměsí, které jsou vyráběny v České republice:

- metakaolin „Mefisto L05“ (České lupkové závody, a.s.) označován jako „Met“,
- mikrosilika „Stachesil S“ (Stachema CZ s.r.o.) označována jako „Mic“,
- popílek „ETU EN 450“ (Tušimice II, ČEZ a.s.) označován jako „Pop“.

Metakaolin

Metakaolin je jediná z uvedených příměsí, která není odpadním materiálem, ale je přímo vyráběným produktem pro beton nebo geopolymery. Metakaolin je vyráběn pálením kaolinu, kaolinitických jíílů a dalších surovin při teplotě přibližně 600 – 900 °C. Při tomto procesu je z kaolinu vypuzena mezimřížková voda a vzniká pucolánově aktivní látka – metakaolin. Základní složkou kaolinu je kaolinit, který vzniká zvětráváním živců. Kaolinit se skládá z oxidu křemičitého – SiO_2 (cca 60 %) a oxidu hlinitého – Al_2O_3 (cca 38 %) a zbylá 2 % jsou tvořena oxidy vápníku, hořčíku a jiných kovů. Velikost částic se pohybuje v rozmezí 1,0 – 10 μm , měrný povrch dosahuje hodnot 9000 – 18000 m^2/kg (běžný cement má měrný povrch v rozmezí 250 – 400 m^2/kg) a objemová hmotnost se pohybuje kolem 2100 – 2500 kg/m^3 . Podle způsobu využití může být vyráběn ve formě prášku nebo koncentrované suspenze. Předními výrobci metakaolinu v České republice jsou Sedlecký kaolin a.s. a České lupkové závody, a.s.

Metakaolin je schopen reagovat s hydroxidem vápenatým za vzniku nových produktů, které podle Hely [43] snižují pórovitou strukturu ITZ. Hela [43] dále uvádí, že metakaolin reaguje s portlanditem pomaleji než mikrosilika a pro úplné vyvážení hydroxidu vápenatého potřebuje delší čas. Alaa [44] uvádí, že 15% náhrada cementu metakaolinem redukuje původní obsah hydroxidu vápenatého o 6 až 24 %. Pro zreagování veškerého metakaolinu by byla potřeba náhrada cementu ve výši 20 až 25 %. Tafroui a kol. [45] porovnávali změnu mechanických vlastností UHPC s metakaolinem a mikrosilikou a došli k závěru, že i metakaolin je použitelná příměs pro tento druh betonů, ale mechanické vlastnosti jsou zhruba o 6 % horší než při použití mikrosiliky. U betonů běžných pevnostních tříd přidáním metakaolinu dochází k zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností, především tlakové pevnosti a reologických vlastností, ale i odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám. Výzkum Antoniho a kol. [46] dokázal, že nárůst tlakové pevnosti je při 30% náhradě cementu metakaolinem pomalejší během prvních 7 dní proti betonu bez částečné náhrady cementu. Během dalších dnů (7 až 90) je tlaková pevnost u betonu s náhradou již vyšší než u betonu bez částečné náhrady cementu.

Mikrosilika (křemičitý úlet)

Mikrosilika vzniká jako vedlejší produkt při výrobě křemíkových kovů a ferosilicia. V obloukové elektrické peci dochází k redukování křemene při výrobě křemíku a jeho slitin. K tavení dochází při teplotě vyšší než 2000 °C. Během redukování křemene vzniká plynný SiO, který stoupá v peci vzhůru, kde dochází k jeho ochlazení, kondenzaci a oxidaci na SiO₂, ten ve formě jemného prášku klesá a je shromažďován v odlučovacím systému [9]. Částice SiO₂ mají průměr 0,1 – 0,5 μm, měrný povrch je v rozmezí hodnot 15 000 až 35 000 m²/kg (běžný cement má měrný povrch v rozmezí 250 – 400 m²/kg) [47]. Hlavní příspěvek mikrosiliky je ve vyplnění volných pórů nejen mezi zrny kameniva, ale vzhledem k její jemnosti i mezi zrny cementu, čímž zlepšuje vlastnosti ITZ. Doporučená dávka mikrosiliky se pohybuje okolo 15 % hmotnostní dávky cementu. Esfandiari a kol. [48] ve svém výzkumu jasně ukázali, že přínos mikrosiliky na tlakovou pevnost je výrazný při velikosti částečné náhrady cementu v dávce 5 až 10 %. Při dalším zvyšování procent náhrady vzrůstají tlakové pevnosti jen velmi pomalu, a to do hodnoty 15 %. Částečná náhrada mezi 15 až 20 % se prakticky neprojevuje zlepšením tlakové pevnosti a po překročení 20 % již dochází k poklesu tlakové pevnosti.

Jednotlivá zrna mikrosiliky mají kulovitý tvar, což je dáno způsobem jejich vzniku, proto mikrosilika pozitivně ovlivňuje i pohyblivost čerstvého betonu. Druhým hlavním přínosem je tvorba zvýšeného množství CSH gelu. Mikrosilika je chemicky kyselé povahy a při pucolánové reakci s alkáliemi z cementu snižuje výslednou celkovou alkalitu betonu, čímž je snížena pasivační funkce betonu pro ochranu betonářské výztuže proti korozi. Betonářská výztuž je ohrožena korozí při poklesu pH na hodnotu pH < 9.

Popílek

Popílky jsou tuhé zbytky po spalování tuhých paliv. Ta se nejprve namelou na jemný prášek, který se následně vysuší a pak je spolu s horkým vzduchem vháněn do spalovací komory, kde hoří při teplotě 1 400 až 1 600 °C. Zbytky po tomto typu spalování tvoří strusku, která klesá na dno kotle, a úletový popílek, který je unášen spalinami a separován v odlučovačích. Takto vzniklý úletový popílek vytváří duté kulovité částice, které jsou složeny převážně z částíček křemičitanového skla. Nevýhodou této suroviny jsou její proměnlivé vlastnosti, které jsou

závislé na druhu spalovaného paliva i způsobu zachycování. Druhým způsobem je fluidní (nízkoteplotní) spalování, kde je nadrcené uhlí spalováno spolu s vápencem ve fluidním kotli při teplotách 700 až 900°C.

Popílek z černého uhlí má menší variabilitu vlastností než popílek z uhlí hnědého. Černouhelné popílky většinou obsahují skleněné kuličky velikostí podobné zrnům cementu, hnědouhelné popílky mají nepravidelný tvar. O vhodnosti popílku do betonu rozhoduje jeho reaktivnost, tedy množství SiO_2 ve sklovité fázi. Podle Hely [43] se reaktivnost projevuje velmi pomalu a zjistitelná je až za 28 dní a déle, což potvrzuje i výzkum Richarda a Cheyrezyho [49], kteří naměřili výrazný nárůst pevnosti u vzorků s popílkem až mezi 28. a 90. dnem. Zpomalení hydratace se může využít pro snížení nárůstu hydratačního tepla, což experimentálně dokázal Dittrich [42].

Nevýhodou popílku je, že při dlouhém míchání, které je běžné při výrobě vysokohodnotných betonů, dochází k destrukci dutých sférických zrn popílků. Tím se zhoršuje zpracovatelnost čerstvého betonu, i když by popílky obecně měly reologické vlastnosti zlepšovat. Využívání popílků vyžaduje podle Terzijského [50] i zvýšené dávkování vody z důvodu nárůstu měrného povrchu. Měrný povrch se pohybuje v rozmezí hodnot 200 – 450 kg/m^2 (běžný cement má měrný povrch v rozmezí 250 – 400 m^2/kg). Hlavními složkami popílků jsou SiO_2 , CaO a Al_2O_3 , které tvoří 80 % objemu. Popílek slouží jako jemný filler a zároveň prostřednictvím pucolánové reakce s Ca(OH)_2 se podílí i na hydrataci cementu. Celý efekt je ale velice pomalý.

Podle normy ASTM C618 [51] se popílky dělí na dvě skupiny:

- **Typ F** (křemičitý) vzniká při spalování antracitu či velmi kvalitního hnědého uhlí. Popílek tohoto typu se skládá z cca 70 % z $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ a z méně než 10 % z CaO . Tento popílek má pucolánové vlastnosti a reakce probíhá za přítomnosti hydroxidu vápenatého. Podle Bittnara a kol. [52] skoro všechny popílky produkované v České republice patří do této skupiny.
- **Typ C** (vápenatý), který vzniká při spalování hnědého uhlí a lignitu. Popílek tohoto typu obsahuje v součtu okolo 50 % $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ a CaO tvoří více než 20 %. Samotný popílek má vzhledem k vysokému obsahu aktivního CaO hydraulické vlastnosti a nepotřebuje aktivátor.

Samostatnou skupinou jsou **fluidní popílky**, které ve většině případů nesplňují normu pro popílky do betonu ČSN EN 450-1 z důvodu vyššího obsahu volného CaO . Podle Hely [43] tyto popílky mají výrazně proměnné vlastnosti a chemické složení, což způsobuje nestabilita spalovacího procesu.

4.1.1. Chemické složení příměsí a cementu

Nejprve byla provedena chemická analýza vstupních surovin a stanovení měrného povrchu. Provedená analýza potvrdila obecné předpoklady ze začátku této kapitoly. U metakaolinu je obvykle součet obsahu $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ kolem 98 %, u testovaného vzorku je součet $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 94,2$ %. Měrný povrch by měl být poměrně vysoký, což se také potvrdilo. Mikrosilika bývá složena z více než z 90 % z SiO_2 , analyzovaný vzorek dosáhl hodnoty 92,1 % a měrný povrch byl nejvyšší ze všech měřených vzorků, což opět odpovídalo předpokladům. Popílek s velkou rezervou splnil podmínky normy ASTM C618 [51], aby mohl být zařazen do kategorie F. Hodnota obsahu CaO byla velice nízká, pouhých 4,2 %.

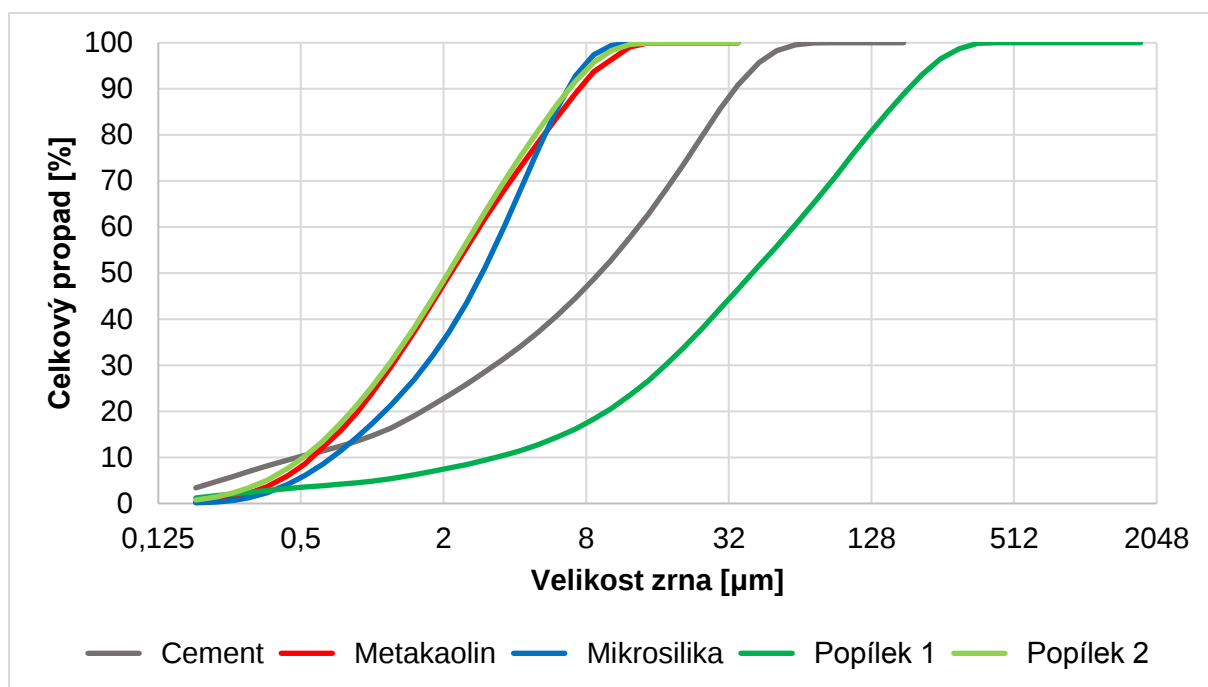
Tab. 14 Chemické složení a měrný povrch použitých příměsí (sloučeniny se zastoupením větším než 0,5 %).

	CEM I 42,5 R	metakaolin Mefisto L05	mikrosilika Stachesil S	popílek ETU EN 450
CaO	64,2 %		1,5 %	4,2 %
SiO ₂	19,5 %	54,1 %	92,1 %	48,8 %
Al ₂ O ₃	4,7 %	40,1 %		24,2 %
Fe ₂ O ₃	3,2 %	1,1 %	0,5 %	12,5 %
SO ₃	3,2 %			1,2 %
MgO	1,3 %			0,7 %
K ₂ O	0,78 %	0,8 %	0,7 %	1,4 %
TiO ₂		1,8 %		1,4 %
Měrný povrch	0,370 m ² /g	12,69 m ² /g	15,0 m ² /g	0,25 m ² /g

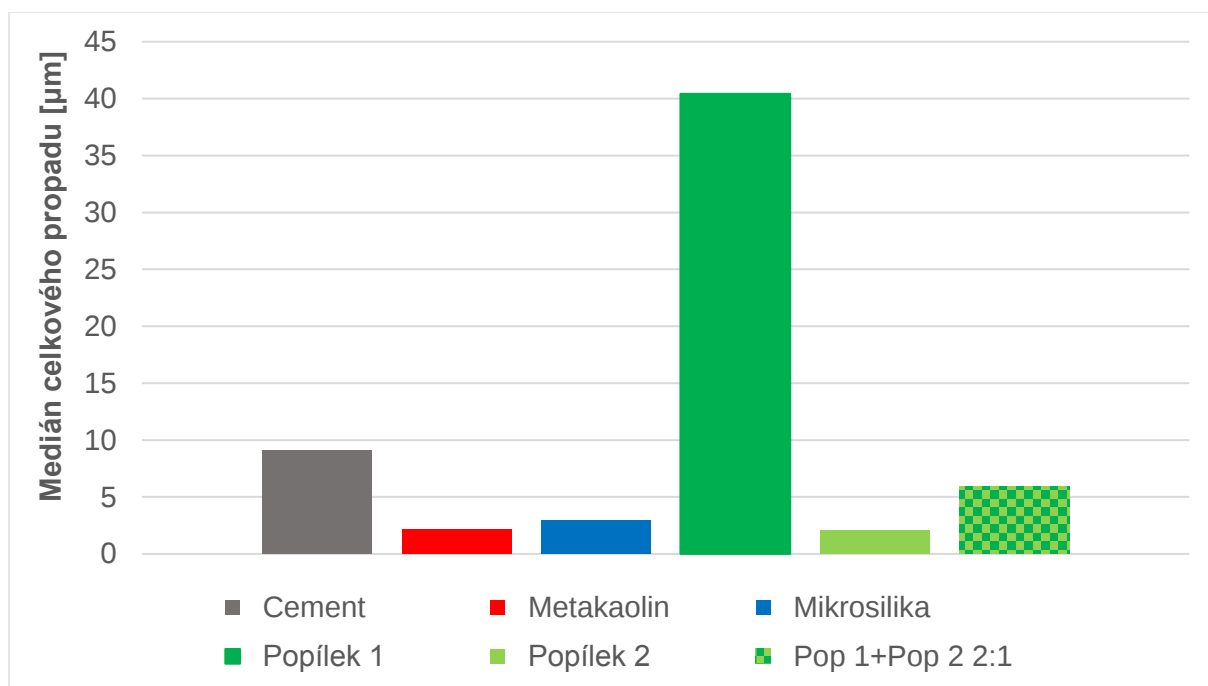
4.1.2. Porovnání velikosti částic příměsí

Hodnoty měrného povrchu z předchozí tabulky ukazují značný rozdíl v jemnosti mletí jednotlivých příměsí, proto byla velikost ověřena pomocí laserové difrakční metody. Měření probíhalo tak, že od každé příměsí byly odebrány 3 vzorky s hmotností cca 4 g a ty byly testovány na přístroji HELOS/KR (Sympatec). Výsledky ze všech tří měření byly následně zprůměrovány.

V následujících grafech je uveden popílek vždy dvakrát. Popílek ETU EN 450 je komerční produkt firmy ČEZ a.s. V době testů nebyl dokončen vývoj komerční verze tohoto produktu. Pro výzkumné účely byl dodáván ve dvou složkách, které se dle doporučení výrobce míchaly v poměru 2:1. Každá ze složek obsahovala různě velké částice, protože byly zachytávány na různých typech odlučovačů Tušimické elektrárny. V době psaní tohoto textu je již dokončen vývoj a firma ČEZ a.s. obě složky míchá ve svém distribučním centru a prodává popílek ETU EN 450 jako jeden kompletní produkt.



Obr. 30 Výsledky z měření laserovou granulometrií.



Obr. 31 Medián propadů při měření laserovou granulometrií.

Výsledky ukazují, že kromě popílku 1 jsou všechny ostatní příměsi mnohem jemnější než cement a obsahují zhruba částice o stejné velikosti. Nejjemnější částice byly nalezeny u popílku 2, ale ten byl vždy míchan s popílkem 1 v poměru popílek 1 : popílek 2 = 2 : 1, takže celková velikost částic byla vyšší. Překvapivým výsledkem byla zjištěná jemnost metakaolinu, který byl jemnější než mikrosilika, což neodpovídalo obecným předpokladům, avšak s ohledem na rozsahy jemností mletí obou materiálů uváděné v literatuře je takový výsledek možný.

4.1.3. Stanovení vlivu příměsí na vývoj hydratačního tepla

Měření vývoje hydratačního tepla probíhalo již na cementových pastách, které byly vyrobeny podle tabulky Tab. 15. Měření vývinu hydratačního tepla lze realizovat dvěma způsoby – kalorimetrií roztoku nebo izotermální kalorimetrií.

Kalorimetrie roztoku je založena na porovnání hydratačního tepla uvolněného nehydratovaným cementem a částečně hydratovaným cementem v kyselém roztoku. Rozdíl obou hodnot odpovídá množství tepla uvolněného částečně hydratovaným cementem za běžných podmínek, tato metoda se většinou používá pro dlouhodobá měření.

Izotermická metoda je založená na přímém měření hydratačního tepla ve vzorku, podle Šilera [53] [54] je tato metoda vhodnější a přesnější pro krátkodobá měření. K měření vývoje tepelného toku a hydratačního tepla během hydratace navržených cementových past s náhradou pouze 10, 20 a 50 % byl použit osmikanálový izotermický mikrokolorimetr TAM Air (TA Instruments). Měření probíhalo na vzorcích o hmotnosti 2 g, které byly umístěny do skleněných ampulí při 25 °C a následně zality destilovanou vodou, po zamíchání protřepáním byla ampule umístěna do měřicího přístroje, který měřil tepelný tok následujících 48 hodin.

V počátečních fázích hydratace (do 12 minut) je vývin hydratačního tepla nejvyšší, a proto jsou prezentované výsledky na následujících grafech rozděleny na záznam do první hodiny, viz Obr. 32, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a Obr. 34, kde je dobře patrný první vrchol tepelného toku. Na Obr. 35, Obr. 36 a Obr. 37 jsou pak vidět celkové záznamy z měření se zřetelným druhým vrcholem, který nastává kolem desáté hodiny od smíchání cementu s vodou, což je podle Šilera [40] okamžik, kdy dochází k rekrystalizaci ettringitu na monosulfát. V této části hydratace také začíná tvrdnutí betonu.

Tab. 15 Receptury cementových past s příměsí.

Složka	Ref.	Metakaolin					Mikrosilika					Popílek				
		5%	10%	20%	30%	50%	5%	10%	20%	30%	50%	5%	10%	20%	30%	50%
Cem.	1375	1306	1238	1100	963	687	1306	1238	1100	963	687	1306	1238	1100	963	687
Voda	550	546	550	550	550	550	577	605	660	876	1092	533	517	484	451	385
Příměs	-	69	137	275	412	687	69	137	275	412	687	69	137	275	412	687
k hod.	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
v / c	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,49	0,53	0,4	0,4	0,4	0,4

U mikrosiliky s náhradou 30 a 50 % musela být zvýšena hodnota vodního součinitele z 0,4 na 0,53, protože původní směs byla příliš suchá a prakticky nezpracovatelná. Obecně byla hodnota vodního součinitele stanovena podle ČSN EN 206+A1 [17]:

$$w/b = \frac{m_w}{m_c + k \cdot m_a} \quad (6)$$

kde:

m_w je hmotnost účinné vody,

m_c je hmotnost cementu,

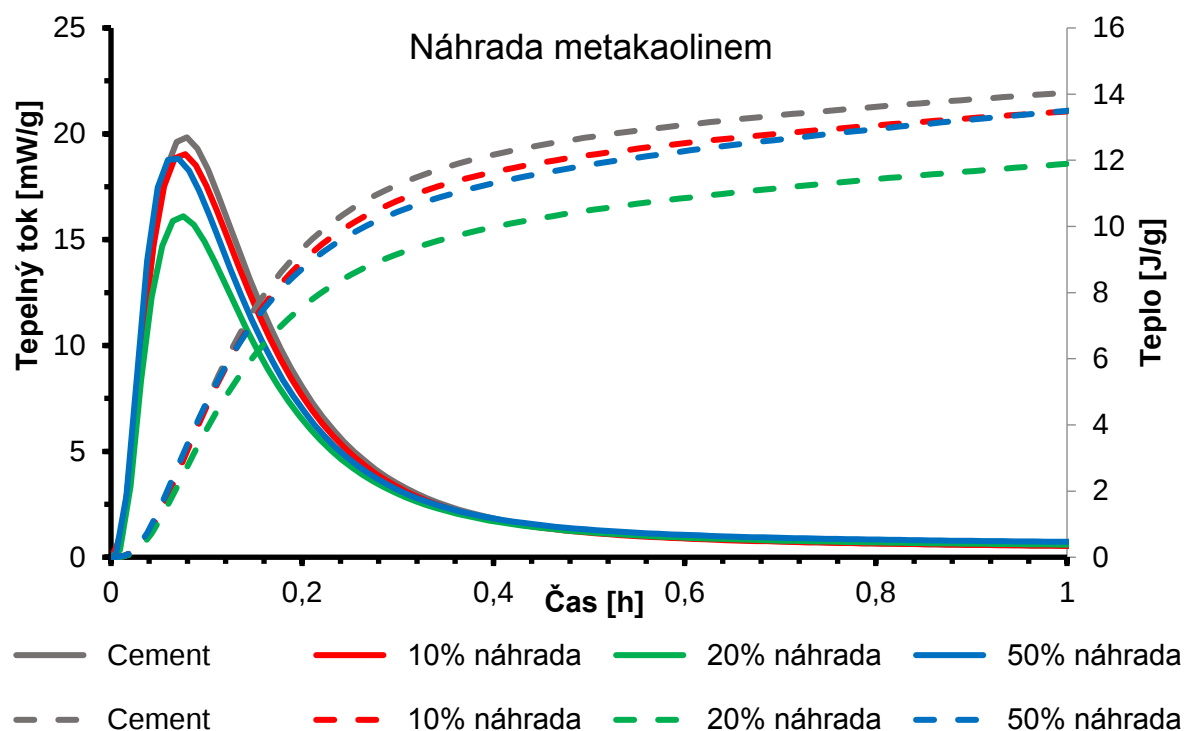
k je hodnota z normy zohledňující vliv přísady,

m_a je hmotnost příměsi.

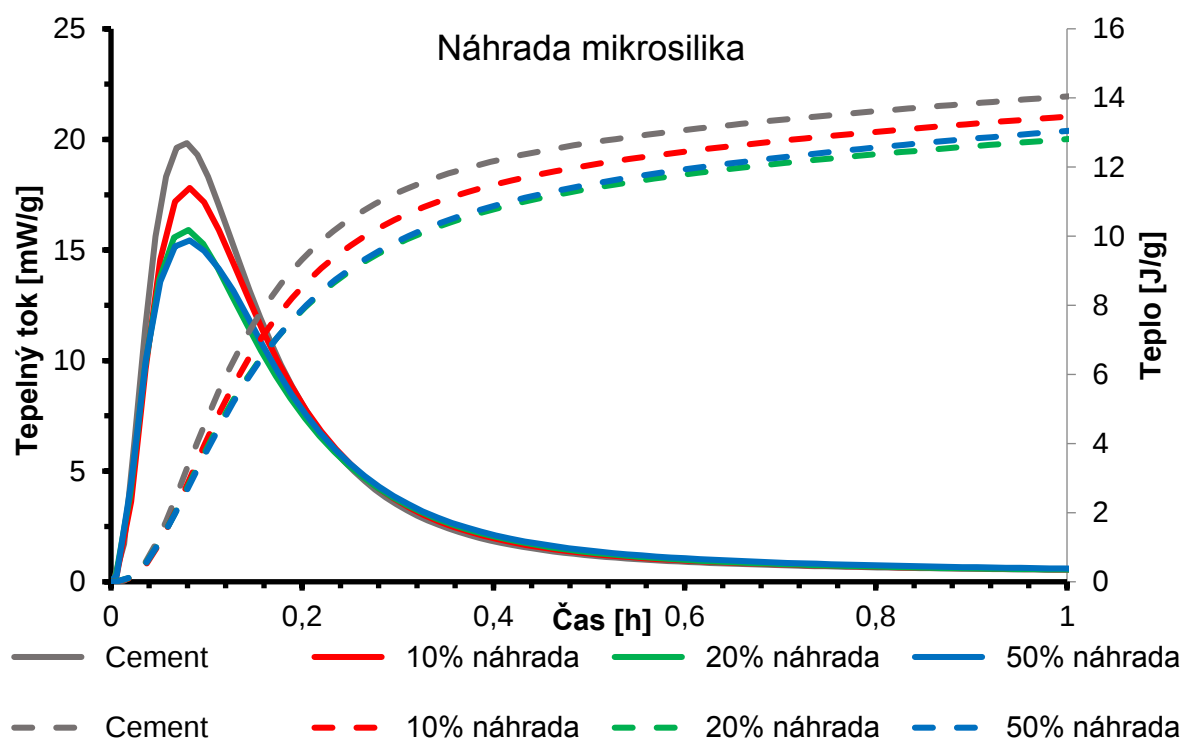
Norma ČSN EN 206+A1 [17], stanovuje maximální množství náhrady cementu, konkrétně u popílku na 33 % a u mikrosiliky na 11 %. V těchto limitech se vodní součinitel stanovuje podle vztahu (6) a norma udává velikost koeficientu k pro popílek na 0,4 a pro mikrosiliku na 2,0. V provedeném experimentu byla hodnota maximální velikosti náhrady cementu vědomě překročena, protože cílem prováděného experimentu bylo ověřit chování příměsí i mimo doporučený rozsah. Překročení maximálních limitů způsobilo selhání výpočtu dávky záměsové vody z vodního součinitele, který měl být pro celý experiment konstantní. Ke ztrátě zpracovatelnosti způsobené nedostatkem záměsové vody došlo u mikrosiliky při velikosti náhrady 30 a 50 %. V těchto případech musela být dávka záměsové vody zvýšena, aby bylo dosaženo stejné zpracovatelnosti jako u ostatní vzorků. Při zpětném stanovení velikosti koeficientu k získáme hodnotu 2,9. Z výše uvedené skutečnosti vyplývá, že hodnoty koeficientu k stanoveného v normě platí jen a pouze v rozsahu náhrad připouštěných normou.

Omezení velikosti náhrady cementu shora je v normě stanoveno z důvodu zachování trvanlivosti železobetonu, protože velké dávky příměsí snižují pH betonu a tím mohou urychlit karbonataci betonu a posléze korozi výztuže. Efekt poklesu pH betonu přidáním velké dávky mikrosiliky potvrdil například výzkum, který realizoval Page a Vennesland [55], kteří změřili pokles pH na hodnotu 12 za 84 dnů pro 30% náhradu cementu mikrosilikou. K podobnému výsledku došel i experiment realizovaný Muralidharanem a kol. [56], který naměřil pH 12 už při 15% náhradě cementu mikrosilikou.

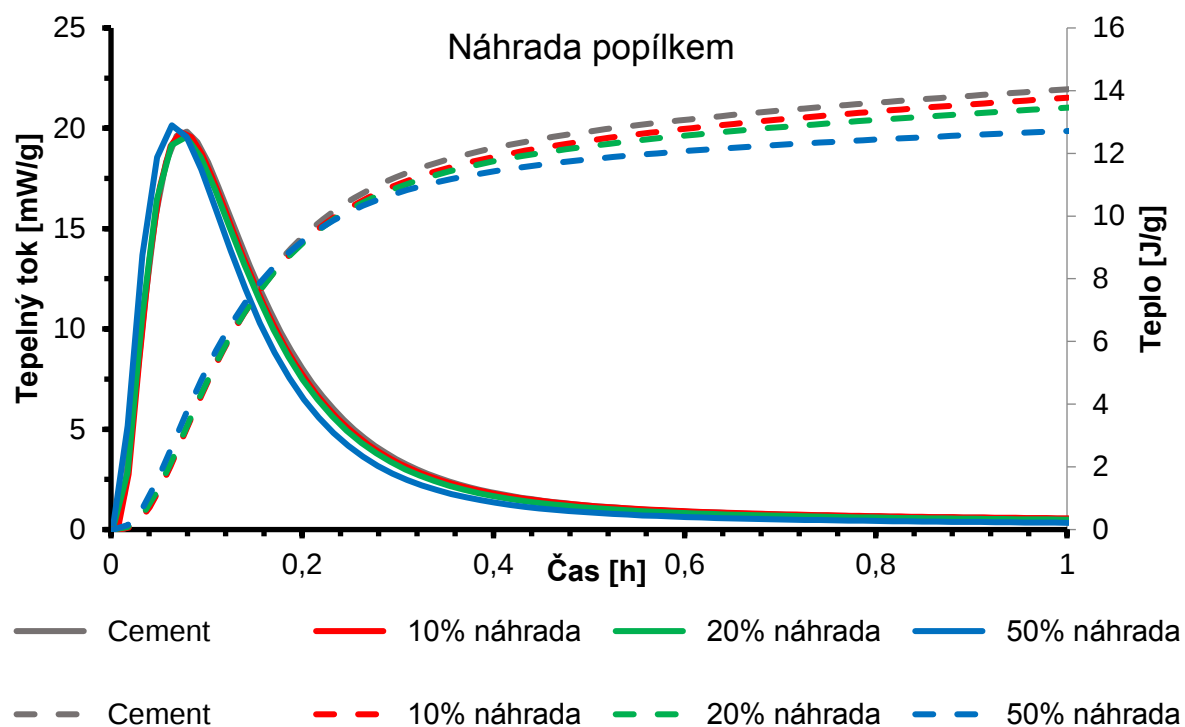
V realizovaném výzkumu však byly vzorky vyrobené pouze z prostého betonu a zkoušení probíhalo ve stáří 28 dní. Cílem bylo především stanovit chování cementu s příměsí, a proto byl zvolen velký rozsah hodnot, aby mohly být ukázány tendence a z nich stanovené závěry. Úmyslem nikdy nebylo vyrábět vysokohodnotný beton s 50% náhradou cementu mikrosilikou. S postupným získáváním znalostí o chování příměsí byl redukován rozsah velikosti náhrady pro všechny příměsi, což je důvod, proč nejsou u některých experimentů uvedeny všechny procentuální náhrady.



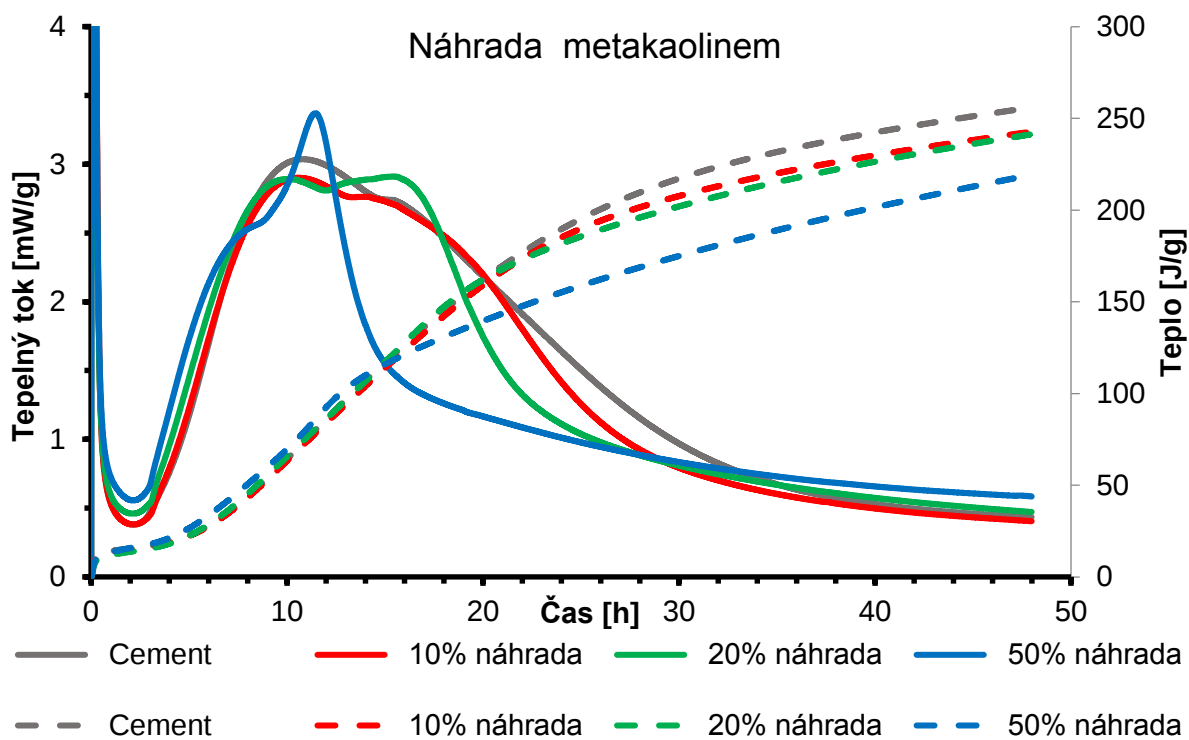
Obr. 32 Počáteční fáze vývinu hydratačního tepla při náhradě cementu metakaolinem.



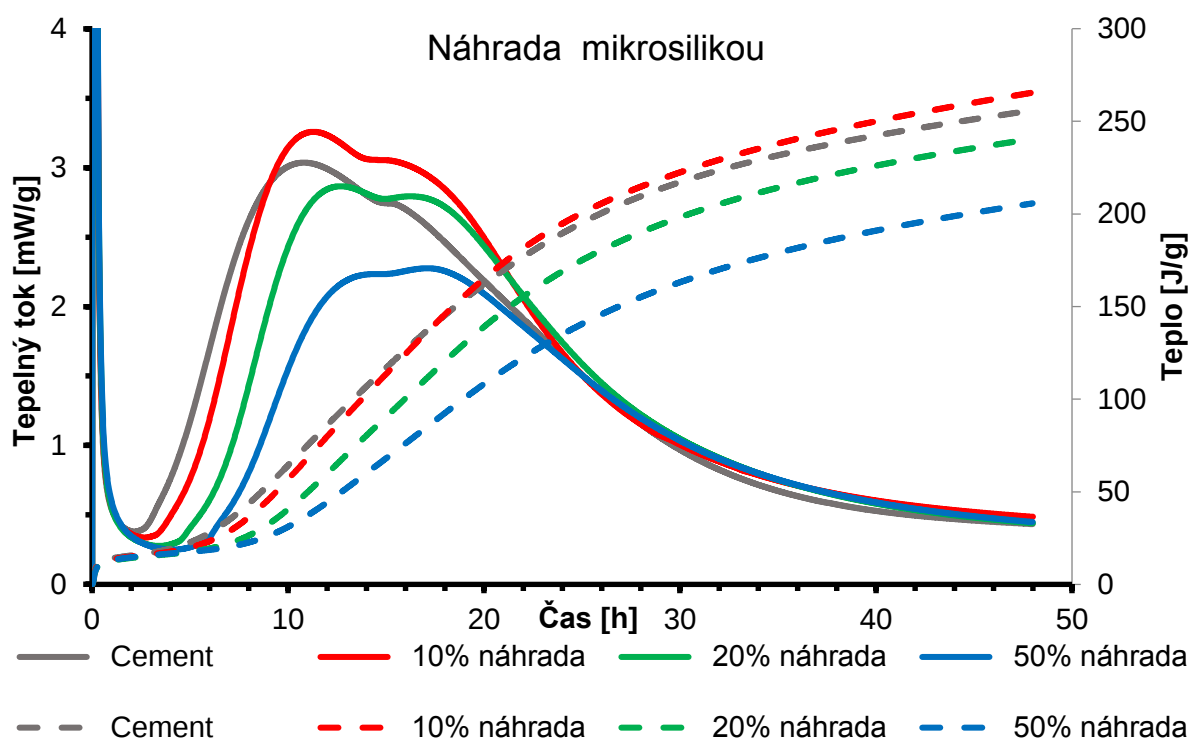
Obr. 33 Počáteční fáze vývinu hydratačního tepla při náhradě cementu mikrosilikou.



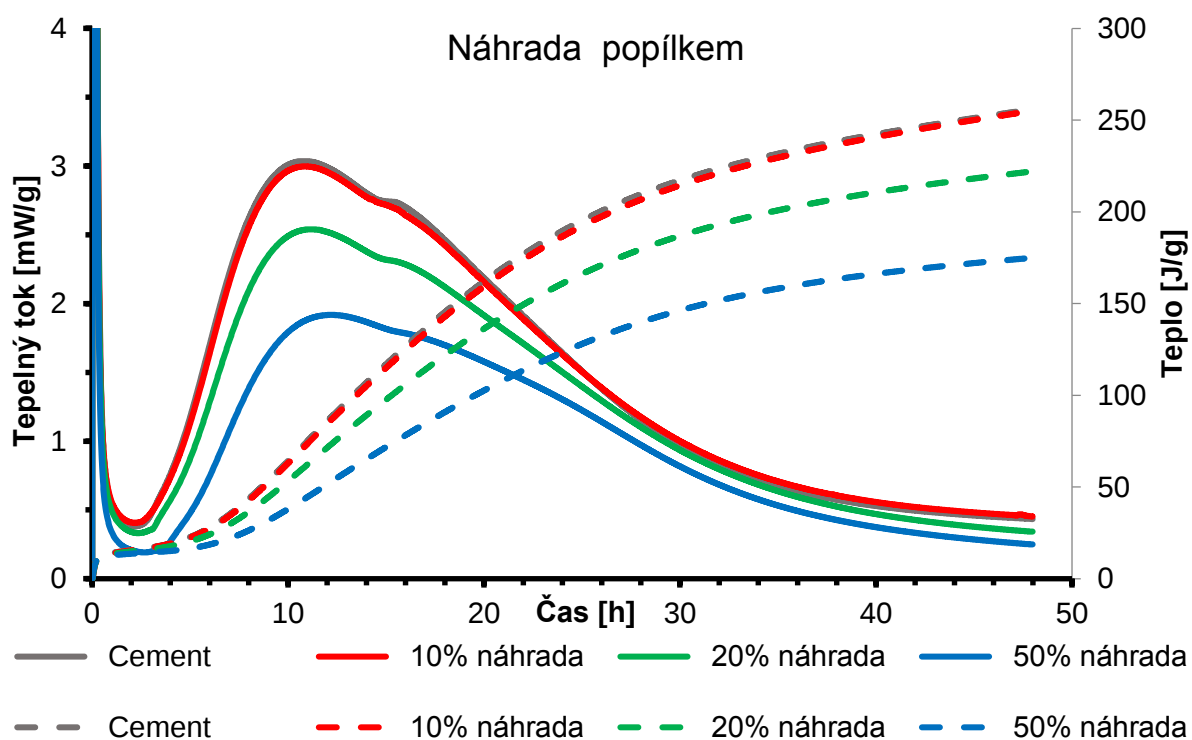
Obr. 34 Počáteční fáze vývinu hydratačního tepla při náhradě cementu popílkem.



Obr. 35 Celkový průběh vývinu hydratačního tepla při náhradě cementu metakaolinem.



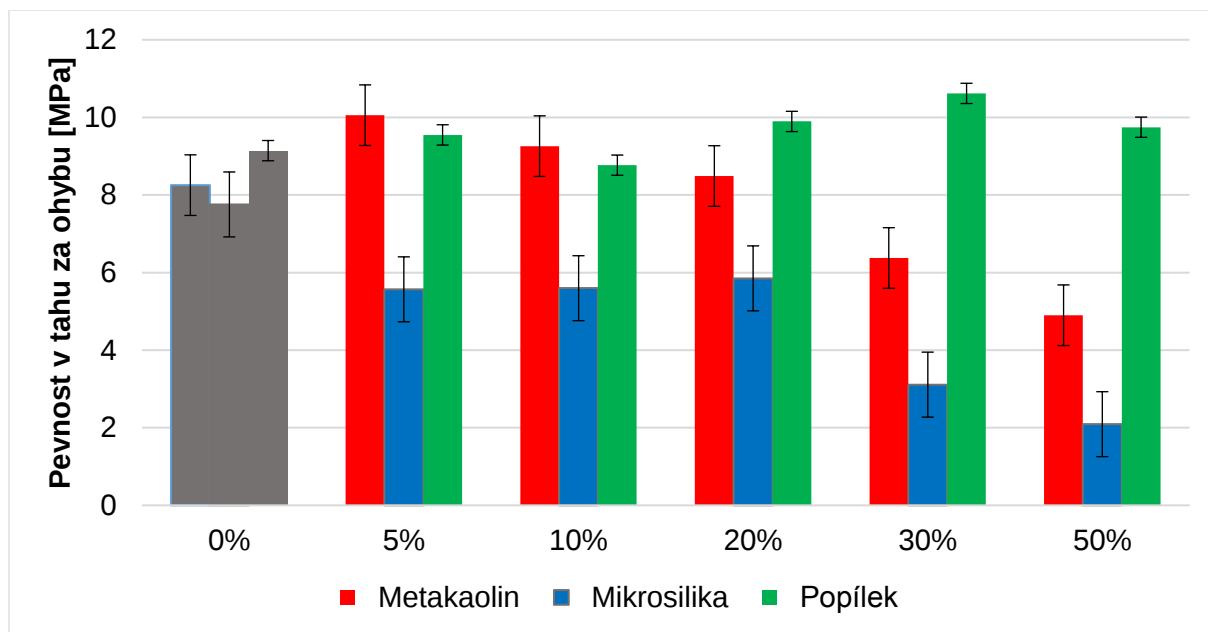
Obr. 36 Celkový průběh vývinu hydratačního tepla při náhradě cementu mikrosilikou.



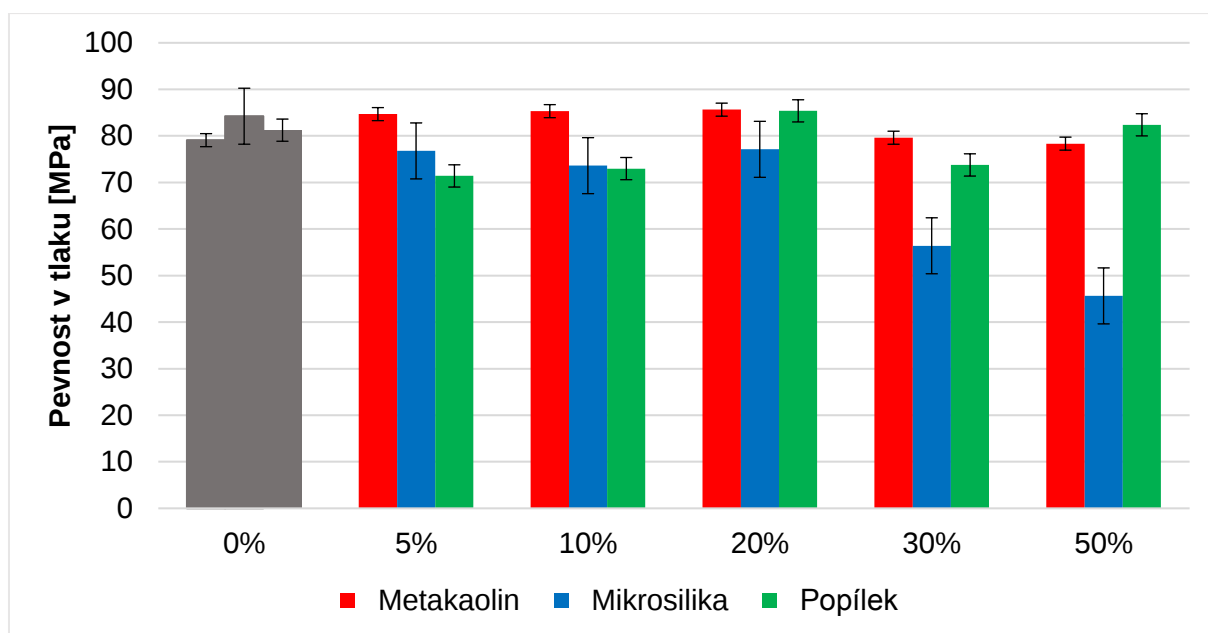
Obr. 37 Celkový průběh vývinu hydratačního tepla při náhradě cementu popílkem.

4.1.4. Stanovení vlivu příměsí na tahovou a tlakovou pevnost cementové malty

Podle Tab. 15 byla vyrobena zkušební tělesa o velikosti 40 x 40 x 160 mm v počtu 6 kusů od každé receptury. Na těchto trácích se zkoušela nejprve pevnost v tahu za ohybu cementové malty dle ČSN EN 12390-5 [57]. Zbytky vzorků z této zkoušky byly využity pro měření tlakové pevnosti cementové malty dle normy ČSN EN 12390-3 [28]. Během výroby každé série zkušebních těles byla opakovaně vyrobena i referenční tělesa bez jakékoliv příměsi, která jsou označována jako „0%“. Opětovným zkoušením vzorků míchaných jen z cementu byla kontrolována rovnoměrnost výroby a kvalita ošetřování vzorků. Naměřené výsledky jsou uvedeny na Obr. 38 a Obr. 39. Rovnoměrnost výsledků u referenčních vzorků dokazuje rovnoměrnost výroby a vysokou technologickou kázeň.



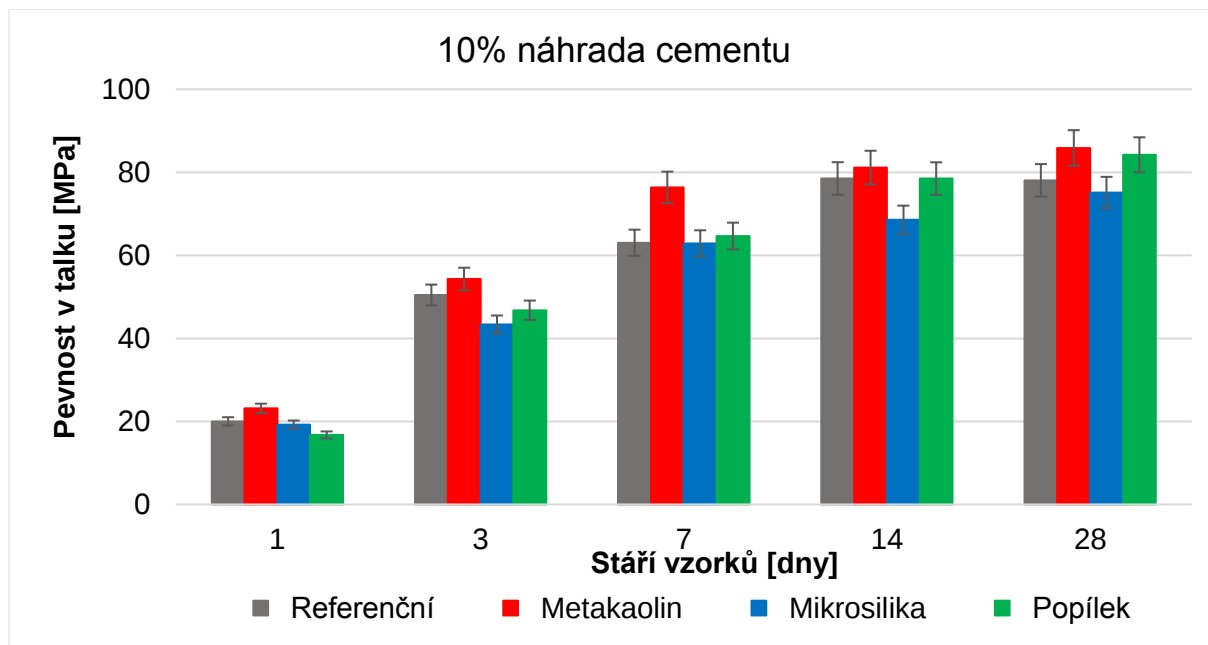
Obr. 38 Vliv různé dávky příměsi na pevnost v tahu za ohybu.



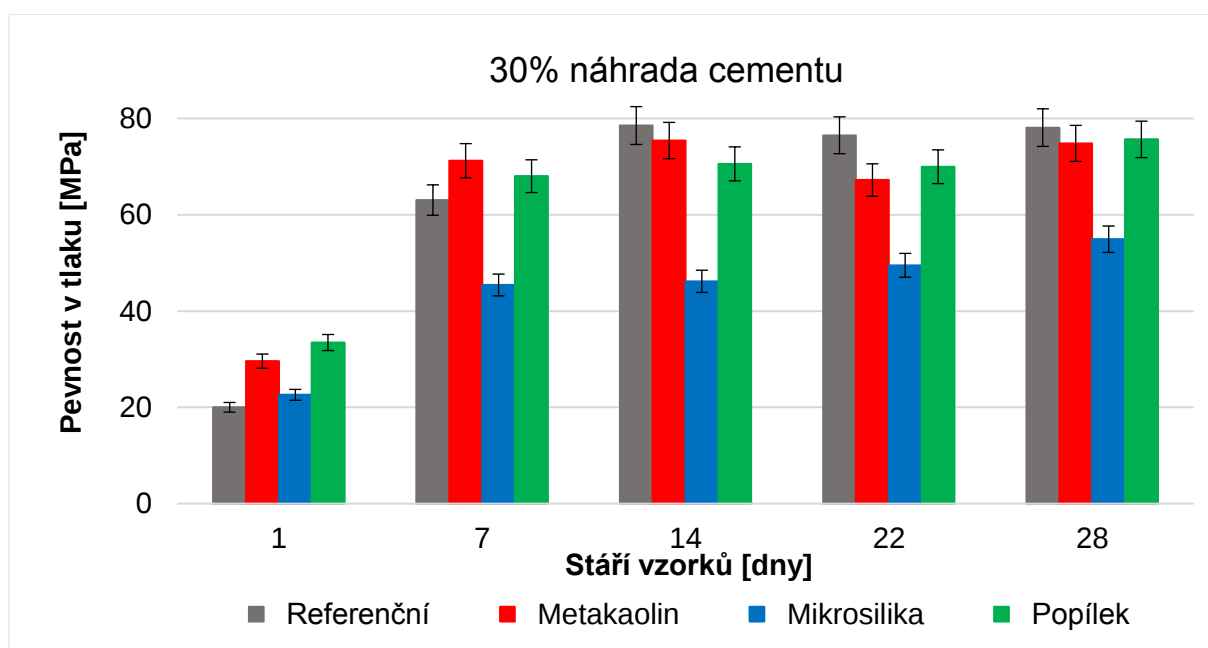
Obr. 39 Vliv různé dávky příměsi na tlakovou pevnost.

4.1.5. Stanovení vlivu příměsí na rychlost nárůstu tlakové pevnosti

Jak již bylo zmíněno v kapitole o popílku, rychlost hydratace popílku je relativně pomalá a jeho největší přínos se projevuje až ve vyšším stáří vzorku. Realizovaný výzkum byl zaměřený na rychlost vývoje tlakové pevnosti cementové malty s dávkou náhrady 10 a 30 %. Pevnost byla měřena na krychlích o hraně 40 mm, z každého materiálu bylo vyrobeno 6 krychlí, které byly vyrobeny dle ČSN EN 196-1 [34]. Receptury k výrobě zkušebních těles jsou uvedeny v Tab. 15. Krychle byly ošetřovány ve vodním prostředí a vyjmuty z vody byly cca 30 minut před zkouškou. Výjimkou byla jen zkušební tělesa zkoušená ve stáří 24 hodin, která byla zkoušena rovnou po odbednění. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 40 a Obr. 41.



Obr. 40 Nárůst tlakové pevnosti cementové pasty s 10% náhradou v čase.



Obr. 41 Nárůst tlakové pevnosti cementové pasty s 30% náhradou v čase.

4.1.6. Stanovení vlivu příměsí na počátek a konec tuhnutí

Hlavní motivací pro ověření počátků a konců tuhnutí cementové pasty s různou příměsí byl ohled na pozdější průmyslovou výrobu. Úpravou množství příměsí lze zkrátit nebo prodloužit dobu zpracovatelnosti a tím se lépe přizpůsobit přepravním možnostem čerstvého betonu v rámci výrobního závodu. Druhou variantou pro úpravu doby zpracovatelnosti je použití urychlovačů nebo zpomalovačů tuhnutí. Použití další přísady však zkomplikuje již tak náročnou výrobu vysokohodnotného betonu. Ne všechna míchací centra totiž disponují vybavením na automatické dávkování dvou kapalných přísad. V případě, že takové vybavení mají, používá se obvykle pro urychlovače, protože zpomalovač tuhnutí nemá pro rychlou výrobu v betonárnách opodstatnění. Úprava doby zpracovatelnosti pomocí dávky příměsí je tedy jednodušší ve všech směrech, ale méně efektivní.

Rozsáhlý výzkum realizovaný Xiaoyingem a kol. [58], který se zabýval vlivem mikrosiliky na počátek a konec tuhnutí, ukazuje, že 10% náhrada cementu mikrosilikou prodloužila počátek tuhnutí z 5 min na 10 min a konce tuhnutí ze 7 min na 12,5 min proti betonu bez náhrady cementu. Při 20% náhradě cementu mikrosilikou došlo k prodloužení počátku tuhnutí na 15 min a k posunutí doby konce tuhnutí až na 35 min. Tyto výsledky ovšem vůbec neodpovídají výsledkům prezentovaným Yaserim a kol. [59], který použil 10% náhradu cementu mikrosilikou, čímž posunul počátek tuhnutí až na 65 min a konec na 100 min. Při pokusu s metakaolinem, který byl také dávkován jako 10% náhrada cementu, byly všechny časy ještě delší, tedy počátek tuhnutí byl stanoven na 65 min a konec na 120 min. Kokeš [60], který se ve své práci zaměřil na měření reologických vlastností cementové pasty s 25% náhradou cementu mikrosilikou a metakaolinem, zjistil počátek a konec tuhnutí takto – u metakaolinu byl počátek tuhnutí stanoven na 322 min a konec tuhnutí na 477 min, v případě mikrosiliky nastal počátek tuhnutí v 184 min a konec v 735 min.

Z výše uvedených hodnot vyplývá pouze jediné, a to že jsou výsledky těchto výzkumů neporovnatelné, protože se jednotlivé hodnoty zásadně liší. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena okrajovými podmínkami, které výslednou hodnotu významně ovlivní, ale výzkumníci je neuvádí. Příčinou mohou být:

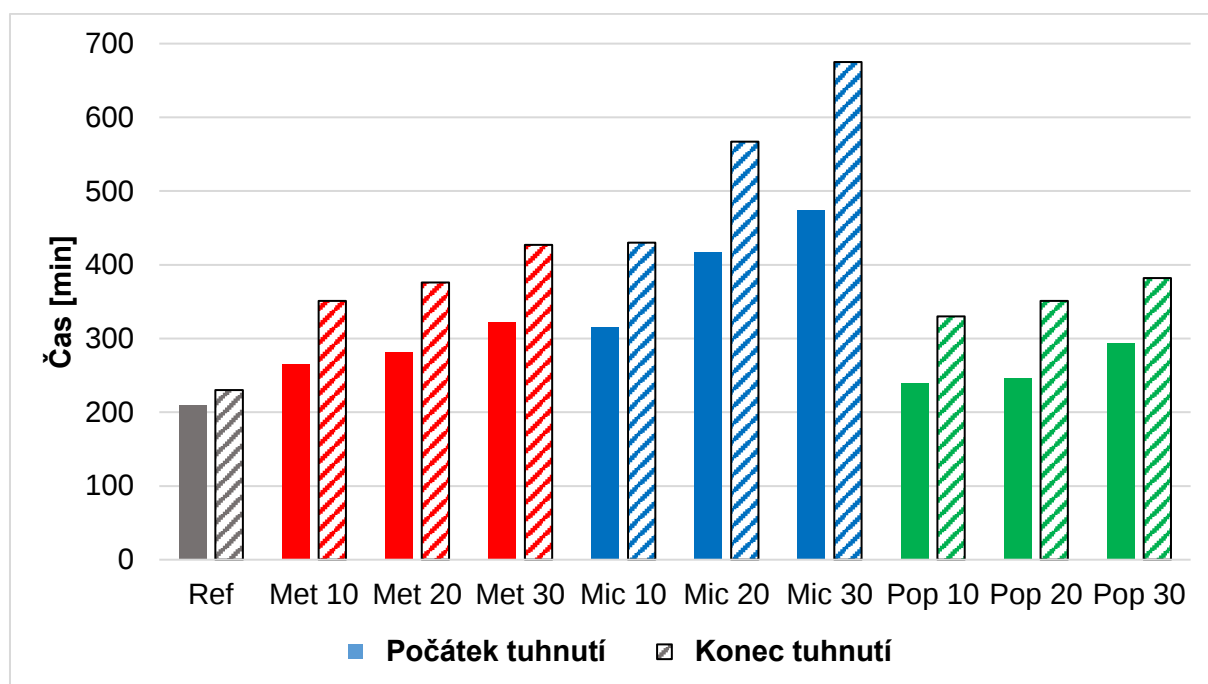
- rychlost hydratace cementu,
- jemnost mletí cementu,
- vlastní chemické složení cementu,
- konzistence kaše normální konzistence (je možné, že někteří výzkumníci nepoužívají k měření kaši normální hustoty),
- okolní podmínky, za kterých probíhalo měření, především teplota.

Před realizací vlastního měření počátku doby tuhnutí a tvrdnutí bylo tedy nutné pro uvedené receptury v Tab. 15 stanovit množství vody k získání kaše normální konzistence, tedy takové, do které je hloubka penetrace hustoměrným válečkem 34 ± 2 mm od horního okraje vzorku (tedy 6 ± 2 mm od dolního okraje vzorku). Úprava konzistence probíhala pouze úpravou dávky vody.

Po stanovení správné konzistence probíhalo míchání cementové pasty a její zkoušení podle normy ČSN EN 196-3 [61]. Je důležité upozornit na skutečnost, že řada laboratoří používá míchací postup pro cementovou maltu dle ČSN EN 196-1 [62], což vede ke zkreslení nulového času, protože míchání podle normy ČSN EN 196-1 slouží k výrobě vzorků pro zkoušky pevností v tlaku a tahu, kdy je v maltě použito přesné dávky křemičitého písku, což je

zohledněno v postupu míchání. Pro zkoušky počátku a konce tuhnutí dle ČSN EN 196-3 se používá cementová pasta bez kameniva, což mění míchací postup. Veškeré cementové pasty byly míchány dle ČSN EN 196-3 na automatickém míchacím zařízení, které má přesně naprogramovaný postup míchání a zaznamenává čas nula.

Po výrobě byl vzorek umístěn do automatického Vicatova přístroje s odloženým počátkem měření na 150 s. Jednotlivé vpichy probíhaly po 5 minutách. V případě mikrosiliky, která tvoří během tuhnutí na povrchu tvrdou krustu, která zkresluje měření počátků a konců tuhnutí, byl vzorek zkoušen pod vodou, aby se tento jev minimalizoval. Po zkoušce počátku tuhnutí byla realizována zkouška konce doby tuhnutí, která probíhala naprosto identicky, jen byla použita penetrační jehla se „zvonečkem“ a odložení počátku zkoušky bylo zvětšeno na 200 min. Naměřené výsledky jsou shrnuty na Obr. 42.



Obr. 42 Doba tuhnutí a tvrdnutí cementové pasty s různou dávkou příměsí.

4.1.7. Stanovení vlivu příměsí na velikost smršťování způsobeného vysycháním

Předchozí zkoušky počátku a konce tuhnutí jasně ukázaly, že zvýšení vodního součinitele u Mic 30 z 0,4 na 0,49 (viz Tab. 15) mělo významný dopad na dobu konce tuhnutí. Zkoušky rychlosti nárůstu tlakové pevnosti také ukázaly významný propad u Mic 30, což opět způsobila vyšší dávka vody. Jedno z možných vysvětlení je vznik smršťovacích mikrotrhlin od vysychání, a proto byla celá problematika podrobena dalšímu zkoumání. Obecně můžeme smršťování rozdělit na tři následující typy:

- plastické smršťování,
- autogenní smršťování,
- smršťování vysycháním.

Plastické smršťování je podle Bažanta [63] způsobeno vysycháním povrchu čerstvě vybetonované konstrukce v prvních několika hodinách po betonáži. Voda odpařovaná z povrchu je doplňována vodou ze středu konstrukce. Vlivem postupující hydratace se zpomaluje migrace vody ze středu k povrchu, což způsobí rychlejší odpar vody, než je její doplňování, čímž dochází k vysychání povrchových vrstev. Úbytek povrchové vlhkosti způsobí lokální změnu objemu a vznik trhlin s hloubkou do 50 mm, což způsobí porušení krycí vrstvy a následně rychlejší degradaci konstrukce. Účinné ošetřování povrchu betonu např. vodní mlhou významně redukuje tento nežádoucí vliv. Ošetřování povrchu je mnohem účinnější než použití ocelové výztuže, protože v prvotních fázích hydratace je soudržnost betonu s ocelí velmi nízká až nulová.

Autogenní smršťování bylo objeveno La Chatelierem, který zjistil, že objem nezhydratovaného cementu a vody potřebné k hydrataci je větší než objem iontů pocházejících z cementu rozpuštěných ve stejné dávce vody. Autogenní smršťování se nejvíce projevuje ve stáří do cca 24 hodin a není způsobeno úbytkem vody, na rozdíl od ostatních forem smršťování. Vzniká tedy vlastním procesem hydratace a je významnější u vysokohodnotných betonů, kde je nízký vodní součinitel a vysoká dávka cementu, což způsobuje tzv. samovysychání betonu. Samovysychání nastává v případech, kdy jsou jednotlivé póry odděleny od zdroje vnější vody, a tedy voda v těchto pórech uzavřená je spotřebována k hydrataci zrn cementu, což způsobí zmenšení objemu. Tento stav nejde minimalizovat ošetřováním. U betonů s vysokým vodním součinitelem ($> 0,5$) a nízkou dávkou cementu je autogenní smršťování prakticky zanedbatelné.

Smršťování vysycháním je způsobeno odpařováním vody ze ztvrdlého betonu, což způsobí zmenšení objemu. Podle Bažanta [63] dochází nejprve k odpaření vody z velkých pórů v blízkosti povrchu a posléze začínají vysychat menší póry a kapiláry. Míra vysychání je dána vlhkostním gradientem mezi povrchem betonu a okolním prostředím. Vlhkost migruje z místa s vyšším parciálním tlakem vodní páry do místa s nižším parciálním tlakem.

Podle Zongjina [64] dochází k objemové změně betonu vlivem vnitřních tlaků vody absorbované do CSH gelu. CSH gel vstřebává veškerou vlhkost v okolí a tato vrstva se s rostoucí vlhkostí stále zvětšuje. Pokud relativní vlhkost přesáhne hodnotu 100 %, voda obklopující CSH gel je vlivem van der Waalsových sil absorbována mezi dvě vrstvy gelu, což generuje tlak, který vede k mírné expanzi materiálu. Pokud relativní vlhkost klesne, odpovídajícím způsobem klesne také tlak uvnitř struktury betonu a opět za pomoci van der Waalsových sil se vrstva vody oddělí, v důsledku toho se zmenší objem a nastává smršťování. Tento jev nastává, pokud je relativní vlhkost nižší než 45 %.

S dalším možným vysvětlením přichází Collepardi [2], který tvrdí, že smršťování je efekt kapilárního napětí. S postupující hydratací se v betonu zvyšuje objem vzduchu a následně jsou v rámci kapilárních pórů vytvořeny stykové plochy (menisky) mezi vzduchem a vodou, které vytvářejí kapilární napětí. Tento proces odpovídá hydrostatickému tlaku, který vtáhne vzduch do vnitřní struktury CSH gelů. Se snižující se relativní vlhkostí se toto napětí zvětšuje. Tato pravidla přestávají opět platit při snížení relativní vlhkosti pod 45 %.

Při použití příměsí jako částečné náhrady dávky cementu je podle Collepardiho [2] hodnota smršťování vysycháním nižší než u z betonu pouze z cementu. Tuto informaci potvrzuje experiment realizovaný Ahmadem a kol. [65], který nahradil 18 % cementu mikrosilikou a smrštění od vysychání snížil o 20 % (z 360 $\mu\text{m/m}$ na 300 $\mu\text{m/m}$) během 120 dní. Experiment probíhal v Saudské Arábii, kde byl použit cement s obsahem MgO přibližně 2,11 %, což je

zhruba o 60 % vyšší dávka než u CEM I 42,5 R Mokrý. MgO podle Šaumana [6] způsobuje objemovou nestálost. Tímto faktem byly výsledky experimentu znevýhodněny proti výsledkům měřeným na cementu používaném v České republice, přesto naměřené hodnoty jsou relativně nízké a pozitivní efekt mikrosiliky je evidentní.

Experiment realizovaný Abdollahnejadem a kol. [66] byl především zaměřený na náhradu přírodního kameniva keramickým umělým kamenivem. Do rozsáhlého experimentálního programu byly zařazeny i zkoušky smršťování, kde jeden ze zkoušených betonů obsahoval jen přírodní křemičité kamenivo a cement s 30% náhradou popílkem. Smršťování bylo měřeno 50 dní. Délková změna způsobená smršťováním byla během prvních osmi dní stejná pro cementovou pastu s popílkem i bez popílku. Po osmém dni se začal pozvolna projevovat rozdíl mezi těmito dvěma betony a ve stáří 50 dní vykazovala cementová pasta s popílkem o 15 % menší délkovou změnu. Opět byl potvrzen pozitivní vliv latentně hydraulické příměsi.

Na základě předchozích poznatků byl navržen experimentální program, který byl zaměřen na sledování vlivů náhrad cementu na smršťování cementové pasty. Měření délkové změny zkušební tělesa vlivem vysychání probíhalo po dobu téměř $\frac{3}{4}$ roku. Zkušební tělesa v tomto případě byly cementové trámečky 40 x 40 x 160 mm se zabetonovaným ocelovým trnem. Zkušební trn sloužil k správnému zacílení měřicí aparatury. Jako referenční hodnota byla vždy zvolena délka zkušební vzorku po odbednění, které proběhlo cca 24 hodin od betonáže. Z toho vyplývá, že měření nezahrnovalo autogenní a ani plastické smršťování, ale pouze smršťování způsobené vysycháním.

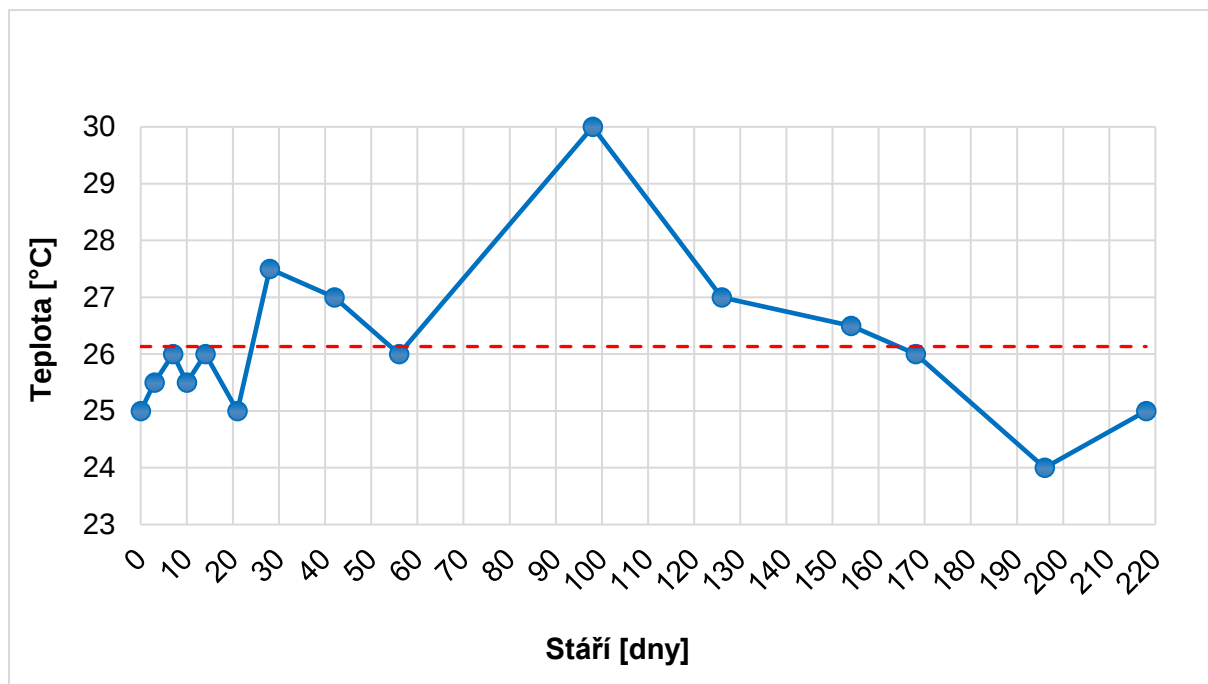


Obr. 43 Ukázka formy pro výrobu zkušebních těles se zabudovanými měřicími trny [67].

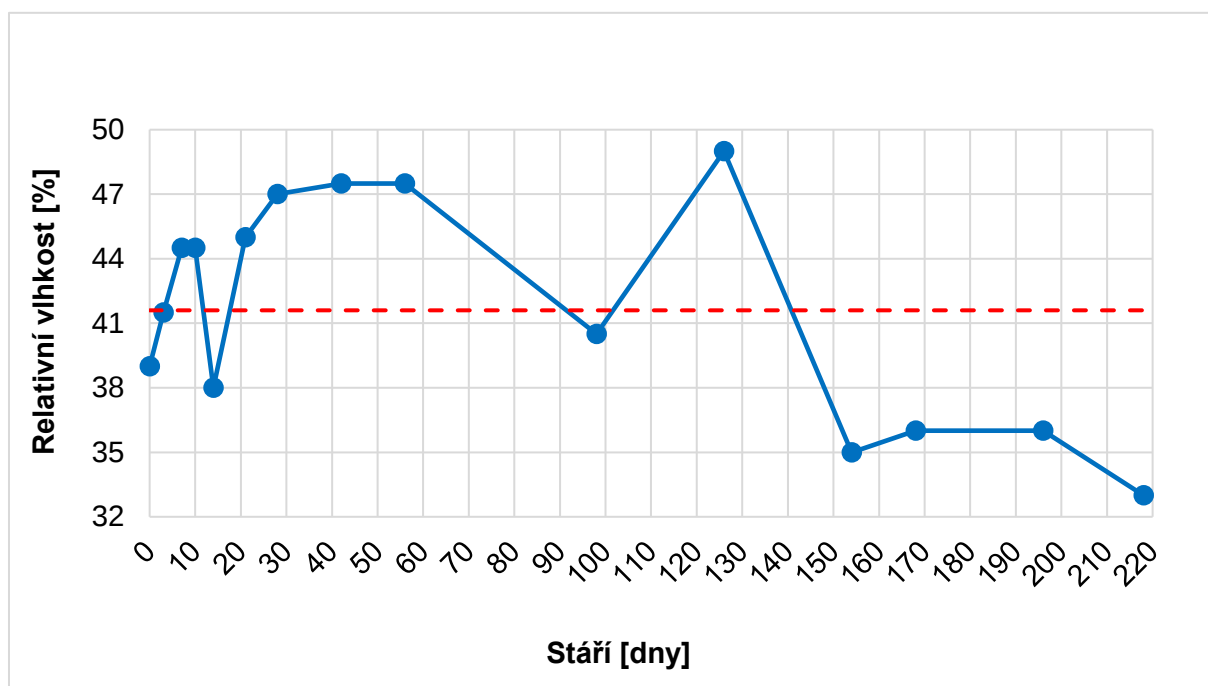


Obr. 44 Ukázka měřicí aparatury [67].

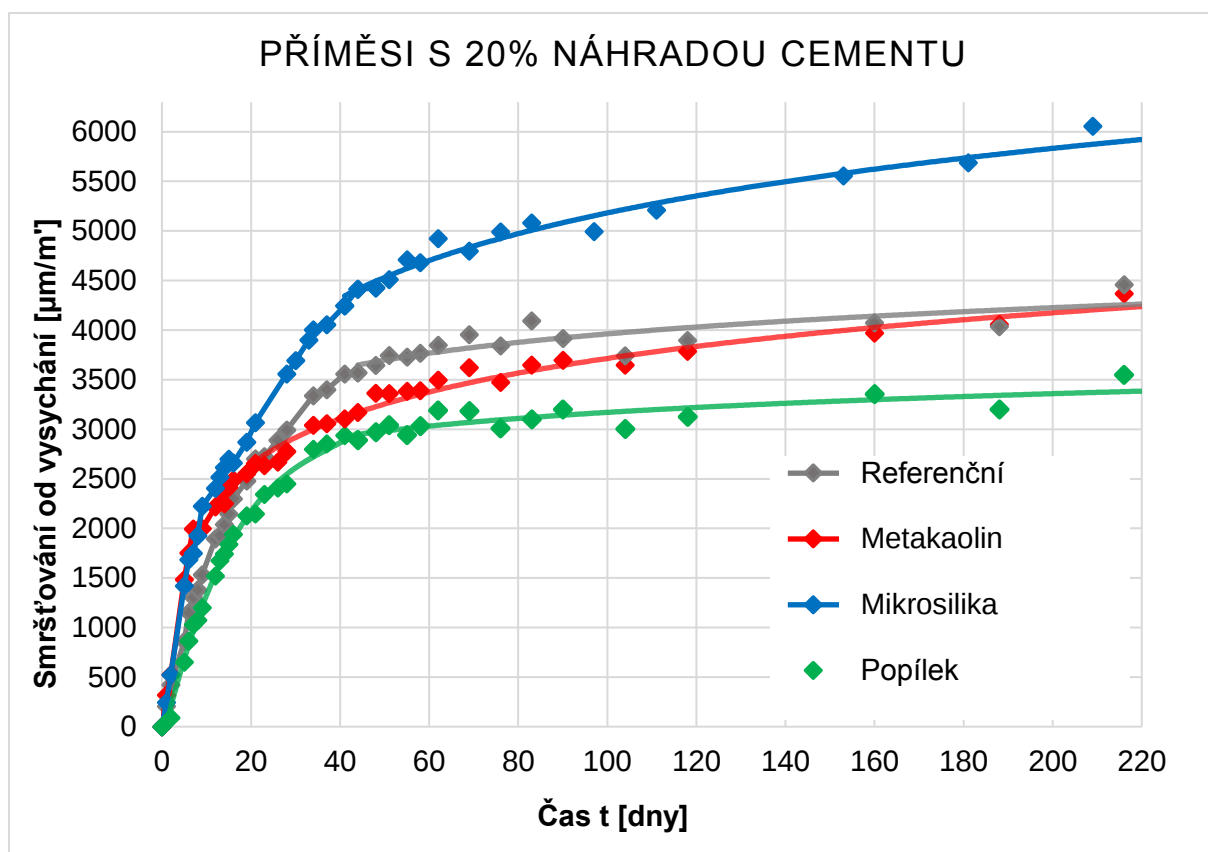
Zkušební tělesa byla vyrobena podle receptury uvedené v Tab. 15, od každého materiálu byla vyrobena 3 tělesa a každé zkušební těleso bylo vždy měřeno třikrát po sobě, tzn. každá publikovaná hodnota je aritmetický průměr z devíti měření. Frekvence měření se během stárnutí vzorků měnila, což je spolu s výsledky patrné z Obr. 47 a Obr. 48. Zkušební tělesa nebylo možné na celý rok uložit do klimakomory, proto výzkum neprobíhal v řízené atmosféře, ale jen v běžném laboratorním prostředí. Z tohoto důvodu bylo během experimentu sledováno vnitřní prostředí laboratoře, které ukazuje Obr. 45 a Obr. 46.



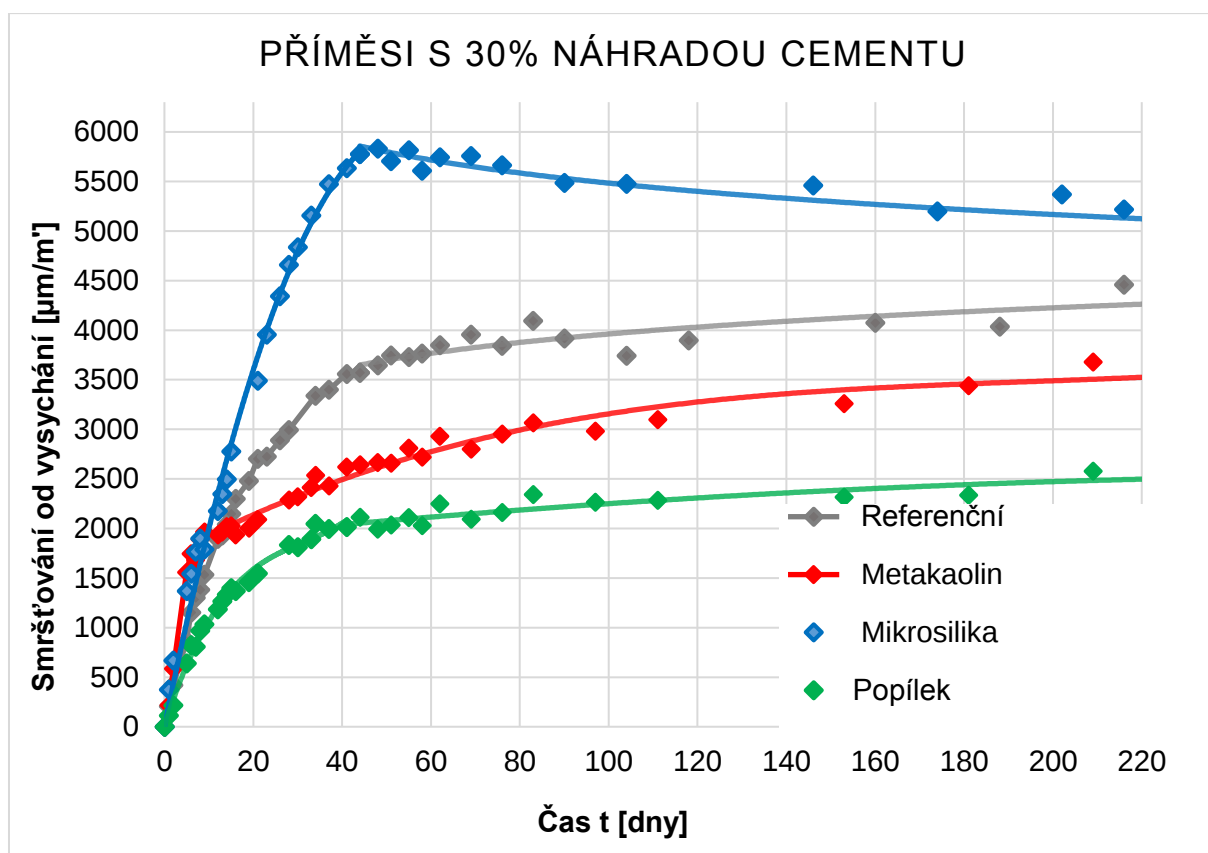
Obr. 45 Průběh teploty prostředí během měření smršťování [67].



Obr. 46 Průběh relativní vlhkosti prostředí během měření smršťování [67].



Obr. 47 Vysychání cementové pasty s 20% náhradou.



Obr. 48 Vysychání cementové pasty s 30% náhradou.

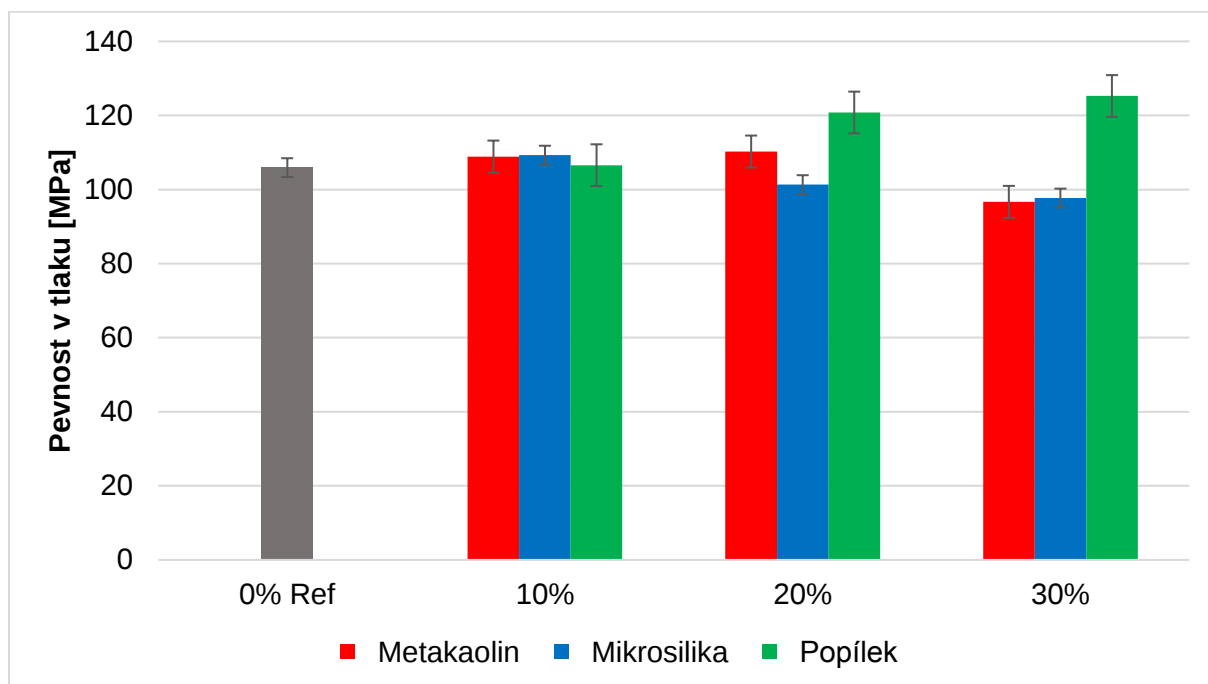
4.1.8. Stanovení vlivu příměsí na mechanické vlastnosti betonu

Po cementových pastách probíhaly zkoušky na betonech. Při sestavování receptury byly využity výsledky z předchozího výzkumu. Kamenivo bylo použito čedičové z kamenolomu Bílčice a původně stanovený poměr míchání jednotlivých frakcí 0/4 : 4/8 : 8/16 v poměru 2,2 : 1,0 : 1,05 (viz kapitola 2.3) byl upraven z důvodu nové dodávky materiálu na poměr 2,28 : 1,2 : 1,00. Cement byl opět použit CEM I 42,5 R – Mokrý (viz kapitola 3.2). V předchozí kapitole byl zkoumán vliv dávek příměsí na vlastnosti cementové malty a ze získaných výsledků vyplynulo, že náhrada cementu ve výši 5 a 50 % nepřináší žádné významné zlepšení vlastností, proto pro zkoušky na betonech byly použity jen náhrady cementu ve výši 10, 20 a 30 %. Vodní součinitel byl konstantní pro všechny receptury a konzistence byla upravována pomocí dávky plastifikátoru. Jednotlivé receptury jsou zobrazeny v Tab. 16.

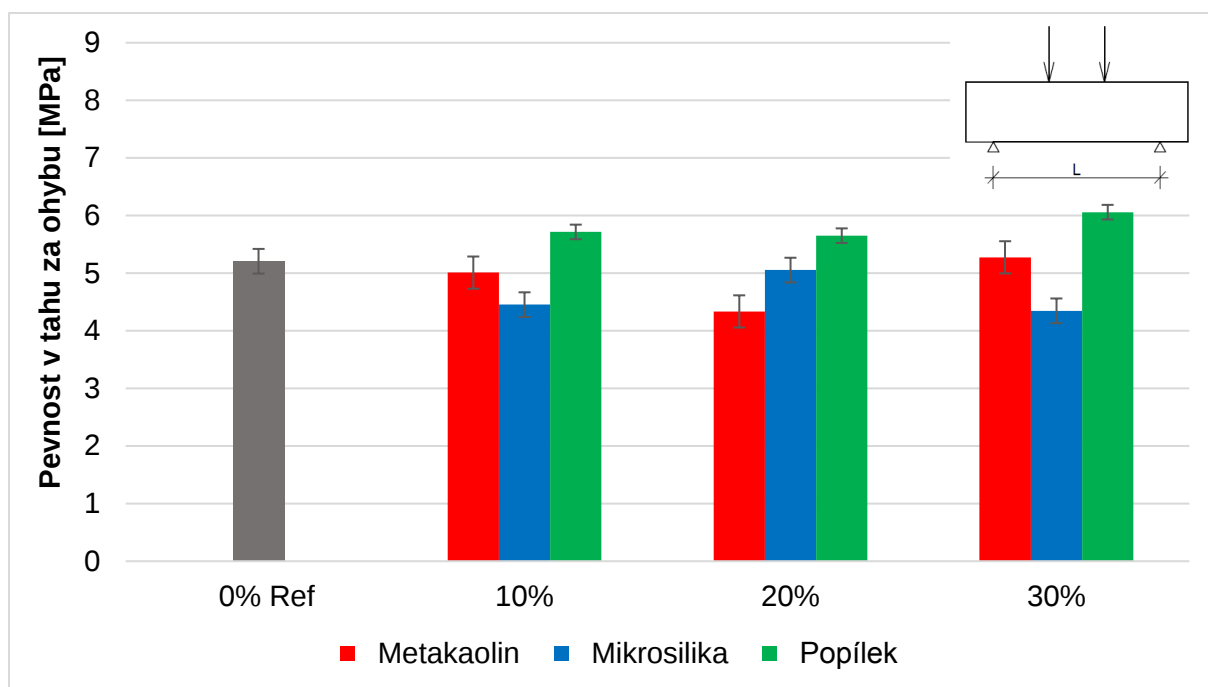
Tab. 16 Receptury pro zkoušky vlivu příměsí na vlastnosti betonu.

Složka	Specifikace	Ref [kg/m ³]	Met 10 Met 20 Met 30 [kg/m ³]	Mic 10 Mic 20 Mic 30 [kg/m ³]	Pop 10 Pop 20 Pop 30 [kg/m ³]
cement	CEM I 42,5 R	800	720 640 560	720 640 560	720 640 560
příměs	metakaolin	0	80 160 240	0	0
	mikrosilika	0	0	80 160 240	0
	popílek	0	0	0	80 160 240
voda	-	210	80 160 240	230 250 273	198 185 172
w/b	-	0,26	0,26	0,26	0,26
kamenivo (čedič)	frakce 8/16	320	320	320	320
	frakce 4/8	390	390	390	390
	frakce 0/4	730	730	730	730
plastifikátor	Stachement 951	25,0	30,0	33,0	30,0

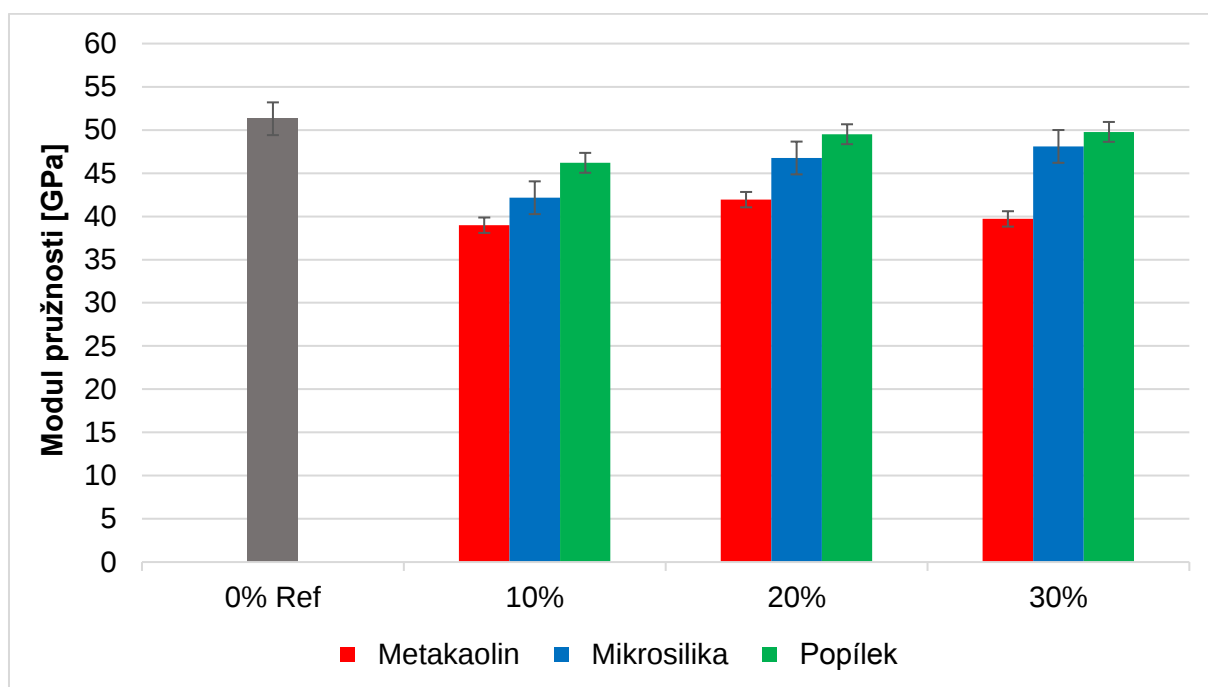
Vliv příměsí na makromechanické vlastnosti byl ověřován pomocí zkoušky tlakové pevnosti, která byla provedena vždy na 6 krychlích o hraně 100 mm od každého materiálu podle normy ČSN EN 12390-3 [28]. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 49. Dále byla provedena zkouška pevnosti v tahu za ohybu s čtyřbodovým uspořádáním dle normy ČSN EN 12390-5 [57] na trámčích 100 x 100 x 400 mm, a to vždy na 3 tělesech pro každou recepturu. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 50. Vliv příměsí byl také ověřován zkouškou statického modulu pružnosti, pro který byly vyrobeny vždy 3 válce o průměru 100 mm a výšce 200 mm od každé receptury. Zkoušky probíhaly dle ČSN EN 12390-13 [29], výsledky jsou zobrazeny na Obr. 51. Poslední zkouškou bylo stanovení hloubky průsaku tlakové vody, která probíhala dle ČSN EN 12390-8 [7]. Pro tuto zkoušku byla použita vždy jedna krychle o hraně 100 mm ze skupiny zkušebních těles určených pro zkoušku tlakem, výsledky jsou zobrazeny na Obr. 52.



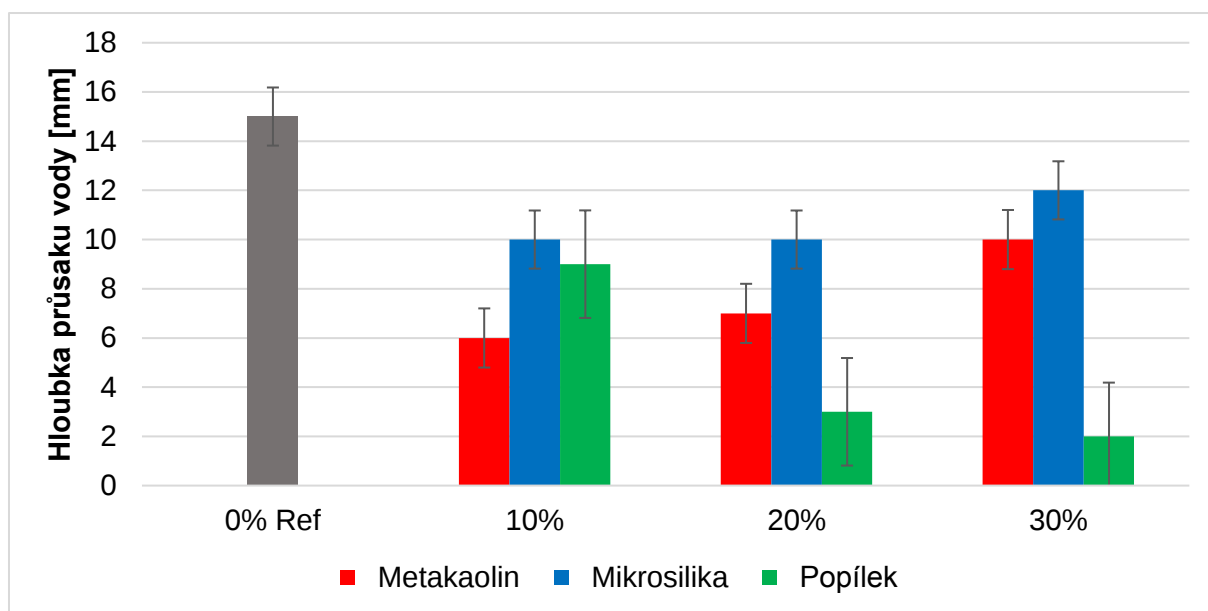
Obr. 49 Pevnost v tlaku při různých náhradách cementu.



Obr. 50 Pevnost v tahu za ohybu při různých náhradách cementu.



Obr. 51 Modul pružnosti při různých náhradách cementu.



Obr. 52 Hloubka průsaku tlakové vody při různých náhradách cementu.

4.1.9. Stanovení vlivu příměsí na velikost ITZ

Ve shodě s kapitolou 2.4 byly provedeny zkoušky nanoindentací a spektrální analýzy, jejichž výsledkem bylo především stanovení změny tloušťky ITZ pro zkoušené materiály. Postup pro identifikaci ITZ odpovídal již popsané metodice a pro přehlednost je zde uvedena jen tabulka s výsledky.

Tab. 17 Naměřené mikromechanické hodnoty [68].

Ozn.	Modul pružnosti LD CSH [GPa]	Modul pružnosti HD CSH [GPa]	Modul pružnosti kameniva [GPa]	Modul pružnosti slínku [GPa]	Tloušťka ITZ [μm]
Ref	31,08 ± 4,65	45,07 ± 2,47	162,78 ± 4,11	128,36 ± 14,99	17,34
Met 10	34,73 ± 4,82	52,32 ± 8,56	167,53 ± 5,99	135,12 ± 18,01	15,38
Met 20	35,15 ± 6,28	53,27 ± 8,71	168,32 ± 6,2	141,2 ± 18,85	15,54
Met 30	35,27 ± 5,69	55,4 ± 6,32	165,45 ± 7,05	138,62 ± 14,42	16,01
Mic 10	32,91 ± 4,16	48,43 ± 5,78	164,58 ± 8,22	122,28 ± 8,5	16,82
Mic 20	33,37 ± 2,92	48,94 ± 4,24	166,84 ± 7,43	135,49 ± 11,74	18,47
Mic 30	34,7 ± 3,17	49,98 ± 3,48	167,47 ± 14	132,65 ± 6,51	18,87
Pop 10	33,45 ± 5,89	54,54 ± 7,63	164,86 ± 4,89	142,13 ± 13,34	16,74
Pop 20	34,95 ± 5,36	54,99 ± 6,38	163,32 ± 7,81	140,22 ± 12,42	16,48
Pop 30	35,62 ± 5,87	57,72 ± 6,4	166,54 ± 8,28	127,57 ± 16,85	18,8

4.2. Rozbor výsledků zkoumání vlivu náhrad cementu na vlastnosti betonu

Shrnutí výsledků včetně komentářů k celé kapitole 4.1 bude provedeno po jednotlivých zkouškách. V každé zkoušce bude hodnoceno pořadí jednotlivých příměsí, které je v závěru této kapitoly uvedeno v Tab. 18.

Měření velikosti částic přineslo zajímavé zjištění, že metakaolin je jemnější než mikrosilika, což byl neočekávaný výsledek, protože z Tab. 14, která byla sestavena z podkladů výrobců, byl u metakaolinu menší měrný povrch než u mikrosiliky. Po konzultaci výsledků s výrobcí vyplynulo, že hodnoty u metakaolinu jsou udávány spíše průměrné a je možná jejich variace, což je pravděpodobně důvod, proč k tomuto výsledku došlo. Bohužel daný jev komplikuje využívání tohoto materiálu v praxi. Rozdíl mezi jemností mikrosiliky a metakaolinu nebyl významný. Z výsledků je dále patrné, že všechny příměsi jsou jemnější, než je samotný cement. Jako nejvhodnější příměs byl v tomto případě vybrán metakaolin z důvodu, že jemnější příměs lépe vyplní póry i mezi zrna cementu. Vzniklá cementová pasta bude hutnější, a tedy i beton bude mít lepší vlastnosti.

Průběh tepelného toku byl sledován jak pro první vrchol, který nastává okamžitě po smíchání cementu s vodou, tak pro druhý vrchol, který nastává v době zrychlené hydratace a je výrazně nižší. Nejnižší hodnotu tepelného toku v počátku hydratace měla mikrosilika s výší náhrady 20 a 50 %, kde byly dosaženy hodnoty kolem 15,6 mW/g, v případě metakaolinu byla nejnižší hodnota dosažena u 20% náhrady s hodnotou 15,8 mW/g. Všechny tyto náhrady dosáhly snížení hodnoty proti hodnotám čistého cementu (cement bez náhrady), který dosáhl hodnoty 20 mW/g. Stejná hodnota byla naměřena i pro popílek s libovolnou mírou náhrady. V případě druhého vrcholu tepelného toku nebyl prokázán přínos metakaolinu, protože u něj nebyl zaznamenán žádný výrazný rozdíl od čistého cementu, tedy k žádné redukci nedocházelo a naměřená hodnota byla 3,0 mW/g. Popílek při 10% náhradě se také choval stejně jako čistý cement, ale pro dávky náhrady 20 a 50 % byl zaznamenán pokles, nejvíce pro 50% náhradu, a to z referenční hodnoty 3,0 na 1,8 mW/g. U mikrosiliky byla situace obdobná, tedy 10% náhrada se chovala velmi podobně jako cement a k redukci došlo až u 20 a 50% náhrady. Redukce však nebyla tak významná jako u popílku, protože maximální hodnota tepelného toku byla pro mikrosiliku s 50% náhradou 2,2 mW/g. Redukce tepelného toku v první fázi hydratace je méně významná pro betonovou konstrukci než redukce druhého vrcholu. Druhý vrchol vygeneruje větší množství tepla, ale beton je v této fázi již tuhý a může dojít ke vzniku trhlin rychlým odpařováním vody. Z tohoto důvodu byl jako nejlepší příměs vybrán popílek, protože jeho schopnost redukovat tepelný tok byla největší.

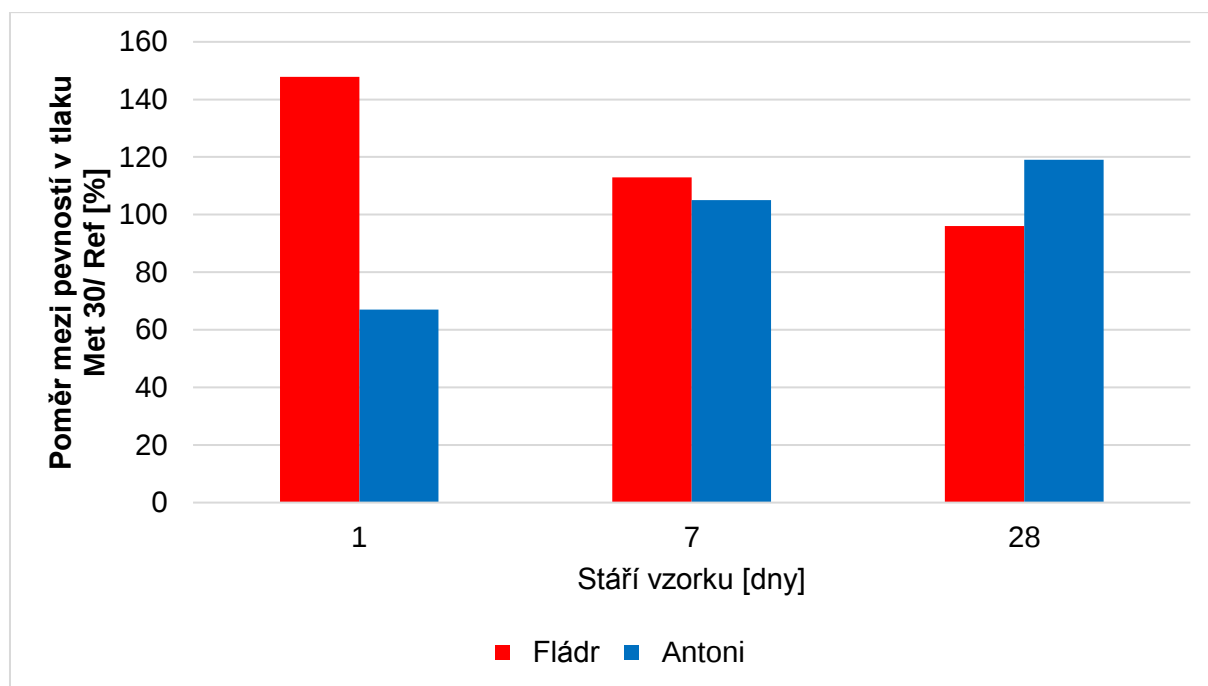
Pevnost v tahu za ohybu měřená na cementových pastách se významně nelišila pro popílek a metakaolin, zato mikrosilika vykazovala nejnižší hodnoty pro celé spektrum procentuálního nahrazení cementu. Absolutně nejlepšího výsledku dosáhl popílek při velikosti náhrady 30 %, kdy tahová pevnost byla 6,1 MPa, což je nárůst o 17 % proti cementu s pevností 5,2 MPa. Popílek také vykazoval nejmenší rozptyl naměřených výsledků.

Tlaková pevnost měřená na zbytcích cementových trámů ze zkoušky ohybem vycházela pro všechny druhy příměsí poměrně vyrovnaně. Významný pokles byl zaznamenán jen u mikrosiliky s velikostí náhrady 30 a 50 %. Šlo o receptury, kde byl z důvodu zpracovatelnosti zvýšen vodní součinitel, což se zde projevilo. Podobné výsledky publikoval i Esfandiari a kol. [48], který při postupném nahrazování cementu mikrosilikou došel k závěru, že tlaková pevnost

roste jen do 15% náhrady a při dalším zvyšování poměru náhrady tlaková pevnost začíná klesat. V tlaku dosahoval nejlepších hodnot metakaolin, který až do velikosti náhrady 30 % nevykazoval žádné snížení tlakové pevnosti proti čistému cementu.

Při zkoušce porovnání rychlosti nárůstu tlakové pevnosti se potvrdily dobré vlastnosti metakaolinu, který při velikosti náhrady 10 % jako jediný ve všech měřených dnech dokázal překonat tlakovou pevnost cementu. Průměrně zkušební tělesa s metakaolinem dosahovala pevnosti 112 % proti vzorkům s čistým cementem. Popílek ve všech měřených dnech při 10% náhradě dosahoval stejných hodnot jako cement a mikrosilika dosáhla vždy horších pevností než čistý cement. Při velikosti náhrady 30 % byly výsledky velmi podobné, až na výrazný pokles pevnosti u mikrosiliky, který byl opět způsoben jiným vodním součinitelem. Naměřené výsledky u metakaolinu odpovídají publikovaným výsledkům zjištěným Antonim a kol. [46], který také při 30% náhradě cementu metakaolinem dosáhl obdobných hodnot. U obou experimentů vyšlo, že nárůst tlakové pevnosti byl u metakaolinu nejrychlejší během prvních 7 dní a dále již stagnoval.

Detailní porovnání výsledků naměřených Antonim a kol. [46] a výsledků tohoto výzkumu potvrzuje předpoklad uvedený v kapitole věnované počátkům a koncům tuhnutí – porovnání publikovaných hodnot je možné jen při stejných podmínkách. Antoni a kol. [46] prováděl svůj výzkum ve Švýcarsku, ale při dodržování evropských norem stejně jako v případě experimentů publikovaných v této práci. Výsledky ukazují na dobrou shodu (viz Obr. 53), na rozdíl od výsledků publikovaných ve východoasijských nebo arabských zemích.



Obr. 53 Poměr mezi tlakovou pevností změřenou na vzorcích Met 30 / Ref.

Vyhodnocením počátků a konců tuhnutí bylo zjištěno, že mikrosilika působí jako částečný zpomalovač tuhnutí a tvrdnutí. Vliv mikrosiliky na zpomalení tuhnutí rostl spolu s velikostí náhrady cementu a při 30% náhradě se prodloužila doba tuhnutí z 210 min naměřených u cementu na 475 min, což představuje nárůst o cca 120 %. Nejmenší vliv na dobu tuhnutí a tvrdnutí měl popílek, který při 30% náhradě cementu posunul počátek tuhnutí na 295 min, což představuje nárůst o 40 %. Naměřené výsledky ukazují, že použitím mikrosiliky se dá významně

prodloužit čas na zpracování vysokohodnotného betonu, aniž by musela být použita zpomalující přísada. Tato oblast by měla být podrobena dalšímu výzkumu, protože naměřené hodnoty jsou poměrně odlišné od výsledků prezentovaných jinými výzkumníky. Cílem následujícího výzkumu by mělo být také potvrzení nebo vyvrácení předpokladů, že diametrálně odlišné výsledky jsou způsobeny rozdílným chemickým složením cementu ve světě.

Sledování vývoje smršťování od vysychání ukázalo, že nejlépe redukuje délkovou změnu popílek. Částečné redukce dosáhly i vzorky s metakaolinem, ale nejhorší výsledky byly naměřeny u mikrosiliky. V obou realizovaných měřeních docházelo naopak k zvětšení délkové deformace proti čistému cementu, a to v průměru o 25 %. K nárůstu délkové změny došlo i u sady vzorků Mic 20, kde nebyl navyšován vodní součinitel jako u Mic 30. Vliv (redukce nebo nárůst) částečné náhrady cementu na objemovou změnu byl vždy tím dominantnější, čím vyšší dávka náhrady byla použita. Při velikosti náhrady 30 % s použitím mikrosiliky došlo během měření k anomálii, kdy zkušební tělesa začala po 40 dnech nabývat. Z počátku byla tato chyba přikládána náhodnému výkyvu hodnot, ale tato změna charakteru chování byla stejná po dobu dalších 240 dní, což odpovídalo 42 měřením. Z tohoto důvodu je vyloučena jak náhodná chyba, tak i systémová chyba měření (u ostatní zkušební vzorků tato změna nenastala). Možnou příčinou této anomálie by mohla být změna okolních klimatických podmínek, ale z pořízených záznamů teploty a vlhkosti (viz Obr. 45 a Obr. 46) vyplývá, že nedošlo k žádné významné změně. Další možná příčina je oslunění vzorků, protože čtyřicátý den měření odpovídal datu 10. 6. 2018, a je tedy možné, že intenzivní oslunění během letních měsíců způsobovalo redukcí smršťování teplotní roztažností. U mikrosiliky by byla tato příčina velmi intenzivní, protože přítomnost mikrosiliky v receptuře mění klasickou šedivou barvu cementu na černou, což má vliv na povrchovou teplotu. Spolehlivé vysvětlení se však nepodařilo najít, a proto jsou výsledky délkové změny u Mic 30 od stáří 40 dnů považovány za neplatné.

Další zkoušky byly prováděny již na betonu.

Měření pevnosti v tahu za ohybu ukázalo, že k žádné jednoznačné změně nedochází. Ke stejnému závěru došel i výzkum realizovaný Tafroui a kol. [45], který při studiu částečných náhrad cementu prokázal, že na hodnotu tahové pevnosti UHPC nemají částečné náhrady cementu vliv. Zhodnocení přínosu jednotlivých příměsí pro Tab. 18 proběhlo podle absolutně naměřených hodnot.

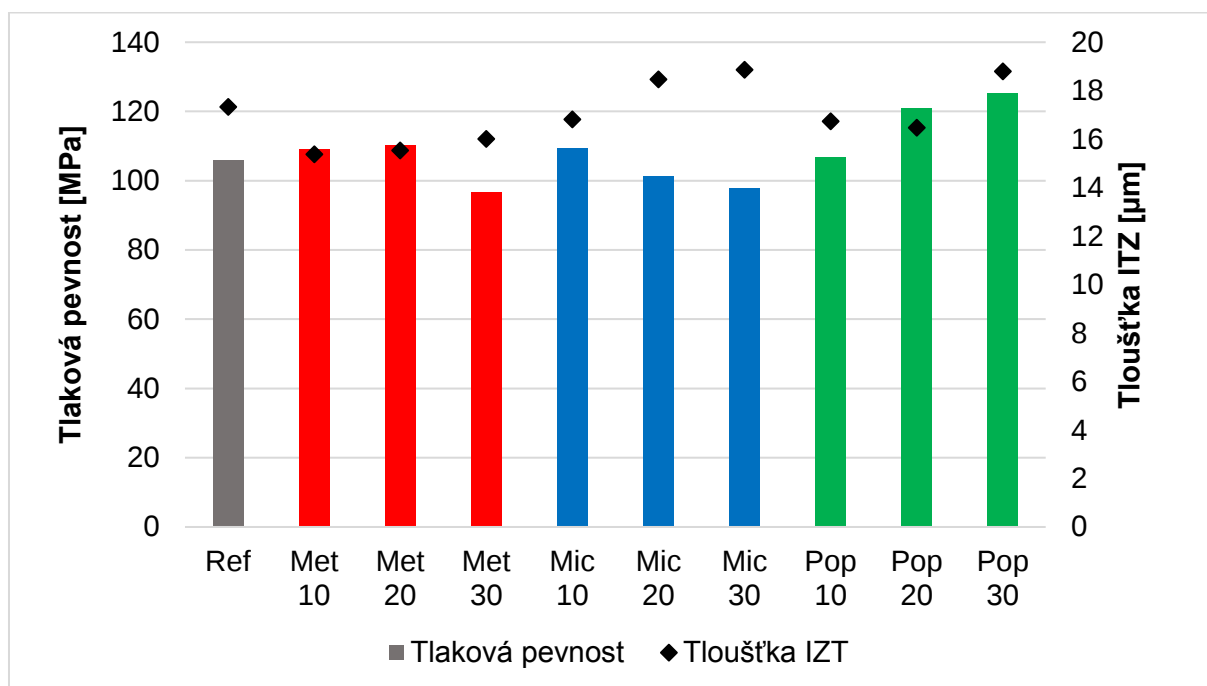
Tlaková pevnost byla také do velikosti náhrady 20 % téměř konstantní, což je v rozporu s výzkumem Esfandiariho a kol. [48], který naměřil nárůst tlakové pevnosti již při velikosti náhrady 5 a 10 %. Při velikosti náhrady 30 % začala tlaková pevnost klesat jak u metakaolinu, tak u mikrosiliky, což byl již očekávaný výsledek. U receptur s náhradou cementu popílkem docházelo k pozvolnému růstu tlakové pevnosti se vzrůstajícím podílem příměsí v receptuře. Zkušební tělesa s označením Pop 30 měla tlakovou pevnost dokonce 118 % pevnosti referenčních zkušební těles.

Měření modulu pružnosti u jednotlivých velikostí náhrad dopadlo vždy ve stejném pořadí. Při libovolné velikosti náhrady byl pokles nejmenší u popílků, vyšší u mikrosiliky a nejvyšší u metakaolinu. Ve všech případech dále došlo k poklesu hodnoty modulu pružnosti proti referenčnímu vzorku.

Nejvyšší hloubka průsaku tlakové vody byla změřena u referenčního vzorku, tedy všechny použité příměsi ve všech zkoušených dávkách redukovaly hloubku průsaku. To potvrzuje

závěr publikovaný Duanem a kol. [36] o pozitivním vlivu příměsí na pórovitost cementového tmele. Duan a kol. [36] zjistili, že už 10% náhrada cementu latentně hydraulickou příměsí pomáhá jak chemicky zlepšit strukturu cementové pasty, tak funguje i jako mikroplnivo. Aby příměs mohla vyplňovat mezery mezi zrny cementu, musí mít menší zrna, což bylo potvrzeno výsledky laserové granulometrie (viz Obr. 30). Největší redukce hloubky průsaku dosáhl popílek. Vliv mikrosiliky a metakaolinu byl obdobný s menší výhodou pro mikrosiliku.

Posledním realizovaným porovnáním byla zjišťována **schopnost ovlivnit tloušťku ITZ**. Detekce tloušťky ITZ proběhla podle metodiky popsané v kapitole 2.4. Výsledek je zobrazen na Obr. 54. Nejlépe redukovala tloušťku ITZ příměs metakaolinu ve všech zkoušených dávkách náhrady. Mikrosilika a popílek při velikosti náhrady 30 % způsobovaly dokonce nárůst ITZ, přesto u těchto vzorků tlaková pevnost rostla. To je způsobeno tím, že mechanické vlastnosti ITZ se zlepšovaly, takže ani celkový nárůst tloušťky ITZ výsledky nezhoršil (viz Tab. 17).



Obr. 54 Porovnání změny tlakové pevnosti a tloušťky ITZ.

Tab. 18 Shrnující hodnocení¹ jednotlivých příměsí.

Parametr	Metakaolin	Mikrosilika	Popílek
Laserová granulometrie	++	++	+
Vývin hydratačního tepla	o	+	++
Tahová pevnost cementové pasty	+	-	+
Tlaková pevnost cementové pasty	o	o	o
Rychlost nárůstu tlakové pevnosti	+	o	o
Počátek a konec tuhnutí	+	++	o
Smrštění cementové pasty	o	--	+
Tlaková pevnost betonu	o	o	o
Tahová pevnost betonu	o	o	o
Modul pružnosti betonu	--	o	o
Hloubka průsaku tlakové vody	+	+	++
Vliv na ITZ	+	o	o

Celkové hodnocení přínosů jednotlivých příměsí shrnuje Tab. 18. Z realizovaných zkoušek vyplynulo, že za nejlepší příměs lze považovat popílek ve velikosti náhrady 30 % z cementu. Během výzkumu se ukázalo, že dodávka této suroviny je problematická a pro široké průmyslové využití nemožná z důvodu malého vyráběného objemu. Popílek také vykazoval velkou proměnnost parametrů v jednotlivých dodávkách. S tímto problémem se setkal při výzkumu i Terzijski [69], a proto popílek nedoporučil pro vysokohodnotné betony.

Ze všech realizovaných zkoušek se ukázalo, že nejvhodnější velikost náhrady cementu je u metakaolinu a mikrosiliky 20 %. Mechanické vlastnosti měřené na betonu byly u obou příměsí poměrně podobné, ale mikrosilika významně redukovala vývoj hydratačního tepla a prodlužovala dobu zpracovatelnosti, což je pro průmyslovou výrobu vysokohodnotného betonu velká výhoda.

Z výše uvedených důvodů byla pro průmyslové aplikace vysokohodnotného betonu zvolena jako nejvhodnější příměs **mikrosilika s velikostí náhrady cementu do 20 %**. Při použití mikrosiliky je nutné vzít v úvahu všechny důsledky zjištěné v této kapitole.

¹ Hodnoticí klíč ++ výrazná pozitivní změna; + pozitivní změna; o nevýznamná změna; - negativní změna; -- výrazná negativní změna

5. Drátky

Při návrhu vysokohodnotného betonu bývá snaha o dosažení co nejvyšších tlakových pevností. Zvyšování tlakové pevnosti betonu je umožněno použitím velmi pevného kameniva a hutné struktury cementové pasty, obě tyto změny také zvyšují modul pružnosti, a tedy i křehkost betonu. Důsledkem je až explozivní porušování vysokopevnostních betonů při tlakové zkoušce. Při tahové zkoušce je chování velmi podobné, beton dlouho odolává vnějšímu zatížení, až náhle dojde ke vzniku trhliny a kolapsu zkušebního tělesa. Ztužením struktury materiálu lze částečně upravit chování z křehkého na houževnaté. Houževnatého chování je dosaženo tím, že rozvíjející se trhliny musí navíc překonávat odpor dispergovaných drátků, což spotřebovává energii pro rozvoj trhliny a ta se šíří pomaleji. Drátky ve struktuře betonu mají podle Lahloua a kol. [70] hned několik pozitivních přínosů: zvyšují tahové pevnosti kompozitu, snižují křehkost, resp. zvyšují duktilitu materiálu a snižují projevy smršťování. Pro ztužení struktury vysokohodnotného betonu se používají výhradně ocelové drátky, i když použití polymerových vláken není vyloučeno, např. z důvodu zvýšení požární odolnosti [71]. Použití polymerových vláken ale vede ke snižování tlakových pevností a snížení trvanlivosti, proto se tato vlákna příliš nevyužívají. Běžná dávka drátků pro vysokohodnotný beton je od 1 až do 2 % objemu (což odpovídá 80 až 160 kg drátků na 1 m³ betonu), ale obsah drátků může být v podstatě libovolný. Podle Aitcina [9] při dávkách drátků do 80 kg/m³ nedochází k výraznému nárůstu tlakové pevnosti betonu, pro zvýšení tlakové pevnosti musí být dávka drátků alespoň 120 kg/m³. Optimální velikost dávky drátků závisí především na jejich tvaru, způsobu zpracování čerstvého betonu (transport, tvar výrobku a způsob hutnění) a samozřejmě na použitém kamenivu.

Při zatížení drátku osovou silou dochází u běžného drátkobetonu k jeho pozvolnému vytrhávání z cementové matrice (platí pro vlákna bez koncové úpravy). V případě matrice vysokohodnotného betonu je spojení mnohem silnější, protože matrice je více hutná a vlivem většího autogenního smršťování je i větší třecí napětí na povrchu drátku. Proto u vysokohodnotného betonu dochází spíše k přetržení drátku než k vytržení (platí pro drátky s běžnou tahovou pevností kolem 1500 MPa). Přetrhávání drátků je ideální stav z ekonomického hlediska, protože poměrně drahé drátky, jejichž cena může tvořit až ½ ceny celého krychlového metru vysokohodnotného betonu, jsou plně využity.

Pokud je potřeba dále zvyšovat tahovou pevnost a není již možné nebo ekonomicky únosné zvyšovat dávku drátků, lze zlepšení dosáhnout dvěma způsoby. První variantou je zvýšení pevnosti oceli, ze které jsou drátky vyrobeny. Tím se docílí toho, že i v matrici vysokohodnotného betonu bude docházet k vytrhávání drátků místo jejich přetržení. Zkušební těleso bude při porušování vykazovat houževnaté chování, protože část práce vnitřních sil bude využita na vytahování jednotlivých drátků z matrice. Tento jev oproti přetržení drátku spotřebovává méně energie, ale výrazně zpomaluje nárůst deformace. Nevýhoda tohoto řešení je významný nárůst ceny za použité drátky.

Druhá varianta spočívá v zachování stejného druhu oceli, ale vyžaduje změnu geometrie drátků na drátky kratší a s menším průměrem. Tím dojde při zachování stejné hmotnostní dávky drátků k nárůstu jejich počtu v 1 m³ betonu, což vede k rozložení tahového napětí mezi větší počet drátků, a tedy ke snížení namáhání jednotlivého drátku. Podle Vodičky [72] navíc

dojde ke zvýšení homogenity celého kompozitu. Nárůst ceny bude při tomto řešení zanedbatelný, ale výrazně se zhorší zpracovatelnost čerstvého betonu.

Z výzkumu realizovaného Orgassem a Klugem [73] vyplývá, že při použití pouze krátkých drátků, které zlepšují duktilitu vysokohodnotného betonu, dojde pouze k minimálnímu zvýšení pevnosti v tahu. Efektivního zvýšení tahové pevnosti je možné docílit použitím pouze dlouhých vláken s koncovou úpravou. Orgass a Kluge [73] ve své práci doporučují použití kombinace obou typů drátků jako ideálního způsobu ztužení cementové matrice pro vysokohodnotné betony. Během jejich realizovaného experimentu použili drátky o délce 13 mm a průměru 0,16 mm jako „krátké drátky“ a drátky o délce 30 mm a průměru 0,5 mm jako „dlouhé drátky“. Při výrobě byly zhotoveny tři série: bez vláken, označované „0 Vol.-0%“, pouze s krátkými vlákny s objemovým stupněm ztužení 1 %, označované „1 Vol.-1%“ a poslední série byla ztužena kombinací dlouhých a krátkých vláken, kde každý druh vláken dosahoval 1 % objemového stupně ztužení, označováno „2 Vol.-2%“. Ze všech materiálů byla vyrobena různá tělesa pro zkoušku tlakem a ohybem. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 19 a Tab. 20.

O rozdělení drátků na dlouhé a krátké podle Vodičky [72] rozhoduje maximální velikost zrna kameniva. Pokud je délka drátku menší nebo rovna D_{max} , jedná se o drátek krátký. Dlouhý drátek je takový, který má délku alespoň $2 \times D_{max}$. Je samozřejmě možné používat drátky, které spadají do tohoto intervalu, ale u nich není možné použití výhody kvalifikace na dlouhé a krátké. Přínos těchto drátků pro cementovou matici je kombinací účinků drátků dlouhých a krátkých, celková efektivita je však nižší.

Tab. 19 Hodnoty tlakové pevnosti měřené na různých tělesech [73].

Zkušební těleso [mm]	Parametr	Dávka drátků		
		0 Vol.-0%	1 Vol.-1%	2 Vol.-2%
Krychle 100x100x100	Pevnost v tlaku [MPa]	137	142	151
	Navýšení o [%]	---	4,3	10,8
Válec Ø150/300	Pevnost v tlaku [MPa]	129	132	129
	Navýšení o [%]	---	2,6	0
Válec Ø100/300	Pevnost v tlaku [MPa]	109	126	129
	Navýšení o [%]	---	15,8	18,6

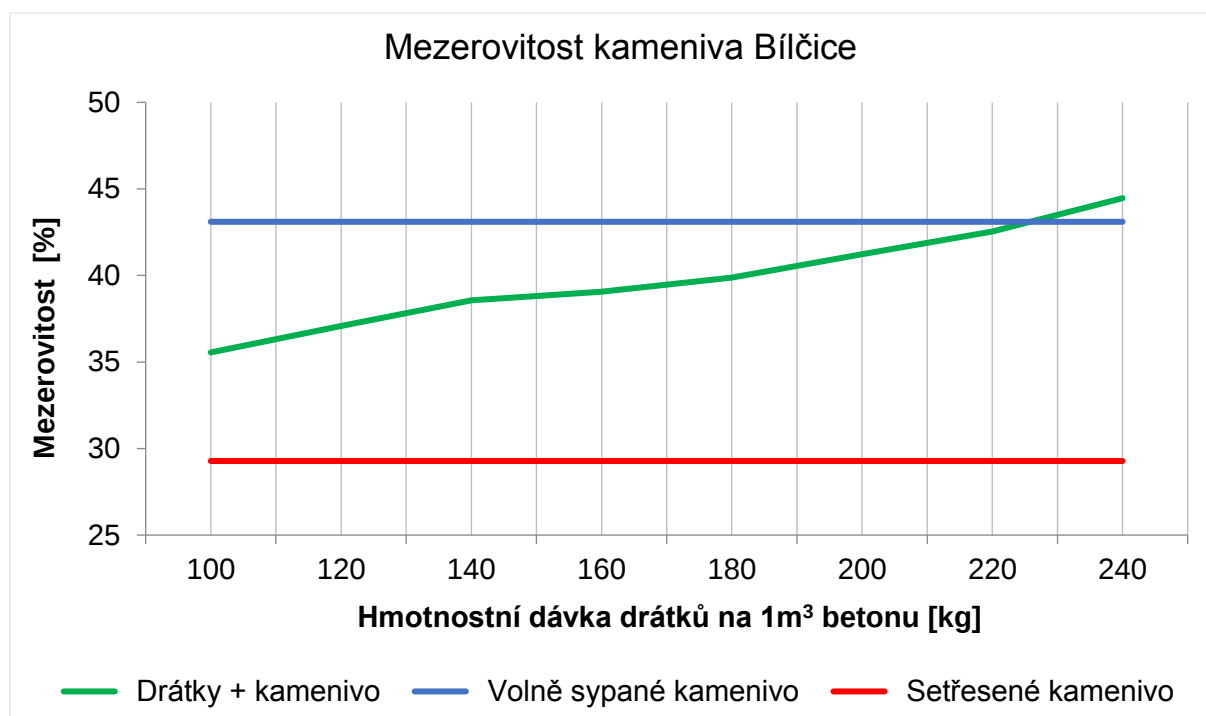
Tab. 20 Hodnoty tahové pevnosti měřené na různých tělesech [73].

Zkušební těleso [mm]	Parametr	Dávka drátků		
		0 Vol.-0%	1 Vol.-1%	2 Vol.-2%
Krychle 150x150x150	Pevnost v příčném tahu [MPa]	9,1	10,0	11,5
	Navýšení o [%]	--	9,9	26,4
Trámce 150x150x700	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	7,1	8,1	9,9
	Navýšení o [%]	---	14,1	39,4
Trámce 100x100x200	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	7,7	9,2	9,8
	Navýšení o [%]	--	19,5	27,3

5.1. Vliv drátků na nakypření kameniva

Pro potřeby vývoje vlastní receptury vysokohodnotného betonu byl ve vztahu k drátkům ověřován pouze vliv na zvýšení mezerovitosti kameniva přidáním vláken a rovnoměrnost rozložení drátků po průřezu. Pro experiment byla použita navržená křivka zrnitosti kameniva z kamenolomu Bílčice (viz kapitola 2.3). Do smíchaných frakcí kameniva byly postupně přidávány krátké drátky Dramix OL 13/20. Vzniklou suchou směsí byla vždy naplněna nádoba s definovaným objemem, a to vždy v absolutně zhutněném stavu směsi. Následně byla nádoba zvážena. Poté byla do suché směsi přidána další dávka drátků a směs byla promíchána. Poté se celý cyklus hutnění a vážení opakoval. Z definovaného objemu a zjištěné hmotnosti byla dopočítána mezerovitost. Zjištěné výsledky jsou graficky znázorněny na Obr. 55.

Pro návrh receptury vysokohodnotného betonu je hodnota mezerovitosti důležitá, protože objem mezer je nutné vyplnit jemnými složkami, jako je filler, cement nebo jiná vhodná příměs.



Obr. 55 Změna mezerovitosti způsobená přidáním různých dávek drátků.

5.2. Homogenita vysokohodnotného betonu

Základem pro správné aplikace drátků v běžném drátkobetonu nebo vysokohodnotném betonu je dosažení homogenního betonu, tedy betonu, kde jsou jednotlivé drátky všesměrně orientované a jsou od sebe zhruba stejně daleko. To znamená, že netvoří v některých místech shluky, tzv. „ježky“. Dosažení rovnoměrného rozložení drátků a jejich všesměrné orientace je technologicky velmi náročný úkol. Podle Vodičky [72] je paradoxně jednodušší dosažení rovnoměrnosti rozptýlení drátků při jejich vyšších dávkách než při extrémně malých (kolem 20 kg/m³). Vodička [72] tento paradox publikoval v roce 1999, tedy před rozvojem vysokohodnotných betonů a používáním dávek drátků převyšujících 120 kg/m³.

Pokud je homogenity dosaženo, vzniklý kompozit má ve všech směrech podobné vlastnosti, což je důležité pro chování konstrukce. Někteří výzkumníci se naopak snaží již během výroby umístit drátky do oblasti s nejvyšším namáháním a drátky ještě usměrnit do hlavních trajektorií tahových napětí, např. Mansur a kol. [74], který pro tlačené vzorky orientoval drátky kolmo na směr zatížení. Pujadas a kol. [75] a [76] dokonce stanovil vztah mezi mechanickými vlastnostmi drátkobetonu a orientací drátků. Pro orientaci drátků byly vytvořeny různé metody – např. orientace drátků způsobená speciálním způsobem lití čerstvého betonu do deskových forem zkoumaná Stählim a kol. [77], orientace drátků vlivem úzkého bednění zkoumaná Zerbinem a kol. [78] nebo orientace drátků pomocí magnetického pole zkoumaná Wijffelsem a kol. [79] spolu s Muem a kol. [80].

Je zřejmé, že se řada výzkumníků snaží místo homogenního drátkobetonu získat drátkobeton s usměrněnými drátky, což je podle autora této práce nebo Vodičky [72] cesta špatným směrem hned z několika důvodů:

- Orientovaná vlákna nemohou minimalizovat dopad nesilových zatížení jako je např. smršťování, protože to probíhá všesměrně, i když jeho vliv se může v jednotlivých směrech lišit podle rozměrů konstrukce.
- Většina konstrukcí není zatížena pouze jedním typem namáhání, ale v reálných konstrukcích se vždy jedná o kombinaci namáhání, např. tlak + ohyb, ohyb + smyk, ohyb + kroucení apod. Všesměrně orientované drátky se zapojí do všech typů namáhání konstrukce.
- Konstrukce může být vystavena i mimořádnému zatížení např. výbuchem, které změní její plánovaný způsob namáhání nebo dokonce obrátí původní smysl plánovaného namáhání. V případě násilného uspořádání drátků např. ke spodnímu povrchu se nebude v mimořádné situaci konstrukce chovat jako drátkobetonová, ale pouze jako betonová.

Zajištění rovnoměrnosti rozptýlení drátků je v betonu těžko kontrolovatelné na rozdíl od výztužných prutů v železobetonu, které lze jednoduše vizuálně kontrolovat ještě před betonáží nebo pomocí radarů a elektromagnetů po betonáži. V současnosti existuje několik metod, jak ověřit homogenitu ztvrdlého vysokohodnotného betonu, ale používané metody jsou velmi sofistikované nebo velmi pracné.

Jednou z jednoduchých metod je odebrání vzorků z konstrukce a následné rozdrcení pomocí kladiva nebo hydraulického lisu (Ferrara a Meda [81]). Ze vzniklého prachu mohou být vlákna vybrána ručně nebo pomocí magnetu (Ferrara a kol. [82]), následně jsou vlákna zvážena a je dopočítán objemový stupeň ztužení. Celá metoda je velmi pracná a nepřesná, protože během drcení může dojít ke ztrátě části vzorku nebo ocelové drátky nebudou důsledně zbaveny zbytků cementového tmele, což ovlivní jejich hmotnost během vážení. Tato metoda také není schopná popsat rozložení vláken ve vzorku.

Další metody využívají magnetismu drátků. Zkušební zařízení se skládá z cívky a analyzátoru impedance. Vzorek je umístěn do cívky, kde dochází k modifikaci magnetického pole vlivem drátků umístěných ve vzorku, což vede k změně indukce měřené pomocí analyzátoru impedance. Podle Vítka a kol. [83] je nutné vzorek analyzovat ze tří navzájem kolmých stran. Měření poskytuje pouze informaci o množství drátků, ale nikoliv o jejich rozložení ve vzorku.

Modifikaci předchozí metody navrhli Vodička a Hobst [84], kteří celý systém otočili a cívku vkládají do vývrtu ve vzorku. Tato úprava umožňuje testování libovolně velkého tělesa a je možné ji použít i v terénu, ale ostatní nevýhody stále přetrvávají.

Nejsofistikovanější metodou je použití počítačové tomografie (CT). Vzorek je umístěn do skeneru CT, který naměří rozložení drátků v jednotlivých řezech. Pro další zpracování výsledků je nutné sestavení 3D modelu struktury vysokohodnotného betonu, což podle Ponikiewskiho a kol. [85] vyžaduje značné znalosti z oblasti programování a zpracování obrazu. Tato metoda je velice přesná a charakterizuje jak množství drátků ve vzorku, tak jejich rozložení a orientaci. Získání výsledků je velmi časově náročné a nákladné na vybavení, proto se hodí na špičkový výzkum, nikoliv jako zkouška v běžném zkušebnictví.

Autor tohoto textu spolu s Ing. Bílým se rozhodli vytvořit jednoduchou metodiku a program pro rychlé hodnocení homogenity vysokohodnotného betonu. Hodnocení probíhá pouze ve 2D řezech. Zkušební těleso z vysokohodnotného betonu je rozříznuto a následně je pořízena fotografie řezné plochy, která se dále vyhodnocuje. Řez je možné realizovat na zkušebním tělese z vysokohodnotného betonu, které bylo pro tento účel vyrobeno, což bývá nejčastěji

krychle o hraně 150 mm. Řeznou plochu je také možné zhotovit rozříznutím vývrtu pořízeného z již realizované konstrukce.

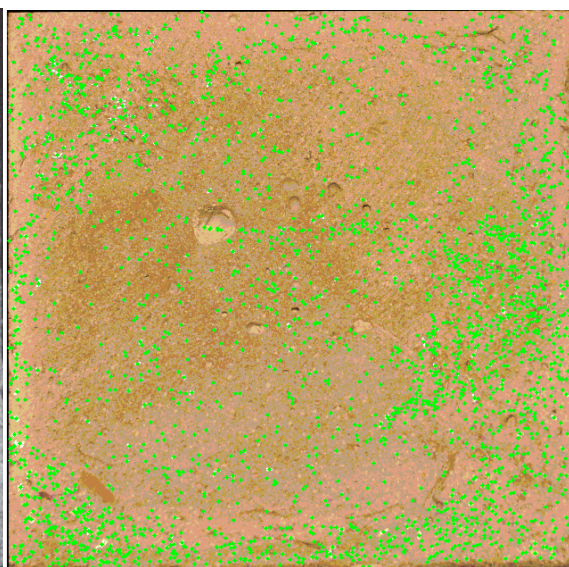
Fotografii řezné plochy je vhodné pořídit co nejdříve po realizaci řezu a je nutné fotografovanou plochu vhodně nasvítit tak, aby čerstvě přeříznuté drátky vytvořily odlesk a tím byly jednotlivé drátky více kontrastní proti betonu. Při řezání vzorků jsou většinou použity diamantové pily s vodním chlazením, které zapříčiní nasáknutí chladicí vody do struktury betonu během řezání. Nasáklý beton má tmavší barvu, což zlepšuje kontrast lesklých plošek jednotlivých drátků. Odložení pořízení fotografie zapříčiní vznik povrchové koroze na řezných plochách ocelových drátků, což vede k zhoršení odlesku.

K pořízení fotografie je použit kvalitní fotoaparát umístěný na stativu, aby nedošlo k rozmazání fotografie, což by zkreslilo výsledky analýzy. V ideálním případě by měl být použit profesionální fotoaparát s rozlišením minimálně 8 Mpx a pevným objektivem se střední ohniskovou vzdáleností. V praxi je možné použít i objektiv se zoomem, ale je pravděpodobné, že dojde ke zkreslení obrazu a bude nutné pořízené fotografie před vlastní analýzou digitálně upravit, což významně zvýší časovou náročnost celé analýzy. Během fotografování je dále vhodné vypnutí automatické funkce pro vyvážení bílé barvy, protože tato funkce může potlačit intenzitu odlesku drátků.

Před nahráním fotografie do vyhodnocovacího programu je nutné provedení její základní úpravy. Nejprve je nutné ořezat fotografii tak, aby na ní byla zobrazena pouze zkoumaná oblast vysokohodnotného betonu. Dále je vhodné, ale není to nutné, upravit případné zkreslení hran fotografie a pomocí úpravy kontrastu a sytosti barev zvýraznit viditelnost drátků, případně provést i gama korekci, čímž by se měla zvýšit intenzita odlesku drátků. Rozhodně se nedoporučuje používat funkce na dodatečné doostření obrazu, protože ty většinou vytvoří nové světlé body, které mohou být později interpretovány jako drátky.



Obr. 56 Ořezaná fotografie řezné plochy betonu [86].



Obr. 57 Fotografie po úpravě a načtení do vyhodnocovacího programu s detekovanými drátky [86].

Program ASEF (Automatic Specimen Evaluation of Fibres) vznikl v programovacím jazyce MATLAB. Pro jeho používání není nutné vlastnit licenci programu MATLAB, ale stačí mít nainstalovanou volně dostupnou knihovnu MATLAB Compiler Runtime (MCR). Vlastní vyhodnocení je uživatelsky velmi přívětivé a jednoduché. Uživatel nejprve načte do programu analyzovanou fotografii ve formátu JPEG nebo PNG, dále musí zadat skutečné rozměry zkoumané plochy, aby mohl být ověřen objemový stupeň ztužení. Dále je třeba graficky vybrat jeden typický drátek, což slouží k tomu, aby si program načel z fotografie barvu drátků, kterou si následně uloží jako vektor souřadnic barevného prostoru RGB.

$$\vec{c}_{sel} = (r_{sel}, g_{sel}, b_{sel}) \quad (7)$$

Dále se spustí detekční algoritmus pro vyhledávání drátků. Každý pixel obrázku je charakterizován svými vlastními souřadnicemi barevného prostoru RGB:

$$\vec{c}_{ij} = (r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}). \quad (8)$$

Velikosti barevného vektoru RGB vybrané barvy s_{sel} a barevného vektoru RGB jednotlivých pixelů s_{ij} se vypočítají podle vzorce:

$$s_{sel} = |\vec{c}_{sel}| = \sqrt{r_{sel}^2 + g_{sel}^2 + b_{sel}^2}, \quad (9)$$

$$s_{ij} = |\vec{c}_{ij}| = \sqrt{r_{ij}^2 + g_{ij}^2 + b_{ij}^2}. \quad (10)$$

Pixel je vyhodnocen jako potenciální drátek v případě, že:

$$s_{ij} \geq F \cdot s_{sel} \quad \wedge \quad r_{ij} \geq F \cdot 215, \quad (11)$$

kde F je faktor citlivosti. Druhá část podmínky říká, že červená RGB souřadnice pixelu musí být větší nebo rovna 215. Na základě dlouhodobých zkušeností autorů nejsou drátky v dobře pořízeném snímku prezentovány odstínem šedé barvy s červenou souřadnicí menší než 215.

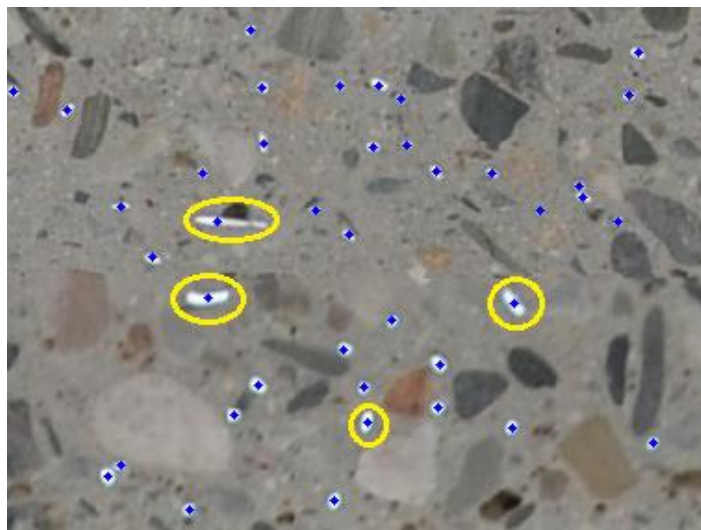
Citlivost F je po stanovení automatické hodnoty možné uživatelsky změnit, což se děje v případech, že program detekuje zrna kameniva jako drátky nebo nedetekuje některé drátky. Hlavním důvodem pro zavedení hodnoty citlivosti byla skutečnost, že zdroj světla způsobující odlesk drátků má různou vzdálenost od jednotlivých drátků na zkoumané ploše, což způsobuje různou intenzitu odlesku u drátků blíže ke zdroji světla a drátků nejvíce vzdálených od zdroje světla. Citlivost umožňuje detekovat mírně odlišné odstíny vybrané barvy.

Samozřejmě ne všechny pixely detekované jako potenciální drátek lze počítat jako skutečný drátek. Je potřeba vzít v úvahu dva hlavní aspekty:

- Každé vlákno se u kvalitního obrazu skládá z několika pixelů, ale pouze jeden pixel může být v analýze započítán jako drátek. Za předpokladu, že plocha jednoho drátku je a_f a kruhový průřez drátku má teoretický poloměr drátku r , je minimální vzdálenost l_{min} mezi středy dvou drátků dána vztahem:

$$l_{min} = 2r = 2\sqrt{\frac{a_f}{\pi}}. \quad (12)$$

- Za předpokladu všesměrně orientované výztuže musí existovat velké množství drátků, kterými bude probíhat řezná rovina šikmo. To má za následek, že řez tímto drátkem již není kruh, ale elipsa. Aby program nevyhodnotil tuto elipsu jako dva drátky, jsou ze seznamu potenciálních drátků odstraněny drátky, jejichž vzdálenost od dalšího potenciálního drátku nevyhovuje rovnici (12).



Obr. 58 Ukázka správné funkce programu.

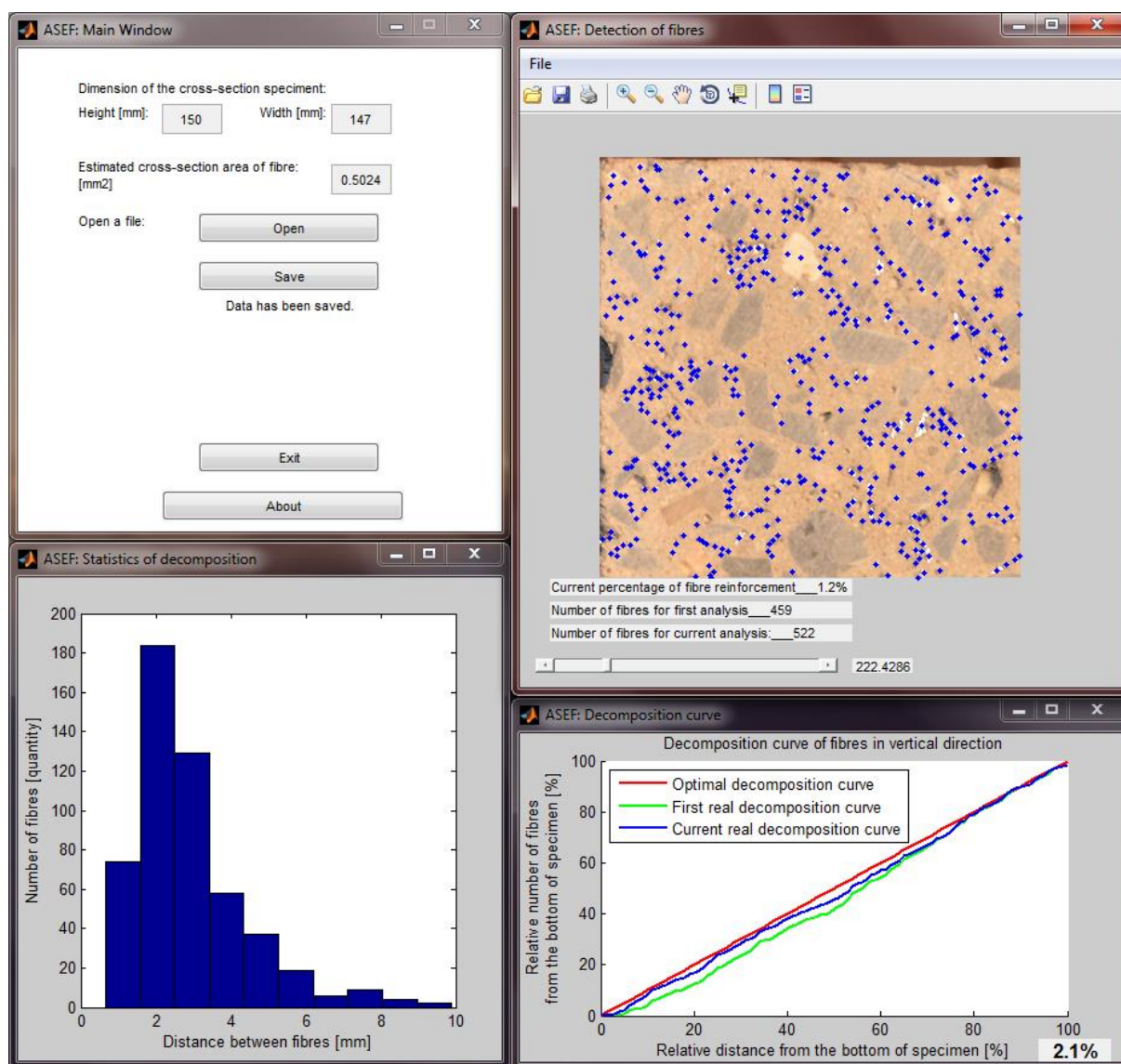
Výsledkem analýzy jsou dva grafy. První je histogram zobrazující počet drátků, které mají stejnou hodnotu minimální vzdálenosti k dalšímu drátku. V teoretické variantě zcela rovnoměrného rozložení drátků v průřezu by měl histogram pouze jeden sloupec. V praxi se ukázalo, že vzorek, který má méně než 5 dominantních sloupců, lze považovat za homogenní, pokud jsou ostatní sloupce histogramu zanedbatelně malé.

Hlavním výstupem je křivka porovnávající skutečné rozložení vláken s ideálním. Tato křivka ukazuje závislost relativního počtu drátků na relativní vzdálenosti od spodního okraje. V ideálním případě má tato křivka sklon 1:1 (tedy 45°). Čím více se skutečná křivka blíží ideálnímu stavu, tím je rozložení drátků v betonu více rovnoměrné. Z porovnání reálné křivky a ideální křivky je možné také určit oblast (horní nebo dolní okraj), kde drátky přebývají nebo naopak chybí. Pro kvantitativní hodnocení vzorku program stanoví průměrnou odchylku mezi ideální a skutečnou křivkou rozložení drátků. Hodnota je vypočítána jako aritmetický průměr z odchylek zjištěných v jednotlivých bodech křivky, což odpovídá vztahu (13):

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |k_i - j_i|, \quad (13)$$

kde n je počet skutečných bodů křivky, k_i je relativní množství vláken v daném bodě skutečné křivky a j_i je relativní množství vláken v daném bodě ideální křivky. Jako poslední program stanoví také hodnotu objemového stupně ztužení (vztah (14)) podle naměřených hodnot, kde n je počet všech detekovaných drátků, a_f je plocha jednoho drátku a d_x spolu s d_y jsou skutečné rozměry analyzované plochy.

$$\rho = \frac{n \cdot a_f}{d_x \cdot d_y} \quad (14)$$



Obr. 59 Ukázka programu ASEF, vlevo nahoře – zadávací okno, vpravo nahoře – detekované drátky s možností změny citlivosti F , vlevo dole – histogram vzdálenosti drátků, vpravo dole – porovnání skutečného rozdělení drátků s ideálním.

Všechny grafy je možné po skončení analýzy exportovat jako obrázky ve formátu JPG nebo jako data ve formátu XLSX.

Podobnou myšlenku pro hodnocení homogenity vysokohodnotného betonu rozvíjeli i Burcu a Tasdemir [87] nebo Sebaidi a kol. [88], ale jejich vyhodnocovací program je velmi složitý na ovládání a z jejich publikovaných materiálů není zcela jasné, jak pořizují fotografie pro analýzu a na jakém principu drátky detekují. Všechny tyto nedostatky eliminuje program ASEF, který poskytuje jednoduchou a rychlou analýzu rozložení drátků. Jedinou jeho nevýhodou je vyhodnocování pouze 2D plochy. Pro získání představ o rozložení drátků ve 3D je nutné zkušební těleso rozřezat a 2D analýzu provést na každém řezu zvlášť. Následně by bylo nutné použít podobného počítačového vybavení jako u počítačové tomografie (CT) a z několika 2D obrazů sestavit jeden 3D obraz. Tato operace by byla již velice náročná.

5.2.1. Ověření rovnoměrnosti rozložení drátků u navrhovaného betonu

Pro ověřování rovnoměrnosti drátků v betonu byl realizován experiment, kde bylo vyrobeno vždy 7 krychlí o hraně 150 mm od každé receptury uvedené v Tab. 21. Tři krychle sloužily k ověření tlakové pevnosti a čtyři byly použity pro měření rovnoměrnosti rozložení drátků pomocí programu ASEF. Před vlastním měřením byly krychle rozříznuty na třetiny, tedy na tloušťku 50 mm. Právě středová část sloužila k měření homogenity, protože v krajních částech krychle je rovnoměrnost drátků narušena stěnovým efektem bednění.

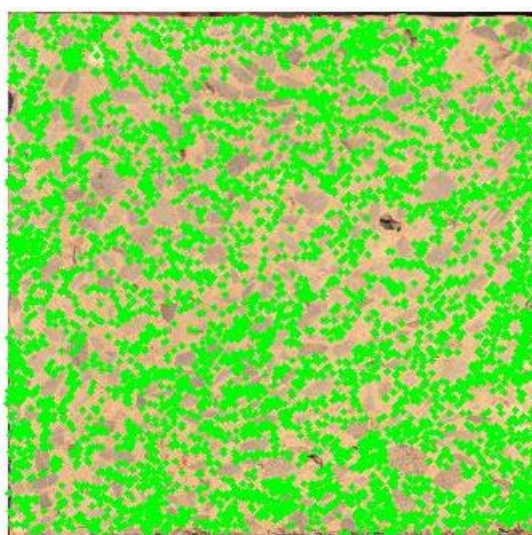
Řezné plochy středových částí byly vyfotografovány a výsledky byly vyhodnoceny pomocí programu ASEF. Hlavní sledovaný parametr byl rozdíl v rozložení skutečných drátků od ideálního rozložení, jak je ukázáno na Obr. 62.

Tab. 21. Receptury betonu pro ověření rovnoměrnosti rozložení drátků

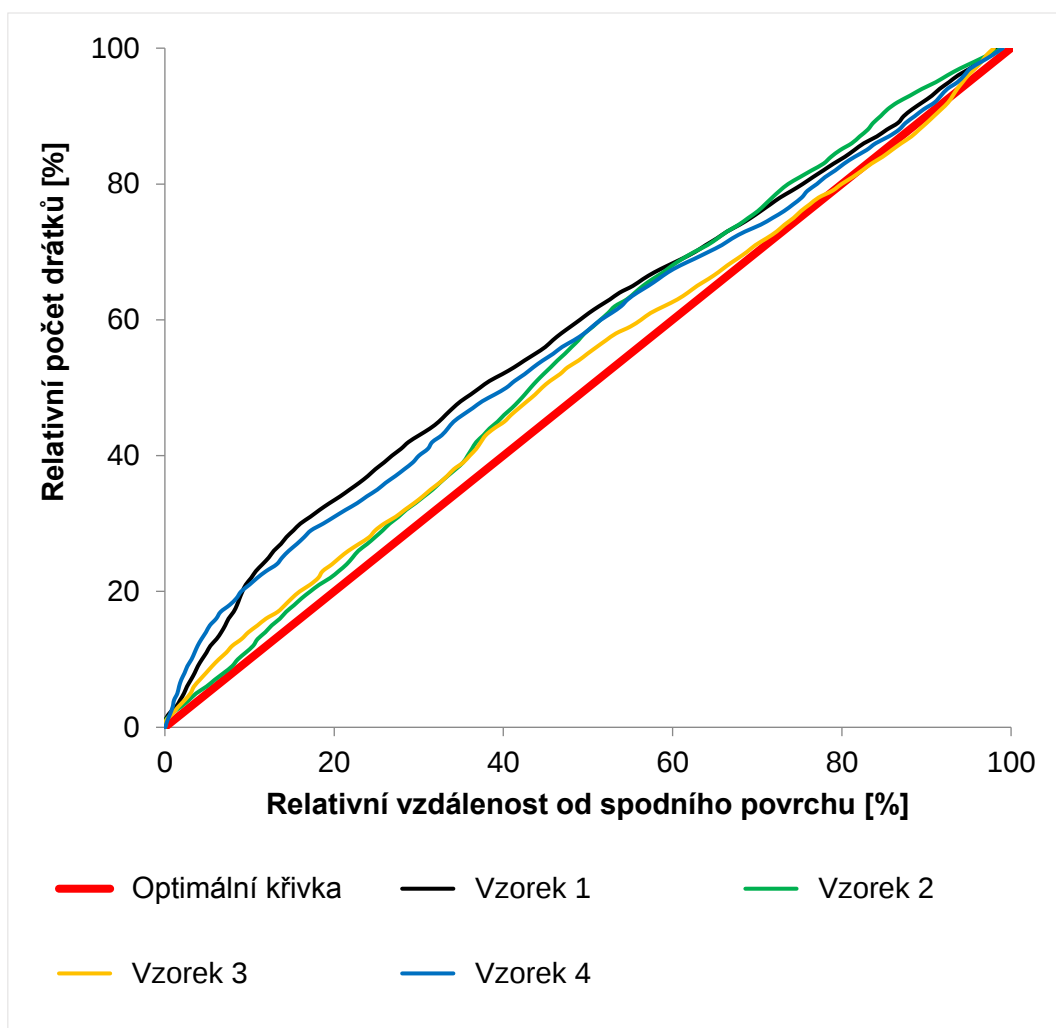
Ozn.	Cement CEM I 42,5 [kg]	Voda [kg]	Kamenivo 0/4 čedič [kg]	Kamenivo 8/4 čedič [kg]	Kamenivo 8/16 čedič [kg]	Plast. [kg]	Drátky Dramix RC 60/30 BP [kg]
D1	800	240	700	320	700	8	40
D2	800	240	700	320	700	8	80
D3	800	240	700	320	700	8	120
D4	800	240	700	320	700	8	160
D5	800	240	700	320	700	8	200
D6	800	240	700	320	700	8	240



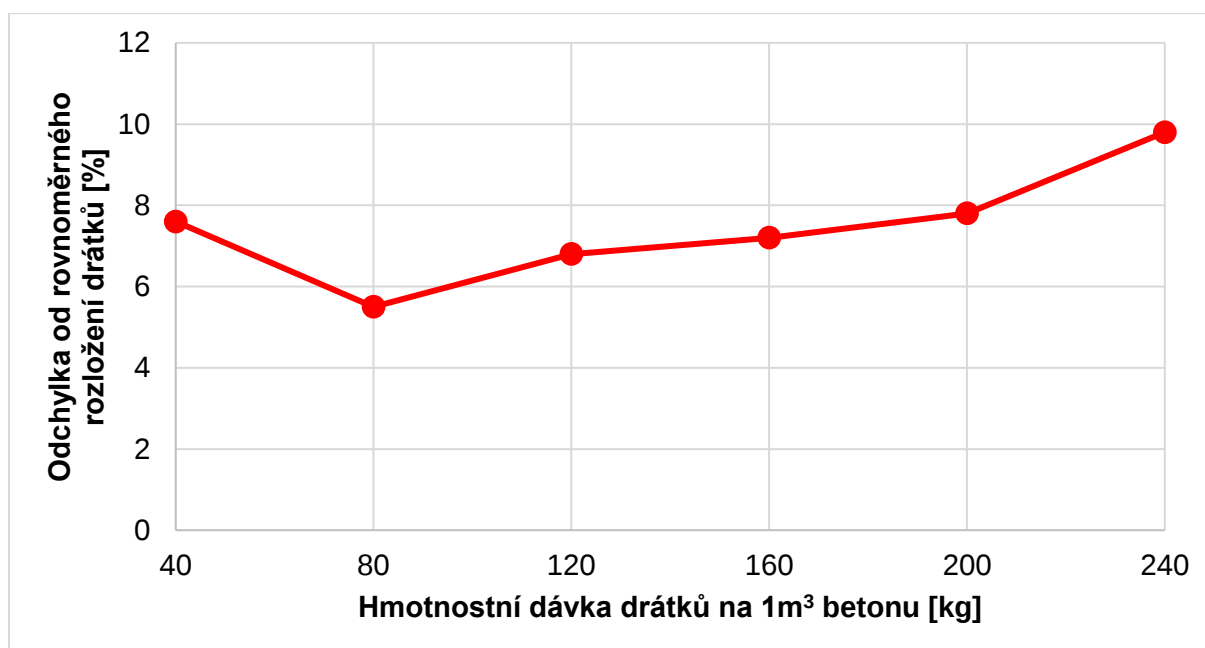
Obr. 60 Rozřezané vzorky pro měření rovnoměrnosti rozložení drátků.



Obr. 61 Ukázka četnosti drátků detekované programem ASEF při dávce 240kg/m³.



Obr. 62 Příklad porovnání vzorků s dávkou drátků 160 kg/m³ betonu.



Obr. 63 Vývoj rovnoměrnosti rozdělení drátků při zvyšování dávky drátků.

5.2.2. Rozbor výsledků stanovení maximální dávky drátků

Získání nejlepších parametrů vysokohodnotného betonu vyžaduje doplnit recepturu o značnou dávku drátků. Extrémní dávky drátků již však mechanické vlastnosti nezlepšují, ale naopak zhoršují. Navíc zvýší cenu vysokohodnotného betonu nad únosnou mez. Je tedy nutné stanovit maximální dávku drátků, kdy jsou drátky nejvíce přínosné, ale jejich negativní dopady jsou relativně malé. Pro stanovení maximální dávky byly realizovány dva experimenty. První z nich bylo měření nakypření vlivem drátků, ze kterého vyplynulo, že zvyšování množství drátků nad 180 kg/m^3 betonu již výrazně zvyšuje mezerovitost, a bylo by tedy nutné upravit poměr jednotlivých frakcí kameniva ve prospěch frakce 0/4. Poměrová úprava zastoupení frakcí kameniva by změnila celkovou křivku zrnitosti stanovenou v kapitole 2.3.

Druhý realizovaný experiment se věnoval rovnoměrnosti rozložení drátků a jeho výsledky byly obdobné, protože z Obr. 63 je patrné, že při zvětšení dávky drátků přes 200 kg/m^3 již nerovnoměrnost rozložení drátků roste rychleji. Takové množství drátků již není možné rovnoměrně rozložit ve struktuře betonu. To je způsobeno tím, že ideální mezery mezi drátky jsou menší, než je největší zrno kameniva. Řešením tohoto problému by bylo zvětšení délky drátku nebo zmenšení D_{max} kameniva.

Všechny naměřené výsledky uvedené v této kapitole platí jen a pouze pro použitý typ drátků a použitou křivku zrnitosti kameniva. Převod výsledků na jiný typ drátků není možný.

6. Vlastní receptura vysokohodnotného betonu

Z realizovaných zkoušek, které jsou prezentovány v předchozích kapitolách, vyplývají jasná doporučení, podle kterých byla sestavena receptura vysokohodnotného betonu:

- Byl vybrán cement CEM I 42,5 R – Mokrý s ohledem na nízký vývoj hydratačního tepla a chemickou odolnost.
- Nejvhodnější kamenivo je z lomu Bílčice z frakcí 0/4 : 4/8 : 8/16 míchaných v poměru 2,2 : 1,0 : 1,05.
- Jako nejvhodnější latentně hydraulická příměs byla vybrána mikrosilika z důvodu stálých vlastností. Ideální velikost náhrady byla stanovena na 10 až 20 % z dávky cementu.
- Superplastifikátor byl vybrán s ohledem na kompatibilitu se zvoleným cementem a příměsí. Dávka plastifikátoru byla stanovena podle požadované konzistence.
- Drátky byly použity ve dvou různých délkách – přesně ve shodě s výzkumem Orgasse a Kluga [73]. Délka dlouhých drátků byla stanovena podle výsledků prezentovaných Vodičkou [72] na $L_{min} > 2 \cdot D_{max}$, což pro zvolené kamenivo odpovídá $L_{min} > 2 \cdot 16 = 32 \text{ mm}$.
- Maximální dávka drátků byla stanovena na 200 kg/m³.

Tab. 22 První návrh receptury vysokohodnotného betonu.

Složka	Specifikace	Hmotnost [kg/m ³]
Cement	CEM I 42,5 R – Mokrý	640
Voda		150
v/c		0,19
Kamenivo drobné 0 / 4	Čedič – Bílčice	700
Kamenivo hrubé 4 / 8	Čedič – Bílčice	320
Kamenivo hrubé 8 / 16	Čedič – Bílčice	350
Superplastifikátor	Stachement 951	30
Mikrosilika	Stachesil S	120
Drátky	Dramix OL13/.20	100
Drátky	Dramix RC 80/40 BP	100

Při návrhu libovolné receptury betonu je nutné kontrolovat objem navržené receptury, čímž se ověří její správnost. Do výpočtu objemu je nutné zahrnout i množství vzduchu, které se do betonu dostane během míchání. Z předchozích zkušeností autora vyplývá, že se tato hodnota vzduchu pohybuje kolem 5 %. Rovnice objemu má podobu:

$$V = \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_{HK}}{\rho_{HK}} + \frac{m_{DK}}{\rho_{DK}} + \frac{m_{sp}}{\rho_{sp}} + \frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_d}{\rho_d} + V_{vz} \quad (15)$$

kde:,	V	je objem betonu 1 m ³ ,
	m_c a ρ_c	je hmotnostní dávka cementu a jeho objemová hmotnost,
	m_v a ρ_v	je hmotnostní dávka vody a hustota vody,
	m_{HK} a ρ_{HK}	je hmotnostní dávka hrubého kameniva a jeho objemová hmotnost,
	m_{DK} a ρ_{DK}	je hmotnostní dávka drobného kameniva a jeho objemová hmotnost,
	m_{sp} a ρ_{sp}	je hmotnostní dávka superplastifikátoru a jeho objemová hmotnost,
	m_p a ρ_p	je hmotnostní dávka příměsi a jeho objemová hmotnost,
	m_d a ρ_d	je hmotnostní dávka drátků a jejich objemová hmotnost,
	V_{vz}	je objem vzduchu v betonové směsi.

Po dosazení hodnot z Tab. 22 do rovnice (15) dostaneme:

$$V = \frac{640}{3100} + \frac{150}{1000} + \frac{670}{2950} + \frac{700}{2800} + \frac{30}{1065} + \frac{120}{2070} + \frac{200}{7850} + 0,05$$

$$V = 0,95 + 0,05 = 1,0.$$

Dosazením do rovnice objemu se potvrdilo, že navržená receptura je sestavena správně.

Výpočet vodního součinitele byl proveden podle následujícího vzorce:

$$\frac{v}{c} = \frac{m_v + i \cdot m_{sp}}{m_c + k \cdot m_p} \quad (16)$$

kde,

m_v	je hmotnostní dávka vody,
i	je zastoupení vody v superplastifikátoru,
m_{sp}	je hmotnostní dávka superplastifikátoru,
m_c	je hmotnostní dávka cementu,
k	je hodnota uvedená v ČSN EN 206+A1 [17],
m_p	je hmotnostní dávka příměsi.

Po dosazení hodnot z Tab. 22 do rovnice (16) dostaneme:

$$\frac{v}{c} = \frac{150 + 0,7 \cdot 30}{640 + 2 \cdot 120} = 0,19.$$

Navržená receptura byla velmi špatně zpracovatelná a drátky měly tendenci vytvářet shluky, proto byla receptura upravena. Výsledek je patrný v Tab. 23. Zpracovatelnost byla již výrazně lepší, což bylo způsobeno snížením dávky cementu a mikrosiliky. Vznik shluků drátků již také nebyl zaznamenán, což bylo způsobeno snížením dávky dlouhých drátků. Z navrženého betonu byly vyrobeny krychle o hraně 100 mm, které byly po 28 dnech testovány na tlakovou pevnost podle ČSN EN 12390-3 [28], výsledek je uveden v Tab. 24.

Tab. 23 Upravená receptura vysokohodnotného betonu [89].

Složka	Specifikace	Hmotnost [kg/m ³]
Cement	CEM I 42,5 R – Mokrý	600
Voda		150
v/c		0,225
Kamenivo 0 / 4	Čedič – Bílčice	750
Kamenivo 4 / 8	Čedič – Bílčice	340
Kamenivo 8 / 16	Čedič – Bílčice	400
Superplastifikátor	Stachement 951	30
Mikrosilika	Stachesil S	80
Drátky	Dramix OL13/.20	120
Drátky	Dramix RC 80/40 BP	80

Tab. 24 Výsledky z tlakové zkoušky [89].

Vzorek	Rozměr [mm]	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m³]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
P1.1	99,57	2 774	2 799	1 780	177,8
	98,98				
	100,56				
P1.2	99,46	2 787	2 772	1 730	171,8
	99,87				
	101,23				
P1.3	99,76	2 836	2 864	1 815	182,0
	99,27				
	99,98				
Průměr			2 810		177,2

- Směrodatná odchylka: $s_{fc} = 5,126 \text{ MPa}$
- Variační koeficient: $v_{fc} = \frac{s_{fc}}{m_{fc}} = \frac{5,126}{177,2} = 0,03$
- Součinitel: $k_n = 3,372$ – hodnota převzata z normy ČSN EN 1990, příloha D [90]
- Charakteristická hodnota tlakové pevnosti $f_{ck} = \eta_d \cdot m_{fc} \cdot (1 - k_n \cdot v_{fc})$

$$f_{ck} = 1,0 \cdot 177,2 \cdot (1 - 3,372 \cdot 0,03) = 160,6 \text{ MPa}$$

Navržená receptura byla podrobena dalšímu zkoušení, po kterém byla patentována v České republice jako patent číslo 304478 s názvem „Drátkobeton ultravysokých pevností“. Přihláška patentu byla dále rozšířena na mezinárodní pod číslem PCT/CZ2013/000161 a posléze validována ve Slovenské republice jako místní patent číslo 288 599. Upravená receptura v Tab. 23 se stala základem pro další výzkum a aplikace vysokohodnotného betonu.

7. Vývoj postupu míchání vysokohodnotného betonu

Ze zkušeností autora vyplývá, že postup výroby vysokohodnotného betonu je stejně významný jako samotná receptura. Špatným postupem míchání se dá i kvalitní receptura výrazně znehodnotit a obráceně. Univerzální postup míchání vysokohodnotného betonu nemůže existovat, protože jednotlivé receptury jsou velmi odlišné a mohou obsahovat i jednotlivé složky v různých formách. Typickým příkladem je mikrosilika, která může být dodávána ve formě prášku nebo suspenze. Právě prášková forma mikrosiliky podle Terzijského [50] vyžaduje významné prodloužení doby míchání o 3 až 5 minut.

7.1. Úprava dávkování vody a vliv na mechanické vlastnosti

Mnohačetnými pokusy autor objevil postup míchání, který dokáže zlepšit zpracovatelnost čerstvého betonu při zachování vodního součinitele nebo obráceně při zachování zpracovatelnosti zlepšit tlakovou pevnost pomocí snížení vodního součinitele. Inovativní postup míchání je dokázán testem, který je představen na následujících stránkách. Pro zvýšení přehlednosti jsou tentokrát publikovány všechny naměřené výsledky. Test probíhal na 4 recepturách (viz Tab. 25), kde receptura A byla stanovena v kapitole 6 a jako postup míchání byl použit postup běžně používaný pro vysokohodnotné betony. Tato receptura a postup sloužily jako referenční hodnoty. Všechny receptury série B byly míchány podle inovativního postupu. Série B1 měla stejnou recepturu jako A, ale odlišným postupem míchání došlo k zlepšení zpracovatelnosti při zachování tlakové pevnosti. Receptura série B2 měla snížený vodní součinitel, což podle předpokladů zvýšilo tlakovou pevnost betonu, ale zachovala si podobnou zpracovatelnost. Série B3 měla zvýšenou dávku cementu při zachování dávky vody a cílem bylo ověření míchacího postupu na širším spektru parametrů.

Odlišnost míchacího postupu je patrná z

Tab. 26. Základní změna nastává po homogenizaci suchých složek, kdy je v běžném postupu přidána záměsová voda a teprve se zpožděním superplastifikátor. V inovativním postupu (série B) je celý míchací postup zastaven a v jednom okamžiku je přidána záměsová voda spolu se superplastifikátorem. Nejvhodnější je, aby toto přidání bylo realizováno na jedno místo v suché směsi. Správným výsledkem by mělo být vytvoření „jezera“ uprostřed suchých složek betonu. Toto „jezero“ by v ideálním případě mělo být v místě míchacích lopatek, ale není to podmínkou. Následuje opětovná aktivace míchacího stroje. Následující míchací krok by měl být zhruba o 50 % své délky prodloužen proti běžnému postupu. Konec míchacího procesu je již opět stejný.

Inovativní míchací postup je více náchylný k nehomogenitě než běžný postup míchání. Pokud je však aplikován na vysokohodnotný beton s velkým objemovým stupněm ztužení drátky, je riziko nehomogenity minimální, protože ocelové drátky velmi efektivně přispějí k procesu homogenizace. Zvýšení efektivity homogenizačního procesu ocelovými drátky funguje pouze do určitého množství, v extrémních dávkách drátků se proces homogenizace samozřejmě výrazně zhoršuje.

Tab. 25 Receptury pro ověření vlivu míchání betonu [91].

Složka	Další specifikace	Série A	Série B1	Série B2	Série B3
		Množství [kg/m ³]	Množství [kg/m ³]	Množství [kg/m ³]	Množství [kg/m ³]
Cement	CEM I 42,5 R - Mokrý	600	600	600	700
Voda		150	150	140	150
Vodní součinitel		0,23	0,23	0,21	0,20
Kamenivo - Čedič	Frakce 0/4 mm	400	400	400	960
	Frakce 4/8 mm	400	400	400	640
	Frakce 8/16 mm	800	800	800	0
Drátky	Délky 13 mm	70	70	70	100
	Délky 40 mm	70	70	70	0
Mikrosilika	Stachesil S	80	80	80	80
Superplastifikátor	Stachement 951	30	30	30	35

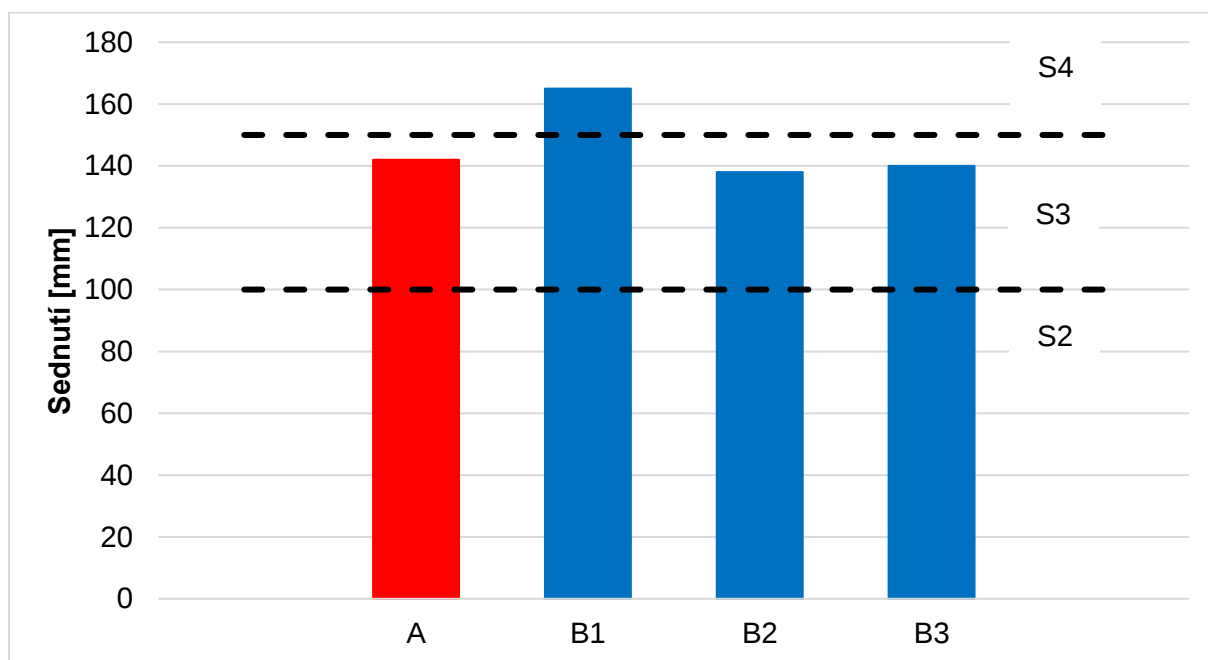
Tab. 26 Detailní postup míchání pro obě skupiny [91].

Série A		Série B	
Krok	Délka kroku [s]	Krok	Délka kroku [s]
Aktivováno míchací zařízení	-	Aktivováno míchací zařízení	-
Vložení kameniva a cementu do míchacího prostoru	-	Vložení kameniva a cementu do míchacího prostoru	-
Míchání směsi	30	Míchání směsi	30
Přidání mikrosiliky	-	Přidání mikrosiliky	-
Míchání směsi	300	Míchání směsi	300
		Zastaveno míchací zařízení	-
Přidání vody	-	Přidání vody spolu s superplastifikátorem	-
		Aktivováno míchací zařízení	-
Míchání směsi	5		
Přidání superplastifikátoru	-		
Míchání směsi	60	Míchání směsi	90
Přidání vláken	-	Přidání vláken	-
Míchání směsi	90	Míchání směsi	90
Zastaveno míchací zařízení	-	Zastaveno míchací zařízení	-

Zpracovatelnost byla měřena pomocí klasické zkoušky sednutí kužele podle ČSN EN 12350-2 [92]. Tato metoda byla vybrána pro svoji rozšířenost v praxi, a tedy i pro jednoduché porovnání. Zkouška sednutí kužele však není naprosto vhodná pro drátkobetony, protože významně zkresluje výsledky. Zkreslení je způsobeno usměrněním drátků během hutnění propichovací tyčí. Z tohoto důvodu byly pouze pro zkoušku konzistence vyrobeny všechny série (A až B3) bez drátků. Pokles konzistence způsobený drátkami by byl u všech sérií stejný, protože množství drátků bylo také ve všech sériích stejné. Pro měření tlakových pevností a objemové hmotnosti byl použit beton s drátkami, přesně podle Tab. 25.



Obr. 64 Ukázka z měření konzistence metodou sednutí kužele u série A.



Obr. 65 Naměření hodnoty sednutí.

Naměřené výsledky potvrdily předpoklad experimentu, tedy že inovativní způsob míchání zlepšil zpracovatelnost série *B1* proti referenční sérii *A* při stejné receptuře. Výsledky série *B3* dosáhly podobných hodnot jako ostatní série, což nebylo záměrem experimentu. Konzistence série *B2* vyšla velmi podobně jako konzistence referenční série *A*. Při výrobě betonu s drátky by došlo k identickému zhoršení všech konzistencí.

Tlakové pevnosti byly měřeny standardně podle ČSN EN 12390-2 [28] na krychlích o hraně 150 mm po 28 dnech. Ošetřování zkušebních těles probíhalo ve vodním prostředí s teplotou 20 ± 2 °C.

Stanovení charakteristické hodnoty pevnosti v tlaku probíhalo podle stejné metodiky, jako je uvedeno v kapitole 6.

Tab. 27 Výsledky z měření tlakové pevnosti vzorků A1 [91].

Vzorek	Rozměry [mm]	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m³]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
A1	150,1	9 401,1	2 794,8	3 036,4	134,97
	149,9				
	149,5				
A2	150,1	9 531,6	2 856,6	2 941,7	132,24
	148,2				
	150,0				
A3	150,1	9 557,6	2 803,9	3 586,0	157,41
	151,7				
	149,7				
A4	149,6	9 419,6	2 807,8	3 423,5	153,12
	149,5				
	150,0				
A5	149,7	9 416,4	2 850,0	3 214,4	143,8
	149,4				
	150,1				
A6	149,9	9 403,6	2 812,4	3 077,4	137,53
	149,2				
	149,5				
průměr			2 855		143,18
			Směrodatná odchylka		10,20
			Variační koeficient		0,07
			Charakteristická pevnost		120,96

Tab. 28 Výsledky z měření tlakové pevnosti vzorků B1 [91].

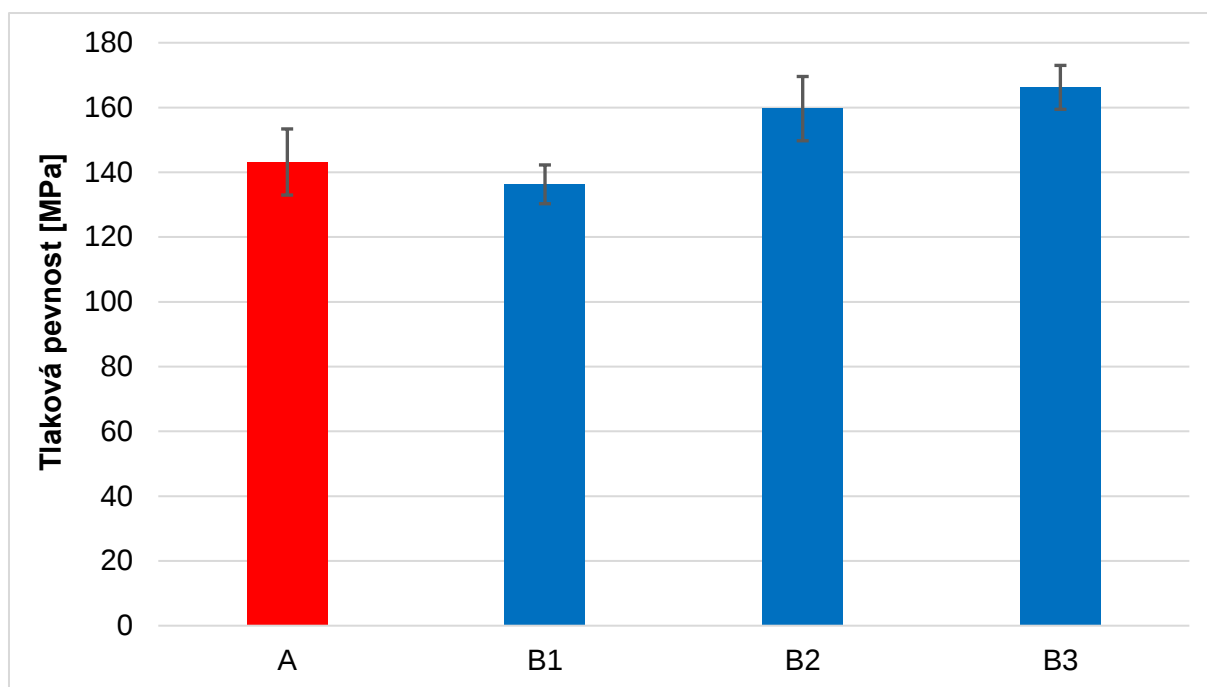
Vzorek	Rozměry [mm]	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m³]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
B1.1	150,0	9 594,4	2 847	3 105,7	137,78
	150,3				
	149,5				
B1.2	150,0	9 593,5	2 839	2 947,7	130,57
	150,5				
	149,7				
B1.3	149,8	9 565,1	2 842	3 302,6	147,25
	149,7				
	150,0				
B1.4	150,1	9 564,6	2 840	2 968,1	131,83
	150,0				
	149,6				
B1.5	149,9	9 570,5	2 855	3 005,9	134,20
	149,4				
	149,6				
B1.6	150,2	9 577,7	2 833	3 062,7	136,05
	149,9				
	150,2				
průměr			2 840		136,28
			Směrodatná odchylka		5,99
			Variační koeficient		0,04
			Charakteristická pevnost		123,24

Tab. 29 Výsledky z měření tlakové pevnosti vzorků B2 [91].

Vzorek	Rozměry [mm]	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m³]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
B2.1	150,0	9 615,6	2 858,6	3 650,0	162,79
	149,5				
	150,0				
B2.2	149,7	9 640,0	2 828,1	3 241,0	142,52
	151,9				
	149,9				
B2.3	149,6	9 651,5	2 906,0	3 696,4	166,68
	148,3				
	149,7				
B2.4	149,8	9 705,3	2 847,2	3 736,0	164,34
	151,8				
	149,9				
B2.5	149,9	9 602,7	2 847,1	3 793,4	168,37
	150,3				
	149,7				
B2.6	150,0	9 711,4	2 856,6	3 482,5	153,22
	151,5				
	149,6				
průměr			2 860		159,65
			Směrodatná odchylka		9,92
			Variační koeficient		0,06
			Charakteristická pevnost		138,06

Tab. 30 Výsledky z měření tlakové pevnosti vzorků B3 [32].

Vzorek	Rozměry [mm]	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m³]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
B3.1	149,7	9 564,1	2 840	3 530,8	157,17
	150,1				
	149,9				
B3.2	149,8	9 711,4	2 895	3 763,0	165,16
	149,3				
	150,0				
B3.3	149,8	9 733,1	2 897	3 911,0	174,19
	149,9				
	149,6				
B3.4	150,1	9 732,8	2 909	3 811,6	170,52
	149,0				
	149,7				
B3.5	149,5	9 595,1	2 835	3 599,2	159,54
	150,9				
	150,0				
B3.6	149,7	9 672,9	2 917	3 785,1	170,74
	148,1				
	149,6				
průměr			2880		166,73
				Směrodatná odchylka	6,80
				Variační koeficient	0,04
				Charakteristická pevnost	151,91



Obr. 66 Porovnání tlakových pevností.

Měření tlakových pevností také potvrdilo předpoklad, že beton ze série *B2* bude mít vyšší tlakovou pevnost než referenční série *A* z důvodu nižšího vodního součinitele. Série *B1* měla mít tlakovou pevnost velmi podobnou jako referenční série *A*, protože byly namíchány podle stejné receptury.

Inovativní postup míchání byl ověřen i v průmyslové výrobě, kde se nejčastěji objevují tři typy míchacích zařízení: oběhové, planetární a hřídelové. Inovativní postup byl odzkoušen na všech třech. Při využití inovativního postupu míchání v průmyslové praxi nastal problém ve chvíli opětovného zapnutí míchání, protože v tento moment musel stroj překonávat velký odpor prakticky suché směsi. Rozpohybování směsi výrazně namáhalo motor a převodovku míchacího zařízení po dobu zhruba 10 s, což bylo signalizováno vysokými odebíranými proudy, zaznamenávanými ve velině. Po rozpohybování směsi a částečném rozmíchání záměsové vody hodnoty proudu opět klesly na běžnou hodnotu. Tento problém se nejvíce projevoval u oběhového míchacího zařízení. Jediné řešení u tohoto typu míchacího zařízení bylo snížení objemu míchaného betonu zhruba na 50 % běžné hodnoty.

U planetárního typu míchacího zařízení bylo zjištěno, že pracuje efektivněji než oběhové zařízení a míchací objem stačí redukovat na 75 % běžného objemu. Ideálním řešením by bylo, kdyby rotace jednotlivých lopatek mohla být aktivována dříve než rotace celého systému. V tomto případě by bylo pravděpodobně možné zachovat celý míchací objem.

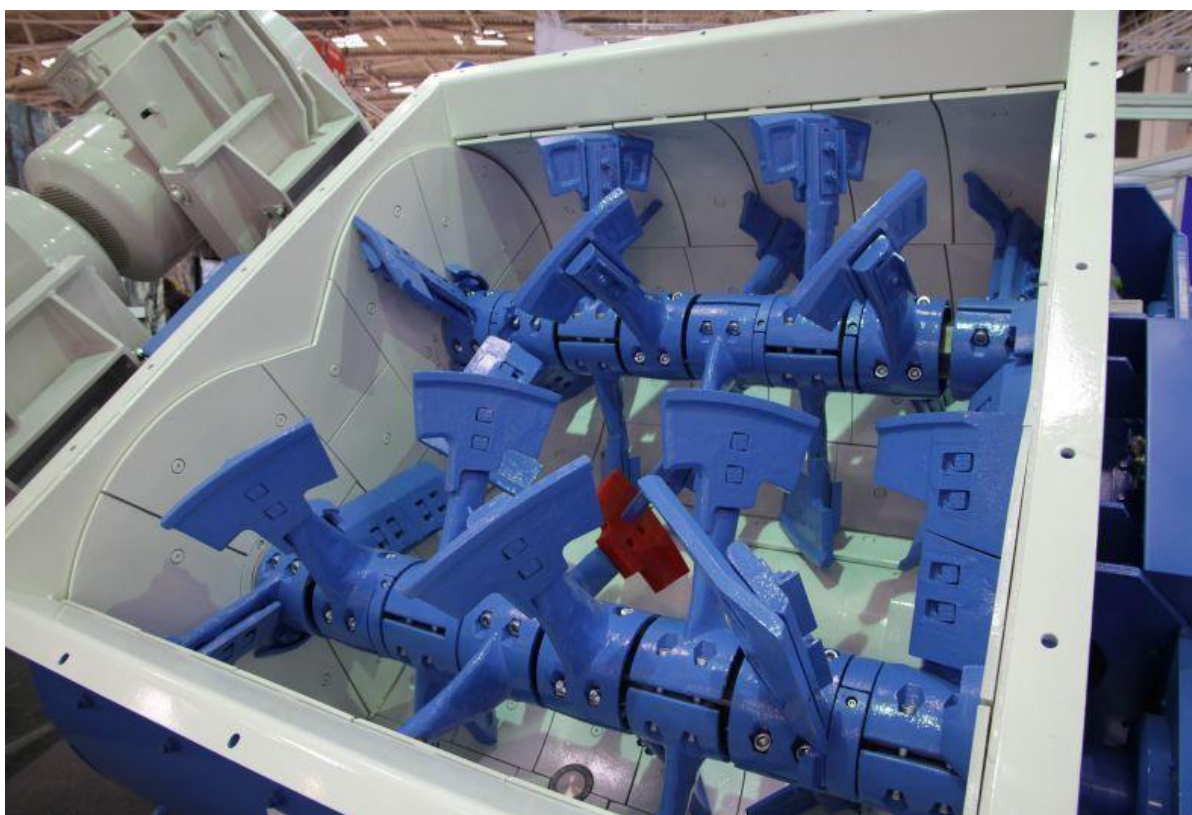
Nejlépších výsledků bylo dosaženo u hřídelových zařízení s dvojicí hřídelů. U tohoto typu byl nárůst proudu při opětovné aktivaci stroje tak malý, že nebylo nutné redukovat míchací objem vůbec. To je pravděpodobně způsobeno tím, že při opětovné aktivaci stroje je stále 50 % míchacích lopatek ve volném prostoru na rozdíl od předchozích typů, kde jsou všechny míchací lopatky již zanořeny v betonové směsi.



Obr. 67 Oběhové míchací zařízení [93].



Obr. 68 Planetární míchací zařízení [94].



Obr. 69 Dvouhřídelové míchací zařízení [95].

Změnou běžného míchacího postupu na inovativní postup míchání se zastavením míchacího zařízení lze dosáhnout o 10 % vyšší tlakové pevnosti při zachování stejné konzistence. Efektivnost inovativního postupu míchání byla ověřena i v průmyslových podmínkách. Inovativní postup míchání se proto stal v České republice předmětem patentu číslo 307462 [91] a evropského patentu číslo 3351518 [96], který je validován v Německu, Francii, Velké Británii a Irsku. U obou patentů probíhá v současné době jednání s průmyslovým partnerem o zakoupení patentové licence.

7.2. Úprava dávkování příměsi a vliv na mechanické vlastnosti

Změna míchacího postupu by mohla pozitivně ovlivnit i vlastnosti ITZ. Předpoklad byl takový, že latentně hydraulická příměs přidaná před cementem by obalila povrch hrubých zrn kameniva, což by mělo snížit pórovitost ITZ za předpokladu, že je příměs jemnější než cement. Kromě fyzického zaplnění pórů v ITZ by příměs běžně chemicky reagovala s produkty hydratace cementu a došlo by k lepšímu chemickému provázání. Vyšší hustota ITZ by zlepšila nejslabší článek vysokohodnotného betonu, což by se projevilo nárůstem tlakové pevnosti.

Pro ověření této myšlenky byl připraven experimentální program, kde byly použity stejné latentně hydraulické příměsi jako v kapitole 4.1, tedy metakaolin, mikrosilika a popílek. Z publikovaných výsledků v kapitole 4.1 vyplynulo, že nejvhodnější velikost náhrady cementu je pro metakaolin 20 %, pro mikrosiliku také 20 % a pro popílek 30 %. Detailní receptury jsou uvedeny v Tab. 16.

Postup míchání 1 byl referenční, který byl používán už během celého výzkumu vlivů příměsí na vlastnosti betonu v kapitole 4.1.

Postup míchání 2 byl upraven tak, že příměs byla do míchacího zařízení přidána hned po kamenivu a následovalo míchání v délce 180 s. Během této doby se měla zrna kameniva obalit v jemné příměsi. Cement byl přidán až v dalším kroku. Smyslem tohoto postupu bylo potvrdit hypotézu definovanou v předchozích odstavcích.

Postup míchání 3 měl ověřit, zda nedojde k lepšímu rozmíchání příměsí v případě, že bude dávkována do mokré směsi. Během tohoto postupu byla příměs dávkována velmi pomalu.

Postup míchání 4 měl zhodnotit vliv dlouhé doby míchání příměsí, ke kterému docházelo u postupu číslo 3. V postupu 4 byl tedy stejný jako postup 1, ale s prodlouženou dobou míchání.

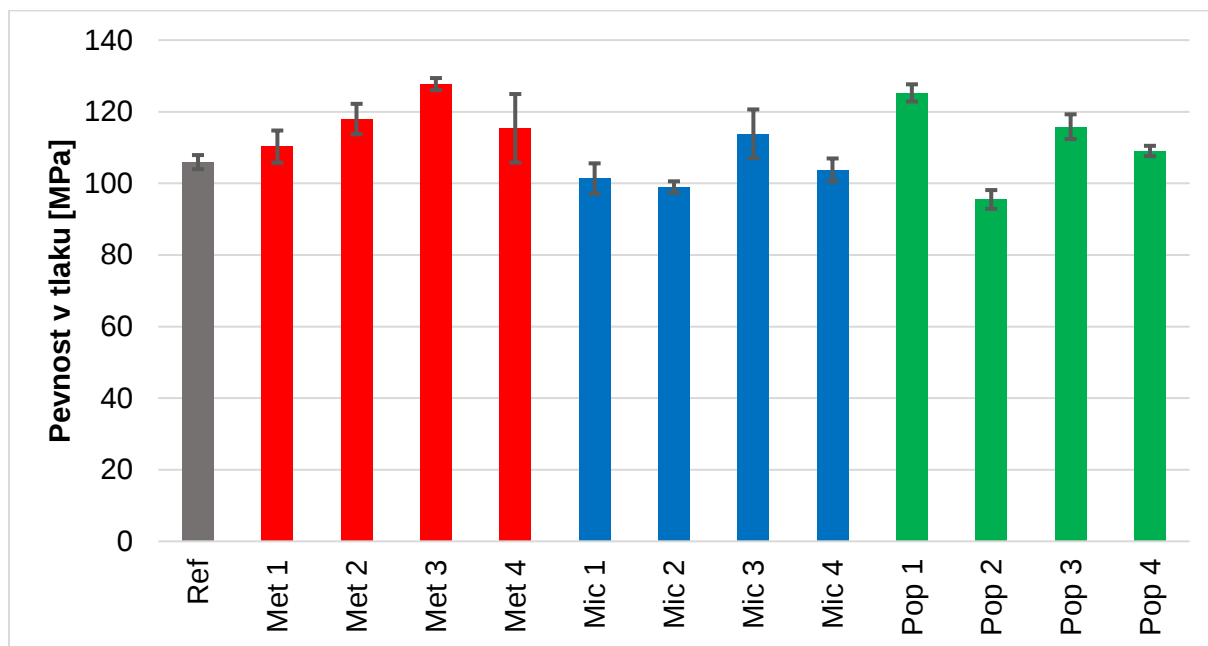
Přehled jednotlivých postupů míchání je uveden v následující tabulce.

Tab. 31 Míchací postupy s úpravou pro příměs.

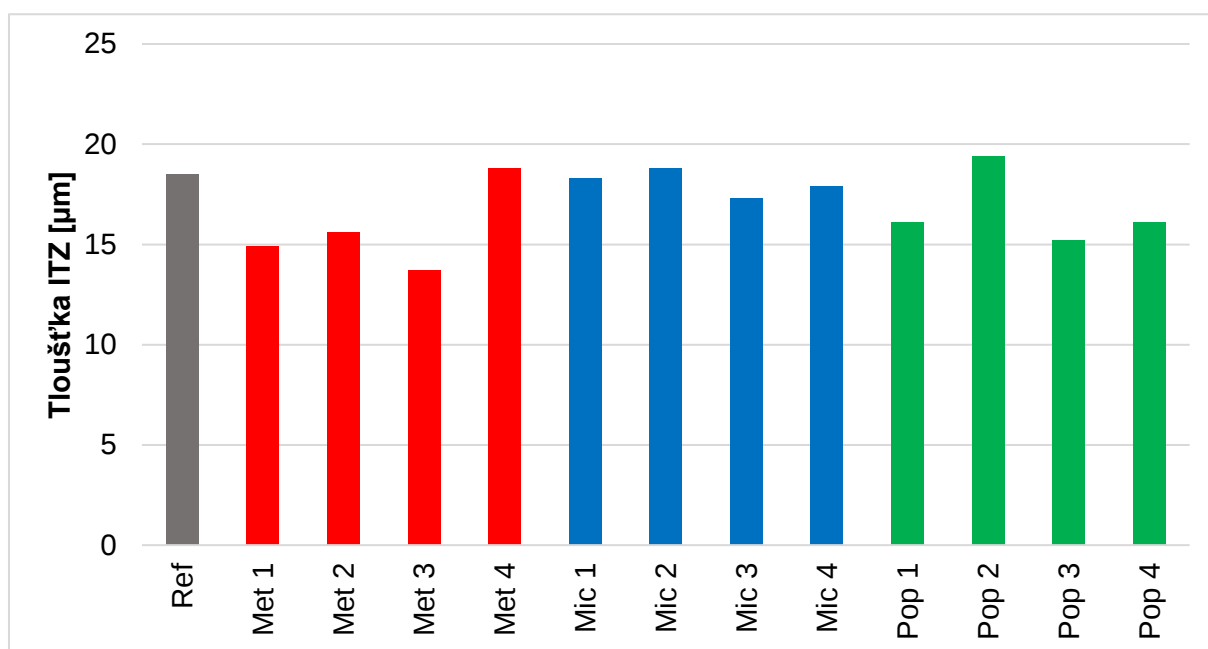
Postup 1	Postup 2	Postup 3	Postup 4
kamenivo 8/16 + 4/8 – 20 s	kamenivo 8/16 + 4/8 – 20 s	kamenivo 8/16 + 4/8 – 20 s	kamenivo 8/16 + 4/8 – 20 s
písek 0/4 – 20 s	písek 0/4 – 20 s	písek 0/4 – 20 s	písek 0/4 – 20 s
cement – 20 s	příměs – 180 s	cement – 20 s	cement – 20 s
příměs – 180 s	cement – 20 s	voda + plastifikátor – 60 s	příměs – 300 s
voda + plastifikátor – 60 s	voda + plastifikátor – 60 s	příměs – 180 s	voda + plastifikátor – 60 s

Pro každý způsob míchání byla vyrobena série krychlí o hraně 100 mm, válce o průměru 100 mm a výšce 200 mm a vzorky pro mikromechanické testy. Z makromechanických testů byly provedeny zkoušky tlakové pevnosti, zkoušky pevnosti v tahu za ohybu, zkoušky modulu pružnosti a zkoušky hloubky průsaku tlakové vody. Výsledky ze všech realizovaných zkoušek jsou pro jednotlivé postupy míchání velmi podobné a pro názornost jsou zde uvedeny pouze výsledky tlakové pevnosti (viz Obr. 70) a výsledky měření tloušťky ITZ (viz Obr. 71). Ostatní

výsledky je možné najít v článku autora „The effect of homogenization procedure on mechanical properties of high-performance concrete with partial replacement of cement by supplementary cementitious materials“ [97].



Obr. 70 Výsledky tlakových pevností při různém postupu míchání.



Obr. 71 Výsledky tloušťky ITZ při různém postupu míchání.

Z obou grafů je patrné, že změna postupu míchání neměla významný vliv na makromechanické a mikromechanické vlastnosti. Rozptyl měřených hodnot z velké části odpovídá směrodatné odchylce výsledků a chybě měření. Změna okamžiku přidání příměsi nepřináší žádný jednoznačný vliv na tloušťku ITZ, jak se předpokládalo.

8. Aplikace vysokohodnotného betonu

Kvalitu receptury nejlépe prokazuje četnost jejích aplikací. Proto bylo snahou realizovat i velmi rozličné druhy aplikací, aby se ukázaly přednosti receptury i kvality vysokohodnotného betonu. Řada realizovaných konstrukcí se stala reprezentativními prvky jednotlivých betonáren a sloužila pro zvýšení prestiže výrobní firmy i Fakulty stavební ČVUT v Praze jakožto autora receptury. Příkladem mohou být prvky pro cyklopoint, mostní zábradlí nebo obkladový prvek. Pro většinu betonáren byla výroba vysokohodnotného betonu prvním seznámením s tímto materiálem. Bylo tedy nutné kromě propagace vynaložit velké úsilí i v osvětě zaměstnanců, kteří s vysokohodnotným betonem pracovali, a zbořit řadu mýtů a předsudků. Po technologické stránce byl přechod z laboratorní do průmyslové výroby vždy úspěšný a nikdy nedošlo k poškození míchacího zařízení nebo znehodnocení vstupních surovin, jak se někteří pracovníci betonáren obávali. Hlavní příčinou tohoto úspěchu byla intenzivní předvýrobní příprava v laboratoři.

8.1. Prvky drobné architektury

Aplikace vysokohodnotného betonu pro prvky drobné architektury byla velmi přínosná pro získání prvních zkušeností s průmyslovou výrobou a s úskalími pramenícími z transferu technologie z laboratoře do průmyslu. Drobné architektonické prvky nekladou velké požadavky na pevnostní vlastnosti materiálu, ale spíše na kvalitu povrchu a trvanlivost materiálu. Druhá jejich velká výhoda je relativně malý objem materiálu, proto bylo vždy možné je realizovat z jedné namíchané dávky, což je vždy jednodušší než betonáž přerušovat a navazovat druhou dávkou.

8.1.1. Venkovní lavička ČVUT

Během uvažované modernizace vstupu do Fakulty stavební ČVUT v Praze Dejvicích bylo nutné rekonstruovat odpočinkové zóny pro studenty před vchodem do budovy „C“. Dosavadní lavičky v těchto zónách byly betonové s dřevěným sedákem a vlivem času byly již určeny k demolici spolu s přílehlou konstrukcí pro zeleň. Novou architektonickou studii provedl doc. Ing. arch. Petr Šíkola, Ph.D. Podle jeho návrhu měly nové lavičky tvarově připomínat původní dřevěnou konstrukci, avšak měly být zhotoveny z vysokohodnotného betonu. Tento materiál byl vybrán ze čtyř důvodů [98]:

Zprv je velmi dobře tvarovatelný a dají se z něj vyrábět i prostorové a různě zakřivené prvky, což umožňuje architektovi větší volnost.

Za druhé je vysokohodnotný beton ve venkovním prostředí alespoň 3x trvanlivější než běžný beton, takže zhotovená konstrukce má dlouhou životnost a nevyžaduje žádné další vícenáklady na údržbu.

Třetím důvodem byl vlastní návrh lavičky, která měla být velmi štíhlá, což neumožňovalo použití klasické betonářské výztuže, protože by nebylo možné splnit požadavky krytí. Bylo tedy rozhodnuto, že lavičky budou zhotoveny bez výztužných prutů a veškeré namáhání bude přenášet pouze beton, jehož struktura bude ztužena velkým množstvím drátků.

Posledním aspektem pro použití vysokohodnotného betonu je jeho vysoká objemová hmotnost, která zajišťuje i subtilním konstrukcím značnou hmotnost, což spolu s mechanickou odolností významně snižuje riziko poškození vandaly.



Obr. 72 Vizualizace návrhu laviček před Fakultou stavební ČVUT v Praze.

Požadavky na prvek lavičky si vyžádaly změnu receptury, protože prvek byl tak štíhlý, že nebylo možné použít kamenivo s $D_{max} = 16$ mm. Z tohoto důvodu bylo nutné úplně změnit optimalizovanou křivku zrnitosti kameniva tak, aby se skládala pouze z frakcí 0/4 a 4/8, ale aby kamenivo zajistilo dostatečné kotvení drátků, které přenášely tahová namáhání.

Tab. 32 Receptura betonu pro realizaci lavičky.

Složka	Původní receptura		Receptura pro lavičku	
	Specifikace	Dávka [kg/m ³]	Specifikace	Dávka [kg/m ³]
Cement	CEM I 42,5 R – Mokrý	600	CEM I 42,5 R – Mokrý	600
Voda		150		185
v/c		0,22		0,27
Kamenivo 0 / 4	Čedič – Bílčice	750	Čedič – Bílčice	1050
Kamenivo 4 / 8	Čedič – Bílčice	340	Čedič – Bílčice	600
Kamenivo 8 / 16	Čedič – Bílčice	400		
Superplastifikátor	Stachement 951	30	Berament HT5341	27
Mikrosilika	Stachesil S	80	Sioxid	78
Drátky	Dramix OL13/.20	120	Dramix OL13/.20	70
Drátky	Dramix RC 80/40 BP	80	Dramix RC 80/30 BP	70

Nejnáročnějším prvkem konstrukce byl sedák lavičky, a proto vývoj začal právě u tohoto prvku. Betonáž probíhala v laboratořích Katedry betonových a zděných konstrukcí. Pro rychlé a levné ověření receptury a statické funkce bylo použito jednoduché a levné dřevěné bednění, což se ukázalo jako velká chyba.



Obr. 73 Vlevo připravená forma, vpravo vybetonovaná deska.



Obr. 74 Vlevo betonáž, vpravo hotový prvek.



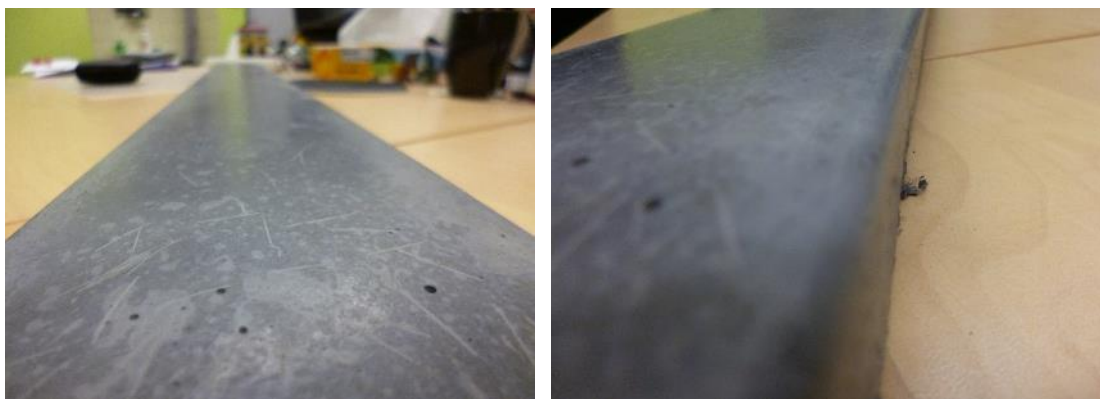
Obr. 75 Detaily hran s vystupujícími drátky.

Jak je patrné především na Obr. 75, povrch vyrobeného sedáku lavičky byl zcela nevhodný na sezení (kvůli vystupujícím drátkům a ostrým hranám), přestože čerstvý beton byl velice dobře zpracovatelný a povrch odpovídal pohledovému betonu. Bylo rozhodnuto celý experiment zopakovat, ale s bedněním, které mělo lepší povrch. Nové bednění nesmělo mít také žádný pravoúhlý spoj, ale pouze zaoblené hrany. Pro jednoduché obrábění byl jako materiál zvolen plast a pro vystýlku bednění byly použity plastové vzduchotechnické trubky. V první fázi bylo nutné teorii ověřit, a proto byly vyráběny pouze jednotlivé lamely. Navíc byla zhotovena i širší varianta lamely, která měla být pohodlnější na sezení než původní návrh. Nově vyráběné lamely měly tedy rozměry 25 x 55 x 1000 mm a 40 x 40 x 1000 mm.



Obr. 76 Ukázka nového bednění.

Použití jiného typu bednění podstatně zlepšilo povrch dosedací plochy, a bylo tedy možné přejít k výrobě celého prototypu. Detaily povrchu jsou viditelné na Obr. 77.

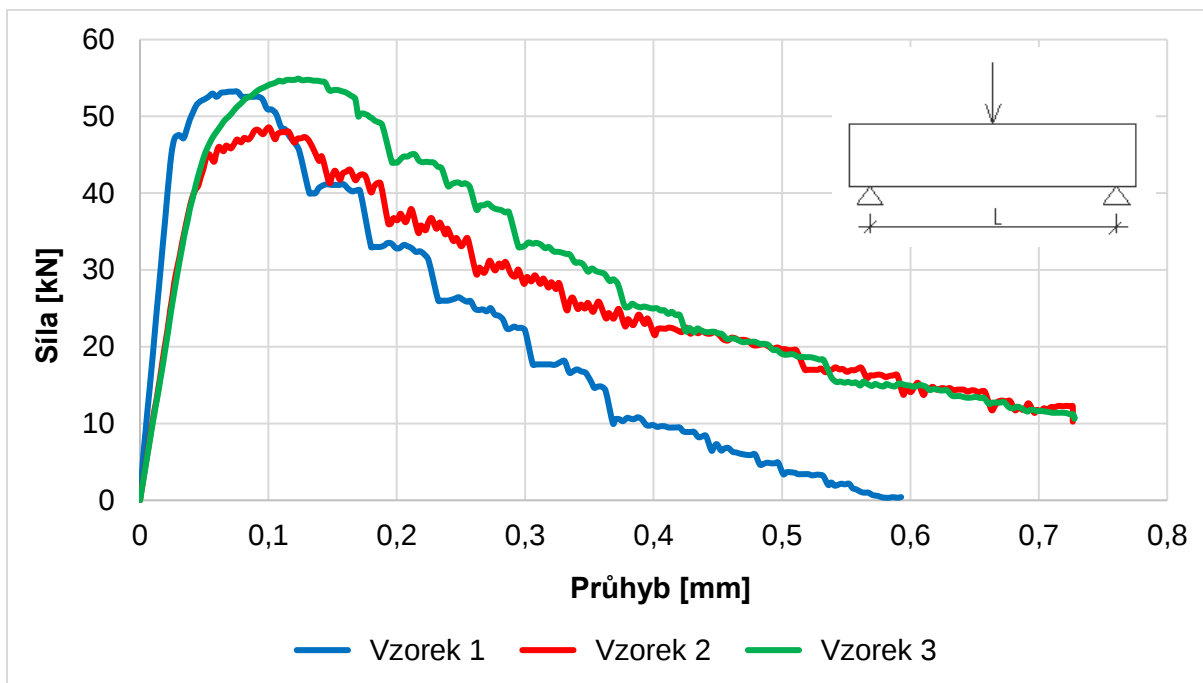


Obr. 77 Detaily hran lamely z „nového“ bednění.

K jednotlivým lamelám byla vždy vyráběna i doprovodná tělesa, aby mohl být charakterizován vyrobený materiál. Kromě normových zkušebních těles byly zkoušeny i jednotlivé lamely, aby bylo zjištěno skutečné chování lamel a skutečné hodnoty síly při porušení. Tím odpadla nutnost převodu napětí z normových těles na reálný prvek, protože při tloušťce lamely 25 mm by musel být zohledněn i vliv size effectu.

Tab. 33 Výsledky tlakových pevností na normových krychích po 28 dnech.

Vzorek	Rozměry [mm]	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m³]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]	
L 3. 1	149,9	8 720	2 587	3 280	146,1	
	149,8					
	150,1					
L 3.2	150,2	8 680	2 633	3 260	148,4	
	146,3					
	150,0					
L 3.3	149,9	8 880	2 613	3 340	147,4	
	151,2					
	149,9					
L 3.4	150,1	8 660	2 572	3 420	152,3	
	149,6					
	149,9					
průměr			2 600	Směrodatná odchylka Variační koeficient Charakteristická pevnost	148,5	
					2,67	
					0,02	
					141,4	



Obr. 78 Diagram síla / průhyb pro normové trámký 100 x 100 x 400 mm.

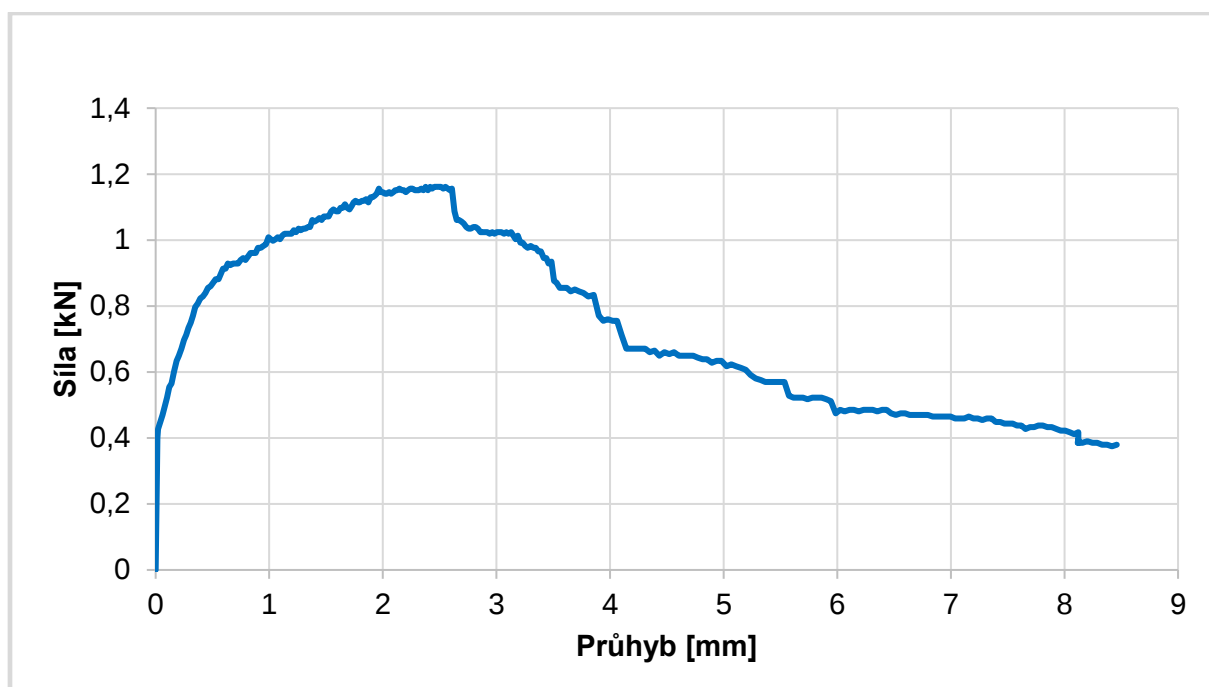
Tab. 34 Výsledky tahových pevností na normových trámčích po 28 dnech.

Vzorek	Rozměry [mm]	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m³]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
L 3. 1	100,16	10 500	2 647	19,21	11,71
	99,09				
	400				
L 3.2	100,61	10 480	2 602	18,57	11,05
	100,09				
	400				
L 3.3	100,13	10 480	2 642	16,91	10,32
	99,05				
	400				
průměr			2 630		11,02
				Směrodatná odchylka	0,69
				Variační koeficient	0,06
				Charakteristická pevnost	8,9



Obr. 79 Zkouška jednotlivé lamely z lavičky.

Jednotlivé lamely byly zkoušeny při rozpětí 600 mm, protože větší rozpětí neumožňoval zkušební stroj. Zatěžování probíhalo tříbodově, protože cílem bylo zjištění maximálního zatížení jednou osobou sedící uprostřed rozpětí. Pro tyto zkoušky byly použity lamely o rozměrech 40 x 40 x 1000 mm.



Obr. 80 Diagram síla / průhyb pro lamelu 40 x 40 x 1000 mm.

Jak je patrné z předcházejícího obrázku, zatížení pro zlomení lamely představovalo hodnotu 115 kg, což je dostatečná hodnota, aby i jedna lamela unesla dospělého člověka. Vzhledem k mezerám mezi lamelami, které byly navrženy na 40 mm, je velmi nepravděpodobné, že by člověk mohl sedět pouze na jediné lamelě, a lamel tedy bude zatíženo vždy několik najednou. Navíc tíha osoby bude rozložena na výrazně větší ploše, než odpovídá jedné bodové síle uprostřed rozpětí, a namáhání tedy bude výrazně příznivější.

Zhotovený prototyp splnil požadavky jak na pohledový beton, tak na únosnost. Zároveň se ukázalo, že při použití vhodného bednění lze dosáhnout i velmi kvalitního povrchu, ze kterého nevystupují žádné drátky, a nehrozí tedy žádné zranění. Je tedy velká škoda, že se projekt nerealizoval v celém svém zamýšleném rozsahu.

8.1.2. Konferenční stůlek

Návrh interiérového stolu probíhal ve spolupráci s Ing. arch. Štěpánem Lajdou. Vize konferenčního stolu byla taková, že desku bude tvořit co nejtenčí deska z HPC, která bude vyztužena pouze polypropylénovými vlákny délky 6 mm, a ta bude uložena na nerezových nohách. Toto zadání si vyžádalo změnu receptury, protože polypropylénová vlákna se v receptuře vysokohodnotného betonu chovala úplně jinak než ocelové drátky, které byly běžně používány [98].

Tab. 35 Receptura betonu pro realizaci stolku.

Složka	Původní receptura		Receptura pro stolek	
	Specifikace	Dávka [kg/m ³]	Specifikace	Dávka [kg/m ³]
Cement	CEM I 42,5 R – Mokrý	600	CEM I 42,5 R – Mokrý	650
Voda		150		195
v/c		0,22		0,27
Kamenivo 0 / 4	Čedič – Bílčice	750	Čedič – Bílčice	1566
Kamenivo 4 / 8	Čedič – Bílčice	340		
Kamenivo 8 / 16	Čedič – Bílčice	400		
Superplastifikátor	Stachement 951	30	Berament HT5341	27
Mikrosilika	Stachesil S	80	Sioxid	100
Drátky	Dramix OL13/.20	120	Krampe Harex PM 12/18	1,5
Drátky	Dramix RC 80/40 BP	80		

Z poznatků o výrobě lamely k lavičce z předchozí kapitoly bylo zřejmé, že hladký povrch lze zajistit pouze kvalitním bedněním. Základ formy tvořila dřevotřísková deska, na kterou byly přišroubovány hliníkové profily tvořící rám. Hranu tvořila dvojice hliníkových úhelníků, které byly k sobě slepeny tak, aby výsledná tloušťka desky byla 18 mm (rozměr běžné dřevotřískové desky) a zároveň vytvořily profilovanou hranu desky, která měla následně zapadnout do nerezové konstrukce spodní části stolu. Všechny hliníkové prvky byly před betonáží potřeny barvou, aby se zabránilo chemické reakci mezi hliníkem a zásaditým betonem. Během výroby betonové desky byla zhotovena doprovodná tělesa, aby mohla být určena finální únosnost desky stolu. Finální rozměr desky byl 1205 x 505 x 18 mm.

Tab. 36 Tabulka mechanických vlastností betonu stolku.

Mechanické vlastnosti	Jednotlivá měření	Průměr
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2502	2420
	2481	
	2308	
Pevnost v tlaku [MPa]	95,91	96,15
	94,01	
	98,54	
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	6,28	6,73
	7,86	
	6,07	

Uvedené výsledky ukazují snížení jak tahových, tak tlakových pevností proti původní receptuře, což je způsobeno dávkováním plastových vláken. Vlákná délky 18 mm byla plně zakotvena do cementové matrice s maximálním zrnem kameniva 4 mm, přesto tahová pevnost výrazně poklesla, protože vlákna měla tahovou pevnost pouze 300 MPa (vysokopevnostní ocelové drátky mají pevnost kolem 2700 MPa). Tlaková pevnost je snížena tím, že plastová vlákna nezabraňují tolik příčné deformaci zkušebního tělesa a navíc se sama deformují během zatěžovací zkoušky. Vlivem plastových vláken stoupl množství vzduchu v čerstvém betonu z běžných 3 % na 6,5 %. Vzduch se totiž vázal na povrchu plastových vláken. Vhodný systém podepření betonové desky umožňuje stůl zatížit osamělým břemenem o hmotnosti až 45 kg, což je pro běžné konferenční stoly dostatečná hodnota.



Obr. 81 Ukázka již hotového stolu.

8.1.3. Obkladový prvek

Ve spolupráci s firmou RC Constructions, s.r.o. byla vyvíjena receptura betonu pro výrobu obkladové dlaždice z vysokohodnotného betonu. Hlavním požadavkem bylo dosažení co nejlepšího povrchu bez vzduchových pórů. Dlaždice byla uvažována pro interiérové použití v reprezentativních místnostech bez jakéhokoli vlivu agresivity a s nízkou vlhkostí, byl tedy uvažován stupeň vlivu prostředí X0. Mechanické vlastnosti nebyly podstatné a nebyly tedy ani zkoušeny. Receptura betonu byla kompletně změněna. Místo mikrosiliky byl používán popílek, aby bylo dosaženo co nejlepšího povrchu betonu. Místo čedičového písku byl použit křemenný písek praný, hlavní motivací bylo neovlivňovat barvu betonu, protože prvky měly být následně ještě probarveny. Výsledná receptura je v Tab. 37. Po zkušenostech s výrobou lavičky bylo jasné, že výrazný vliv na kvalitu povrchu bude mít kvalita povrchu bednění. Firma RC Constructions, s.r.o. dokázala velmi dobře frézovat sklo, a tak formy pro finální dlaždice byly vyfrézovány do velkých skleněných bloků. Během vývoje byly jako bednění používány sklenky na whisky. Ač je toto řešení nestandardní, bylo velmi efektivní a funkční. Během celého výzkumu nebyla při odbedňování vzorků rozbita ani jedna sklenka. Použití skleněného

bednění s sebou přineslo řadu výhod: absolutně hladký povrch, nenasákavé bednění a všechny zlomy s mírným zaoblením, tedy bez pravých úhlů.

Tab. 37 Receptura betonu pro realizaci obkladové dlaždice.

Složka	Původní receptura		Receptura pro obkl. dlaždice	
	Specifikace	Dávka [kg/m ³]	Specifikace	Dávka [kg/m ³]
Cement	CEM I 42,5 R - Mokrý	600	CEM I 42,5 R - Mokrý	650
Voda		150		260
v/c		0,22		0,40
Kamenivo 0 / 4	Čedič - Bílčice	750	Křemičitý písek	1185
Kamenivo 4 / 8	Čedič - Bílčice	340		
Kamenivo 8 / 16	Čedič - Bílčice	400		
Superplastifikátor	Stachement 951	30	Berament HT5341	28
Mikrosilika	Stachesil S	80	Popílek	90
Drátky	Dramix OL13/.20	120		
Drátky	Dramix RC 80/40 BP	80		



Obr. 82 Ukázka vývoje kvality povrchu betonu.



Obr. 83 Ukázka z výroby prototypů dlaždic.

Po optimalizaci receptury na skleničkách se přešlo k výrobě prototypů dlaždic. Reliéf dlaždic byl vytvořen firmou RC Constructions, s.r.o. tak, aby prvky na sebe plynule navazovaly v obou směrech, a bylo tedy možné obkládat velké plochy s potlačením vlivu spáry. V poslední fázi byly prvky rovněž probarvovány. Během prvních realizovaných obkladů vznikl problém s lepením dlaždic na stěnu, protože zadní plocha byla příliš hladká a dlaždice sjížděly z podkladu. Z tohoto důvodu bylo nutné dlaždice složitě podepírat klínky. K výraznému zlepšení situace došlo, když během výroby byla horní betonovaná plocha (což je právě zadní plocha, prvky byly vyráběny v inverzní poloze) záměrně zdrsňena. V dnešní době je realizace obkladu z betonových dlaždic součástí nabídky služeb firmy RC Constructions, s.r.o.

8.1.4. Mostní zábradlí

Vývoj panelu zábradlí probíhal ve spolupráci s firmou Skanska a.s. Z důvodu potřeby dlouhé životnosti zábradlí byl pro výplňový prvek zvolen vysokohodnotný beton, který byl kotven do ocelové konstrukce. Standardní řešení používané firmou Skanska a.s. bylo použití ocelové výplně osazené do ocelového rámu. Nové řešení snížilo množství oceli, která se musí ošetřovat, což sníží náklady na údržbu zábradlí a také zkrátí dobu omezení provozu na mostě během údržby. Další výhodou bylo snazší tvarové řešení výplně než u ocelové varianty [99].

Návrh receptury betonu byl náročný, protože prvek musel splnit podmínky dlouhé životnosti, ale také vysoké odolnosti při dynamickém zatížení nárazu podle normy TNI CEN/TR 16949 (737001) [100], a přitom zůstat relativně levný, aby byl konkurenceschopný.



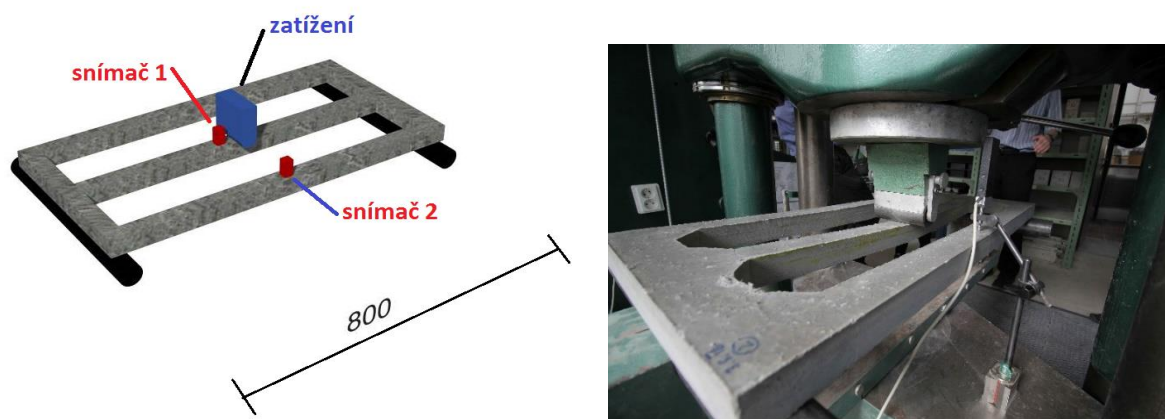
Obr. 84 Ukázka výplně zábradlí z vysokohodnotného betonu.



Obr. 85 Osazení dílců zábradlí na mostě v obci Sázava.

Pro úspěšné absolvování dynamické zkoušky nárazu je nutné, aby ze zkoušeného prvku při nárazu neodpadla žádná část. Z tohoto důvodu byla receptura doplněna velkým množstvím vláken, aby se zvýšila soudržnost materiálu. V běžném stavu nejsou tato vlákna prakticky využita, protože veškeré namáhání prvku přenáší nekovová výztuž, která je v prvku osazena. Konkrétní receptura zde nebude uvedena na žádost firmy Skanska a.s. Obecně byly použity dva druhy cementu CEM I 42,5 R a CEM I 52,5 R (bílý), aby výsledná barva betonu byla ve světlých odstínech. Cementy byly dále doplněny mikrosilikou a vápencem pro zvýšení hutnosti betonu. Jako kamenivo byl použit křemičitý písek v několika frakcích, dále pak superplastifikátor a dva typy vláken s různou délkou.

První testy probíhaly pouze staticky a na výseku konstrukce. Během zatěžování byla zkoumána odolnost střední příčle a způsob porušení prvku (viz Obr. 86). Na základě výsledků statické zatěžovací zkoušky provedl doc. Ing. Šmilauer, Ph.D., DSc. (Fakulta stavební ČVUT v Praze) tvarovou optimalizaci zábradlí a autor navrhl změnu ve ztužení matrice drátky.



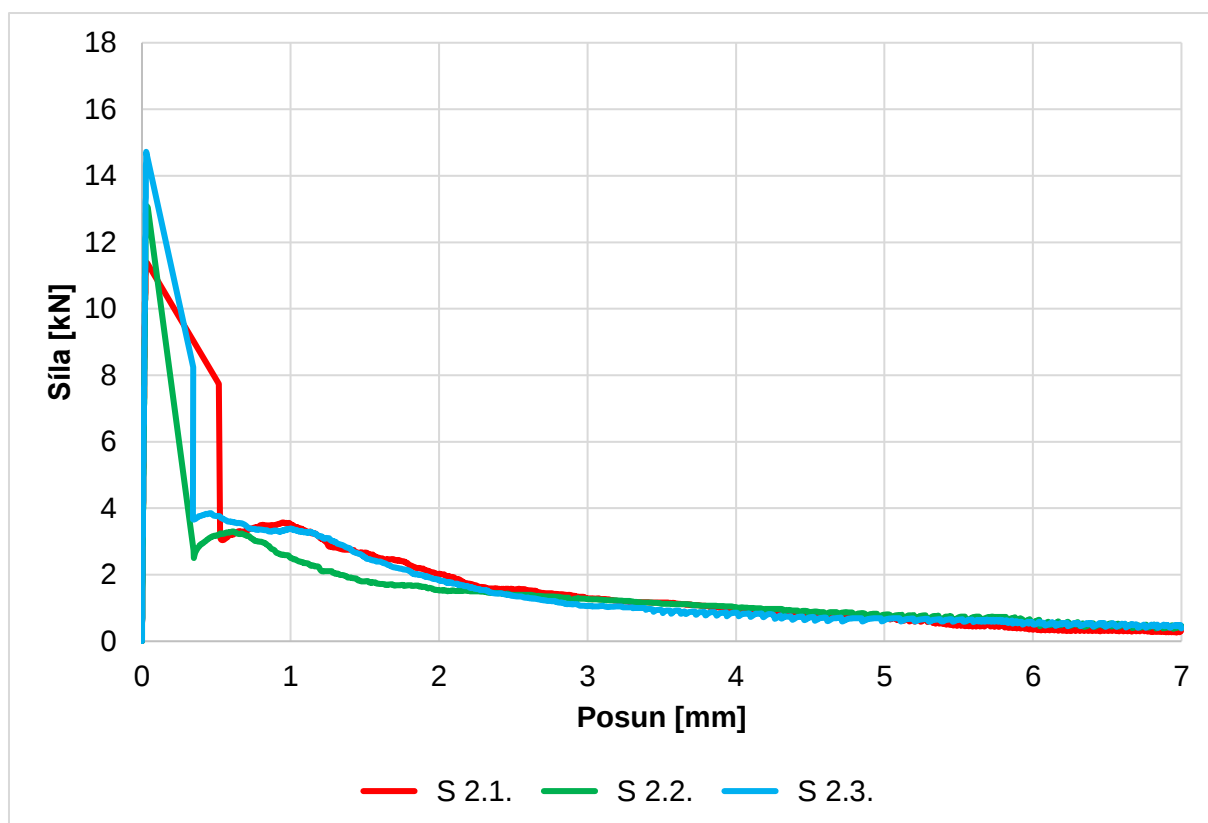
Obr. 86 Statická zatěžovací zkouška.

V receptuře byla použita tato vlákna:

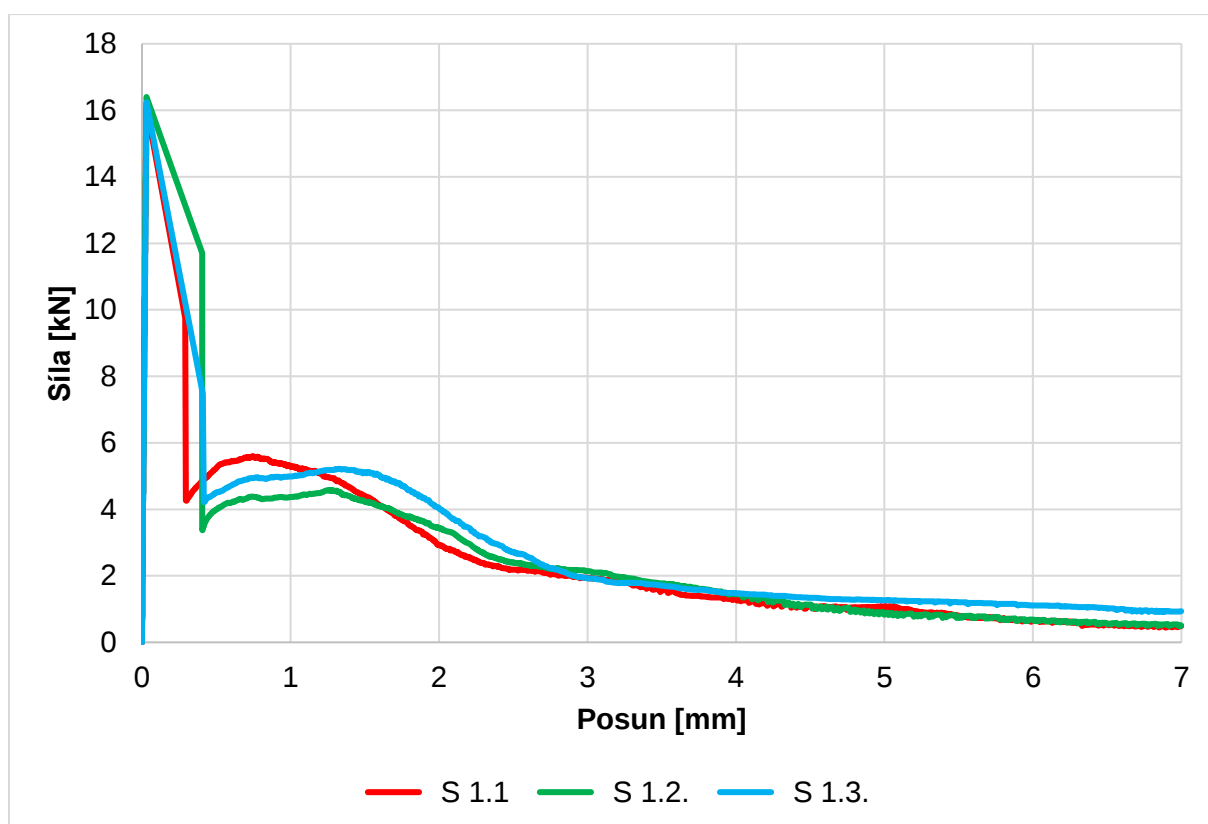
- průměr 130 μm , délka 12 mm z PVA,
- průměr 480 μm , délka 30 mm z PP.

Oba druhy vláken byly míchány v poměru 3:1 ve prospěch krátkých vláken. Na základě zkoušek byl tento poměr změněn na 1:1. Po změně ztužení cementové matrice bylo nutné ověřit vliv změny na mechanické vlastnosti vysokohodnotného betonu. První sledovanou vlastností byla konzistence, protože výrazné zhoršení konzistence by znemožňovalo průmyslovou výrobu. Konzistence byla dle přání firmy měřena podle ČSN EN 1015-3 [101] (podle Hägermanna). V původní variantě s poměrem vláken 3:1 byla zjištěna hodnota rozlití 300 mm a při novém poměru 1:1 byla zjištěna hodnota 280 mm, což svědčí pouze o malé ztrátě zpracovatelnosti.

Druhá sledovaná veličina byla tahová pevnost, která byla stanovena dle ČSN EN 12390-5 [57] na zkušebních tělesech o velikosti 100 x 100 x 400 mm při čtyřbodovém schématu zatížení a také při třibodovém schématu zatížení se zářezem. Druhý typ zkoušky byl realizován především proto, aby byla stanovena lomová energie materiálu, která sloužila doc. Ing. Šmilauerovi, Ph.D., DSc. k numerické analýze.



Obr. 87 Diagram síla / průhyb pro čtyřbodové zatížení (vlákna 3:1).



Obr. 88 Diagram síla / průhyb pro čtyřbodové zatížení (vlákna 1:1).

Z Obr. 87 a Obr. 88 je dobře patrné, jak větší množství delších vláken zvýšilo odolnost vzorku z cca 14 kN na 16 kN, což představuje nárůst tahové pevnosti o 0,5 MPa. Lomová energie se zvýšila také, a to velice výrazně z hodnoty 650 N/m na 1 664 N/m. Zvýšení lomové energie bylo hlavním cílem úpravy, protože právě tato hodnota rozhoduje o chování prvku při nárazu.

Po absolvování laboratorních zkoušek byla přenesena výroba do betonárny Skanska a.s. v Brně, kde byly vyrobeny zkušební dílce pro dynamickou zkoušku. Dynamickou zkoušku realizovala zkušebna Technického a zkušebního ústavu v Brně podle normy TNI CEN/TR 16949 (737001) [100]. Z dynamické zkoušky byly pořízeny záznamy z vysokorychlostní kamery, které pomohly lépe sledovat rozvoj trhlin po nárazu do příčle zábradlí a také chování prvku v uložení. Použité kamery byly i-SPEED 720 a 726. Každá kamera zabírala zkušební těleso z jiné strany, aby bylo možné rozlišit směr rozvoje trhlin. Z tohoto důvodu měly obě kamery synchronizovaný start záznamu a stejnou záznamovou rychlost, která byla až 3 000 fps při rozlišení 1920x1080. Skvělé přirozené světelné podmínky při zkoušce umožnily takto vysokou snímkovací rychlost bez přisvícení.



Obr. 89 Výroba zábradlí ve firmě Skanska a.s. [102].



Obr. 90 Příprava dynamické zkoušky.



Obr. 91 Snímek pořízený vysokorychlostní kamerou po nárazu.

Jak je patrné z Obr. 91, prvek zábradlí zůstal celistvý i po nárazu zkušebního vaku. U prvku bylo samozřejmě zaznamenáno výrazné porušení, ale zkouška byla úspěšná. Prvek zábradlí se po certifikaci dostal do výrobního sortimentu firmy Skanska a.s. a k dnešnímu dni byl osazen na dvou mostech v obcích Sázava a Čeperka.

8.2. Cyklopointy v obci Chocenice

Při výstavbě nové cyklostezky mezi Nepomukem a Přešticemi bylo rozhodnuto o vybudování dvou míst pro odpočinek a občerstvení pro cyklisty – tzv. “cyklopointů”. Jeden cyklopoint byl navržen u rybníka Výsovák poblíž obce Chocenice, druhý u Starého zámku přímo v obci Chocenice. Záměrem architekta při návrhu cyklopointu bylo vytvoření jednoduché, ale nápadné konstrukce, která by splňovala všechny požadavky na subtilnost, dlouhou životnost a jednoduchou montáž bez nutnosti tvorby základů. (Podmínkou dotace byla demontovatelnost celé konstrukce včetně založení.) S přihlédnutím k požadavkům byl jako konstrukční materiál vybrán beton [98].



Obr. 92 Vizualizace cyklopointu u rybníka Výsovák [103].



Obr. 93 Vizualizace cyklopointu u Starého zámku [103].

Výroba prvků měla probíhat ve firmě SMP CZ v Brandýse nad Labem. Během přípravy projektu bylo se zástupci firmy domluveno, že celá konstrukce bude pojata jako experimentální s maximálním využitím vysokohodnotného betonu. Klasická betonářská výztuž měla být použita jen minimálně. Před vlastním návrhem receptury byl proveden statický výpočet, na jehož základě byly stanoveny požadavky na mechanické vlastnosti betonu. Pro nosné prvky zastřešení a vnitřního stolku (nejvíce namáhaný prvek celého cyklopointu z důvodu poměru rozpětí a tloušťky desky) měl být použit vysokohodnotný beton s charakteristickou tlakovou pevností vyšší než 30 MPa, což nebyla příliš významná hodnota, ale s charakteristickou tahovou pevností vyšší než 4 MPa, což znamenalo dosáhnout tahových pevností u jednotlivých vzorků kolem 6 MPa. Masivní prvky cyklopointu (základová deska a lavice) měly být navrženy z vláknobetonu s plastovými vlákny, které by omezovaly šířky trhlin a zvyšovaly odolnost prvků během manipulace.

Z technologického hlediska byly na recepturu betonu kladeny další požadavky. Čerstvý beton byl dopravován pomocí badie na velkou vzdálenost, což se muselo zohlednit, a proto byl pro zpomalení tuhnutí použit jiný superplastifikátor, který měl i retardační účinek. Další výraznou změnu receptury přinesla změna kameniva, protože z ekonomického hlediska nebylo možné pro výrobu cca 2,2 m³ HPC vyprázdnit v betonárně 40 t zásobníky kameniva nebo dávkovat 3,4 t potřebného jiného druhu kameniva ručně. Podobná situace byla u cementu, protože betonárka běžně používala pouze cement CEM I 52,5 R – Čížkovice. Všechny tyto změny byly zohledněny a došlo k úpravě receptury z kapitoly 6.

Tab. 38 Receptura betonu pro realizaci cyklopointu.

Složka	Původní receptura		Receptura pro cyklopoint	
	Specifikace	Dávka [kg/m ³]	Specifikace	Dávka [kg/m ³]
Cement	CEM I 42,5 R – Mokrý	600	CEM I 52,5 R – Čížkovice	600
Voda		150		156
v/c		0,22		0,23
Kamenivo 0 / 4	Čedič – Bílčice	750	Granodiorit – Mrač	780
Kamenivo 4 / 8	Čedič – Bílčice	340	Granodiorit – Dobříš	925
Kamenivo 8 / 16	Čedič – Bílčice	400		
Superplastifikátor	Stachement 951	30	Stachement 508	30
Mikrosilika	Stachesil S	80	Stachesil S	80
Drátky	Dramix OL13/.20	120	Dramix OL13/.20	80
Drátky	Dramix RC 80/40 BP	80	Dramix RC 80/40 BP	60

Sestavená receptura byla nejprve ověřována v laboratořích Fakulty stavební ČVUT v Praze a posléze i ve výrobním závodě, během této předvýrobní přípravy byly zhotovovány zkušební vzorky (krychle 150 x 150 x 150 mm a trámce 150 x 150 x 700 mm) pro ověření tlakových pevností a pevnosti v tahu za ohybu.

Důležitým faktorem výroby vysokohodnotného betonu je i způsob míchání jednotlivých složek. Podle možností tamního mísicího zařízení musel být míchací postup upraven proti ideálně navrženému postupu v kapitole 7. Rozdíl v míchacím postupu je uveden v Tab. 32.

Tab. 39 Postup míchání betonu.

Ideální (navržený) postup		Skutečný postup	
složka	čas míchání [s]	složka	čas míchání [s]
4/8 + cement	60	0/4 + 4/8 + cement	60
0/4	60		
mikrosilika	300	mikrosilika	300
voda + SP	90	voda + SP	90
drátky	120	drátky	120
celkem	630	celkem	570

Transferem výrobního postupu z laboratoře do výrobního závodu vznikla i ověřená technologie, která byla zaregistrována pod číslem TE01020168-001/2013 [104]. Na následujících stránkách je zobrazena fotodokumentace z výroby a z prováděných zkoušek konzistence.



Obr. 94 Řídicí jednotka výroby SMP CZ.



Obr. 95 Ukázka čerstvého betonu.



Obr. 96 Zkouška konzistence čerstvého vysokohodnotného betonu.



Obr. 97 Ukládání čerstvého betonu do bednění.



Obr. 98 Úprava horního povrchu deskového dílce z důvodu zahlazení drátků.



Obr. 99 Hotový dílec.



Obr. 100 Bednění pro betonový stůl.

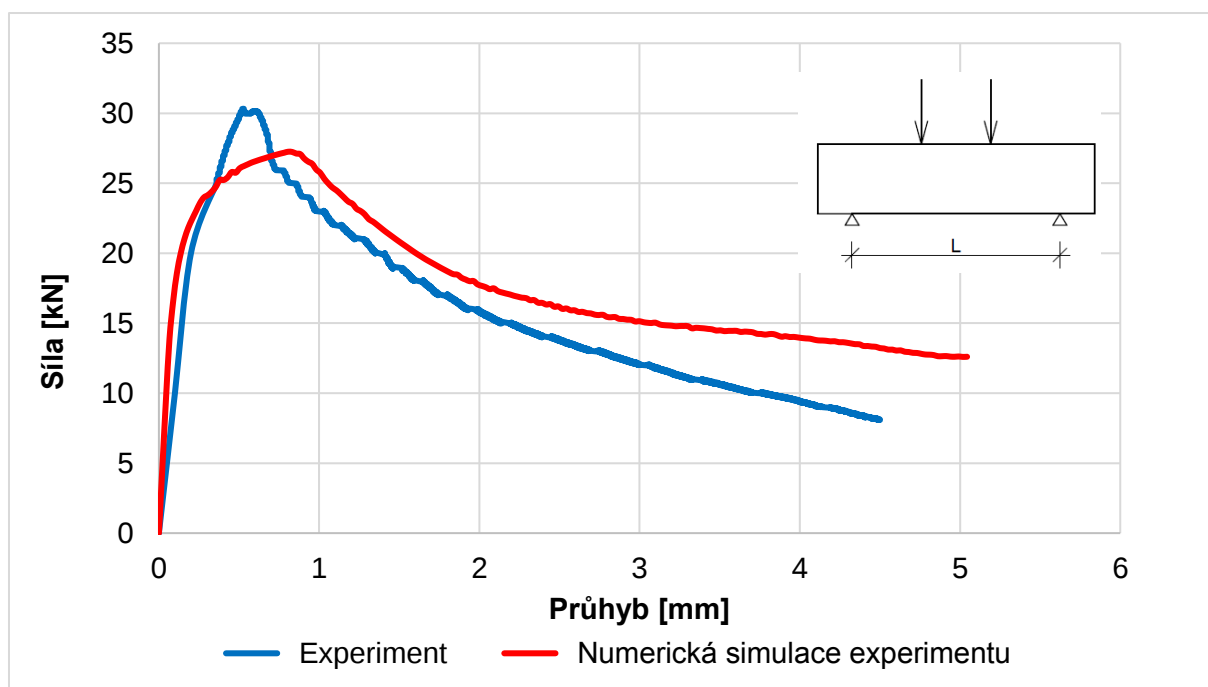


Obr. 101 Hotový stůl z HPC.

Během výroby byla zhotovena i doprovodná zkušební tělesa (normové krychle 150 x 150 x 150 mm, trámce 100 x 100 x 400 mm a desky stolu 1800 x 400 x 50 mm). Zkušební tělesa byla zčásti dovezena do zkušební laboratoře Fakulty stavební ČVUT v Praze a následně odzkoušena akreditovanou laboratoří na pevnost v tlaku podle ČSN EN 12390-3 [28] a pevnost v tahu za ohybu, kdy pro normová tělesa bylo použito čtyřbodové uspořádání zkoušky, dle ČSN EN 12390-5 [57]. Výsledky z laboratoře Fakulty stavební ČVUT v Praze jsou uvedeny v Tab. 40 a na Obr. 102. Zbylé vzorky byly ponechány ve výrobním závodě a zkoušeny tamní akreditovanou laboratoří.

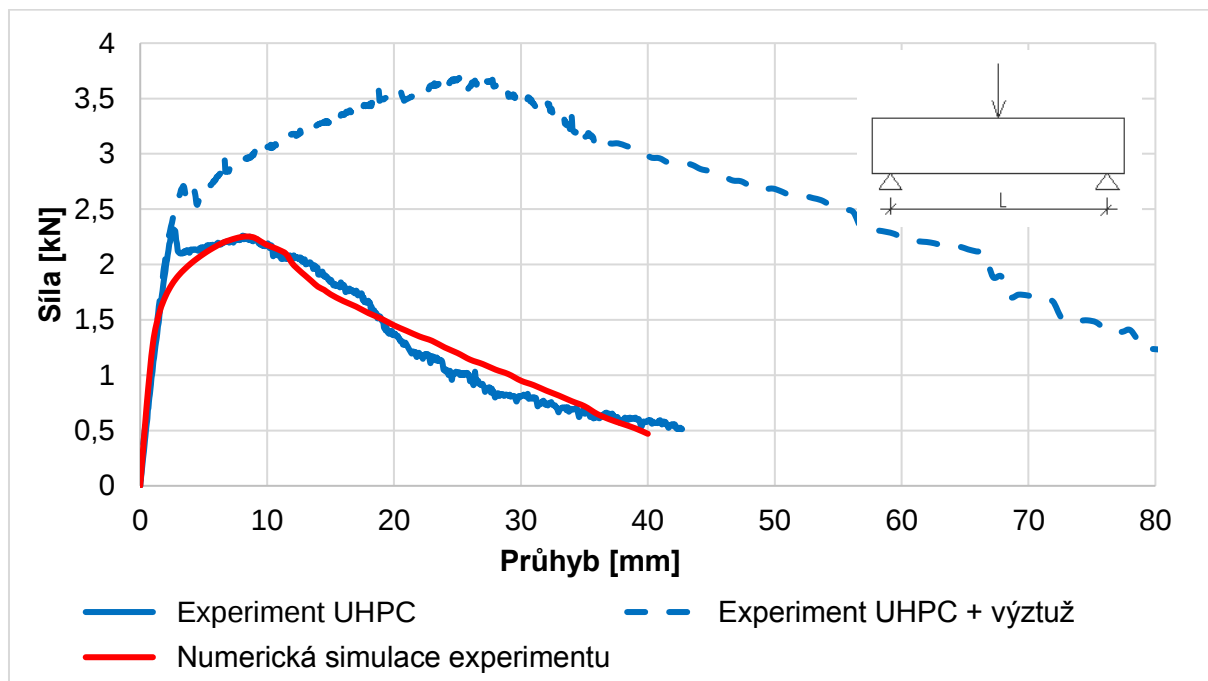
Tab. 40 Výsledky tlakových pevností vzorků vyrobených v SMP CZ.

Vzorek	Rozměry [mm]	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m³]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
C 1.1	150	8 155	2 416	3 254	144,6
	150				
	150				
C 1.2	151	8 115	2 389	3 316	146,4
	150				
	150				
C 1.3	150	8 134	2 410	3 298	146,6
	150				
	150				
C 1.4	149	8 148	2 430	3 375	151,0
	150				
	150				
C 1.5	151	8 194	2 412	3 368	148,7
	150				
	150				
C 1.6	150	8 167	2 420	3 339	148,4
	150				
	150				
průměr			2 415		147,6
			Směrodatná odchylka		2,23
			Variační koeficient		0,015
			Charakteristická pevnost		142,8



Obr. 102 Diagram síla / průhyb pro normové trámký 100 x 100 x 400 mm vyrobené v SMP CZ.

Vzorky odpovídající svým tvarem horní desce stolu byly zkoušeny třibodovým ohybem, aby zkouška lépe simulovala modelový případ, kdy vandalové využijí konstrukci stolu pro vylezení na střechu cyklopointu. Cílem bylo, aby ani při tomto zatížení nedošlo k poškození konstrukce stolu. Pro ověření více možností řešení konstrukce stolu byly zhotoveny i vzorky vyztužené betonářskou výztuží. Vyztužení bylo realizováno pomocí nerezové výztužné sítě s oky 60 x 60 mm a průměru 3 mm, tato síť byla vzhledem k tloušťce desky 50 mm v její neutrální ose.



Obr. 103 Diagram síla / průhyb pro desky 1800 x 400 x 50 mm vyrobené v SMP CZ.

Tab. 41 Pevnost v tahu za ohybu na deskách 1800 x 400 x 50 mm vyrobených v SMP CZ.

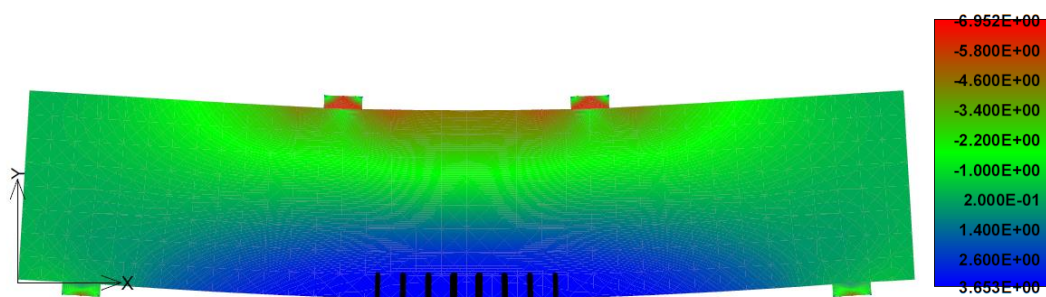
Vzorek	Geometrie			Síla při vzniku trhliny	Napětí
	šířka	výška	délka		
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
HPC 1	400	50	1800	1,97	5,32
HPC 2	400	50	1800	2,34	6,32
HPC 3	400	50	1800	2,17	5,86
HPC + výztuž 1	400	50	1800	2,93	7,91
HPC + výztuž 2	400	50	1800	2,45	6,62
HPC + výztuž 3	400	50	1800	2,76	7,45

Z Tab. 41 je patrné, že síla na mezi vzniku makrotrhliny se pohybuje kolem 2,0 kN, což odpovídá zatížení 200 kg, toto zatížení spolehlivě přenese tíhu dospělého muže. Zkouškou tedy bylo dokázáno, že potřebné zatížení přenesou konstrukce i bez betonářské výztuže. Platí to jak pro konstrukci stolku, kde limitní je zatížení osobami lezoucími po konstrukci, tak pro konstrukci zastřešení, kde byla požadovaná pevnost v tahu za ohybu 4,0 MPa.



Obr. 104 Ukázka z prováděných zkoušek tříbodovým ohybem

Navrhování konstrukcí, jako je cyklopoint, není podpořeno žádnou normou, a proto musely být materiálové charakteristiky několikanásobně ověřovány. Snížení množství zkoušených těles umožnila numerická simulace, která sloužila k predikci výsledků. Nejprve však bylo nutné sestavit materiálový model, který by odpovídal vyráběnému HPC. Sestavení materiálových konstant bylo časově náročnější než provedení reálných experimentů, ale zjištěné parametry výrazně usnadnily další navrhování. Pro optimalizaci materiálových parametrů byla stanovena zkouška čtyřbodovým ohybem na zkušebních tělesech 100 x 100 x 400 mm, shoda numerické simulace v programu Atena 2D a experimentu je patrná na Obr. 103.



Obr. 105 Rozložení napětí při jednom z výpočtových kroků v programu Atena 2D.

Tab. 42 Materiálové konstanty pro numerickou simulaci v programu Atena.

Parametr	Zadaná hodnota
Pevnost v tlaku	143,2 MPa
Pevnost v tahu	3,66 MPa
Modul pružnosti	43,98 GPa
Poissonovo číslo	0,2
Specifická lomová energie	3,477 kN/m
Velikost kameniva	8 mm
Zazubení kameniva	Collins
Specifická objemová hmotnost	2500 kg/m ³

Po vyrobení a odzkoušení všech zkušebních těles byla konstrukce schválena k montáži. Před montáží byly všechny díly konstrukce natřeny žlutou barvou podle přání architekta, následně byly převezeny konstrukční díly z výrobního závodu v Brandýse nad Labem do obce Chocenice v Plzeňském kraji. Montáž a sestavení celé konstrukce probíhala až na místě.



Obr. 106 Dílce připravené k expedici.



Obr. 107 Namontovaná konstrukce.

8.3. Prvky se zvýšenou odolností proti výbuchu

S rostoucím geopolitickým napětím ve světě se v posledních letech zvyšuje důraz na dříve často zanedbávaná zatížení tlakovou vlnou, nárazem nebo průstřelem. U objektů patřících do tzv. kritické infrastruktury (přehrad, mosty nebo elektrárny) se s tímto zatížením konstrukce uvažuje a ta je upravována již ve fázi jejího návrhu. Teroristé se však zaměřují nejen na objekty kritické infrastruktury, ale velmi často jsou jejich cílem veřejné budovy. Útoky na veřejné budovy nezpůsobí většinou pro chod státu prakticky žádné riziko, ale společenský dopad je významný a poškození konstrukce bývá také značné především proto, že na dané zatížení nebyla dimenzována. Vývoj materiálů a konstrukcí, které by dokázaly dodatečně zvýšit odolnost veřejných budov, je tedy jistě přínosem [105]. Slibných výsledků lze dosáhnout při použití vysokohodnotného betonu, protože dosahuje vysokých pevností, je schopen pohltit značnou část energie, která se při výbuchu uvolní, a navíc si zachovává všechny výhody běžného betonu. Cenové porovnání vysokohodnotného betonu s ostatními balistickými materiály jako je keramika, sklolaminát nebo ArmoX vychází pro beton velmi příznivě.

8.3.1. Panel se zvýšenou odolností proti výbuchu

Zkoušky odolnosti vysokohodnotného betonu proti výbuchu probíhaly na deskách 1,0 x 1,0 m s různou tloušťkou. Desky byly vyráběny podle základní receptury uvedené v Tab. 23. Jediná modifikace receptury byla u ocelových ztužujících drátků, kde byly použity drátky různých typů i výrobců, aby bylo dosaženo co nejvyšší hodnoty lomové energie materiálu. Výzkum publikovaný Coughlinem a kol. [106] dokázal přímou souvislost mezi lomovou energií betonu a jeho odolností proti výbuchu.

Zkoušení betonových prvků probíhalo ve spolupráci s Katedrou ženíjních technologií na Univerzitě obrany v Brně. Na základě této spolupráce bylo možné provádět výbuchové zkoušky vysokohodnotného betonu ve Vojenském výcvikovém prostoru (VVP) Boletice – Pražáčka a VVP Březina – Hanácká louka ve spolupráci s 15. ženijní brigádou Armády České republiky v Bechyni.

Všechny panely byly zkoušeny ve svislé poloze, která byla zajištěna podpůrnou konstrukcí z oceli nebo dřeva. Výbuch byl vždy způsoben pomocí plastické trhavy Pentrit (pentaerythritol tetranitrát) $C(CH_2ONO_2)_4$ o různých hmotnostních dávkách. Pentrit byl vybrán z důvodu své chemické stability, výbuchových parametrů a jednoduchého dělení. Energie výbuchu se uvádí u Pentritu 5810 kJ/kg a detonační rychlost je kolem 8250 m/s. Pentrit je široce využíván především pro fragmentační a trhací práce.

Celý výzkum byl realizovaný ve třech fázích:

- V první fázi byly zkoušeny vysokohodnotné betony spolu s běžným betonem o vysoké pevnosti (C 70/85) a drátkobetonem (FC 80/95). Vyhodnocování probíhalo pouze opticky, případně se změřením velikosti výtrže.
- V druhé fázi už byly zkoušeny pouze desky z vysokohodnotného betonu a míra poškození byla stanovována pomocí ultrazvuku, který byl schopen vyhodnotit i vnitřní poškození prvku. Porovnání jednotlivých výsledků bylo tedy mnohem přesnější.
- Ve třetí fázi výzkumu bylo realizováno měření stejně jako v druhé fázi, ale nejednalo se o prosté panely, ale o sendvičové panely. Sendvičový panel byl složen z dvou betonových vrstev a uprostřed byla tlumicí vrstva z polystyrénu, gumy nebo sklolaminátu.

První fáze výzkumu

Pro první fázi byly panely vyráběny v laboratořích Fakulty stavební ČVUT v Praze. Jednalo se o panely tloušťky 50 a 100 mm. Receptura betonu byla upravena o zpomalovač tuhnutí Retardal 540 od společnosti Stachema CZ v dávce $1,2 \text{ kg/m}^3$. Zpomalovač byl použit, protože laboratorní míchačka zvládla efektivně namíchat pouze 25 l, což znamenalo zhotovit čtyři dávky na jeden panel. Kromě vlastních zkušebních panelů byla vyrobena i doprovodná tělesa pro ověření základních vlastností betonu. Výsledky mechanických vlastností uvádí Tab. 43.

Tab. 43 Hodnoty mechanických vlastností betonu vyráběného v laboratorních podmínkách.

Parametr	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Charakteristická hodnota
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2 700	50,33	2 540
Tlaková pevnost [MPa]	153,03	6,58	136,5
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	11,22	1,37	7,4
Sečnový modul pružnosti [GPa]	133,89	3,52	122,6

Na následujících třech obrázcích je pro každý typ materiálu ukázáno poškození po výbuchu 100 g trhaviny. První dva panely mají tloušťku 150 mm a poslední z vysokohodnotného betonu má tloušťku pouze 50 mm.



Obr. 108 C 70/85, tl. 150 mm.



Obr. 109 FC 80/95, tl. 150 mm.



Obr. 110 HPC, tl. 50 mm.

Z obrázku je jasně patrný přínos vysokohodnotného betonu, ve kterém vznikl pouze otvor v místě kontaktu s trhavinou. Panel z prostého betonu se i při větší tloušťce rozpadl a jeho stabilita byla zajištěna pouze podpůrnou konstrukcí. Panel z drátkobetonu zůstal kompaktní, ale s větším poškozením než HPC. Následně byl celý pokus zopakován se zvětšením nálože na 200 g.



Obr. 111 C 70/85, tl. 150 mm.



Obr. 112 FC 80/95, tl. 150 mm.



Obr. 113 HPC, tl. 50 mm.

Zvětšením nálože se ještě více projevila odolnost panelů z vysokohodnotného betonu. Panel z prostého betonu se tentokrát rozpadl i s podpůrnou konstrukcí, panel z drátkobetonu vykazoval velké trhliny, ale drátky zajistily celistvost celého panelu. V případě vysokohodnotného betonu se prakticky nic nezměnilo, pouze proražený otvor byl větší.

Následně byl proveden pokus opět s 200 g plastické trhaviny na panelu z vysokohodnotného betonu při tloušťce 100 mm.



Obr. 114 HPC, tl. 100 mm.

Zde je patrné, že nedošlo již k průrazu vůbec a panel odolal. Lícni strana však vykazovala větší poškození než v předchozích případech. Jak se již ukázalo, přínos vysokohodnotného betonu je významný, ale vzniklé průrazy a následný odlet výtrže na rubové straně od výbuchu znamenají potenciálně velké riziko, protože odletující částice obsahují vyčnívající drátky a jejich rychlost je velká, jak potvrdil záznam z vysokorychlostní kamery.

Druhá fáze výzkumu

Nejdražší surovinou v receptuře vysokohodnotného betonu jsou ocelové drátky. Jejich cena může tvořit 30 až 50 % celkové ceny vysokohodnotného betonu. Tato skutečnost byla motivací pro provedení následujícího výzkumu, protože náhrada drátků z vysokopevnostní oceli jiným materiálem by cenu výrazně snížila. Receptura vysokohodnotného betonu je obvykle složena ze dvou druhů drátků, jak je popsáno v kapitole 5. Krátké drátky se prakticky vždy dodávají pouze z vysokopevnostní oceli a ani mezi různými výrobci nejsou významné rozdíly v mechanických parametrech nebo v ceně, proto krátké drátky nebyly dále zkoumány a byly součástí každé receptury podle Tab. 23. Opačná situace je u dlouhých drátků, kde je již řada výrobců, kteří nabízejí drátky z různých druhů oceli a jejich mechanické vlastnosti se významně liší. Někteří výrobci vyrábějí drátky dokonce z odpadních plechů ze strojírenské výroby. Takové drátky mají zpravidla nízkou cenu, ale také nízké mechanické vlastnosti.

Prvním zástupcem jsou drátky **Fibrex A1**, které produkuje český výrobce ze Žďáru nad Sázavou. Drátky Fibrex A1 jsou vyráběny z odpadních plechů, které vznikají při strojírenské výrobě. Jejich délka je 25 mm a tahová pevnost 450 MPa.

Druhým typem jsou drátky vyrobené z **kordového drátu**, který se používá při výrobě pneumatik. Během recyklace pneumatik se oddělují tři základní složky: patní lano, guma a kordový drát. Tyto dráty se posléze sekají a dají se znovu využít do betonu. Sekání drátu není přesnou technologickou operací, proto délka drátku je proměnná od 20 do 60 mm. Občas se objevují drátky délky až 80 mm. Během výroby pneumatik se rozlišuje drát do pneumatik osobních aut a drát do lehkých užitkových vozů (pneumatiky typu C). Během recyklace se toto rozdělování již nedodrжуje, a protože pneumatiky mají přibližně stejný rozměr, recyklují se dohromady. Tahová pevnost drátu je tedy proměnná, pohybuje se od 2500 do 2800 MPa.

Základní používané drátky při vývoji receptury byly **Dramix RC 80/35 BP** s tahovou pevností 3070 MPa a délkou 35 mm. Základní typ drátků byl vždy nahrazen z 50 nebo ze 100 %.

Panely byly zkoušeny stejnou trhavinou jako v první fázi výzkumu a stejnou metodikou, rozdíl byl pouze ve vyhodnocování. Před každou zkouškou byly na povrchu panelu z každé strany vyznačeny měřicí body, které ležely proti sobě. Měřicí body tvořily síť s velikostí ok 100 x 100 mm. V těchto bodech bylo provedeno měření ultrazvukové impulzní rychlosti podle ČSN EN 73 1371 [107]. Stejně měření bylo realizováno opakovaně po zatížení výbuchem. K měření byl použit přístroj PunditLab+ od firmy Proceq se sondami o frekvenci 150 Hz pro panely tloušťky 50 mm a o frekvenci 54 Hz pro panely tloušťky 150 mm.

Z rozdílu rychlostí před zkouškou a po ní se dá soudit na porušení prvku. Ultrazvuková vlna prochází vždy nejkratší možnou cestou z vysílací sondy do sondy přijímací a nejlépe se šíří v pevných látkách na rozdíl od plyných, kde se prakticky nešíří. Tyto předpoklady dělají z ultrazvukových měření mocný nástroj nedestruktivního zkušebnictví. Pokud vznikne výbuchem trhlinka mezi měřicími body, je ultrazvuková vlna nucena tuto trhlinku „obejít“ přes neporušený materiál, čímž se prodlužuje její dráha a při konstantní rychlosti šíření materiálem

narůstá potřebný čas k přechodu ultrazvukové vlny z vysílací sondy do přijímací. Ze změřeného času a tloušťky panelu lze spočítat zdánlivou rychlost (zkreslenou o vliv trhlin a kvalitu kontaktu mezi sondou a povrchem betonu) šíření ultrazvukové vlny. Hodnocení poškození panelu způsobeného výbuchem je provedeno na základě rozdílů zdánlivé rychlosti ultrazvuku v daném bodě před výbuchem a po něm.

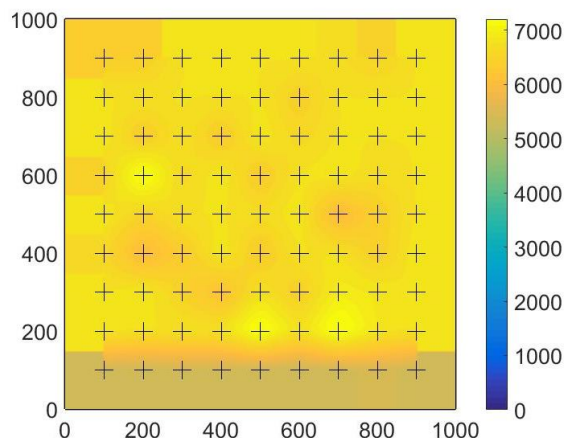
Měření jednoho panelu se skládá ze dvou sad měření po 81 hodnotách. Velké množství dat neumožňuje pro zobrazení dat použít jakýkoliv hodnotový systém. Smysluplné interpretace výsledků je dosaženo při plošném zobrazení dat pomocí izoploch. Pro zobrazení naměřených dat byl použit program SVDult vyvinutý Štefanem a Foglarem [108].

Všechny panely byly vyrobeny ve výrobním závodě IP Systém v Olomouci podle receptury uvedené v Tab. 23. Spolu s výrobou panelů byla vyrobena i doprovodná tělesa pro ověření mechanických vlastností betonu. Vlastní ověřování probíhalo v akreditované laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze.

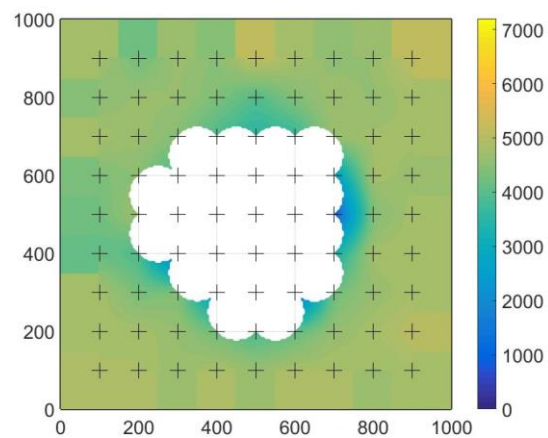
Tab. 44 Hodnoty mechanických vlastností betonu vyráběného v IP Systém Olomouc.

Parametr	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Charakteristická hodnota
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2 675	38,63	2 550
Tlaková pevnost [MPa]	135,17	3,09	125,2
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	10,20	1,04	7,3
Sečnový modul pružnosti [GPa]	130,10	15,88	84,6

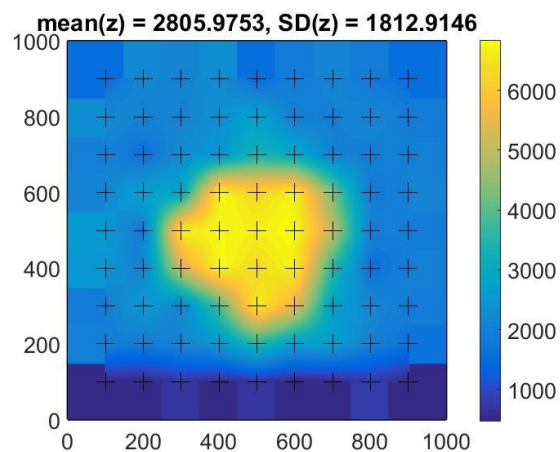
Vlastní měření probíhalo na panelech $1,0 \times 1,0 \times 0,05$ m, které byly ve svém středu zatíženy 300 g trhaviny Pentrit. Jako referenční panel byl označen prvek, který byl ztužen 60 kg drátků Dramix RC 80/35 BP a 120 kg drátky Dramix OL13/20. Obr. 115 a Obr. 116 zobrazují ultrazvukovou rychlost na referenčním panelu před výbuchem a po něm. Rozdíl těchto hodnot je patrný na Obr. 117, v tomto zobrazení žlutá barva představuje místo s největším porušením, což je v tomto případě oblast výtrže, kde se hodnota rozdílu před zatížením a po něm rovná hodnotě před zatížením, protože v místě výtrže nešlo realizovat měření po výbuchu. Nemožnost realizace měření může mít dvě příčiny – první je úplná nepřítomnost pevné hmoty, která byla zničena energií výbuchu, druhou pak je skutečnost, že mezi měřicími body bylo tak velké množství trhlin, že průchod ultrazvukové vlny nebyl možný. Kromě vlastního barevného zobrazení naměřených hodnot program SVDult stanoví i průměrnou hodnotu, která sloužila k vyhodnocení v závěru této kapitoly. Pro zjednodušení Obr. 118 až Obr. 120 zobrazují již pouze rozdíly z měření jednotlivých náhrad drátků.



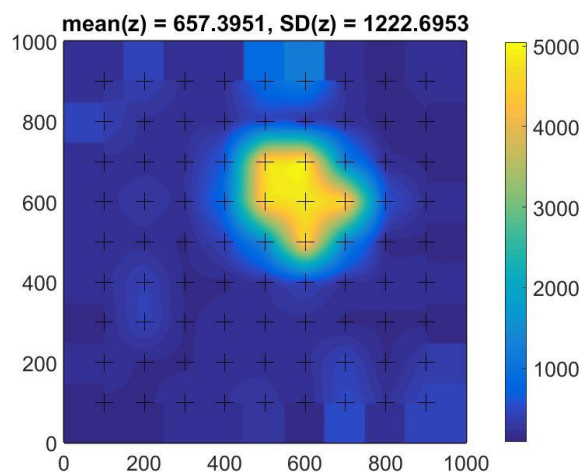
Obr. 115 Ultrazvukové měření referenčního panelu před výbuchem.



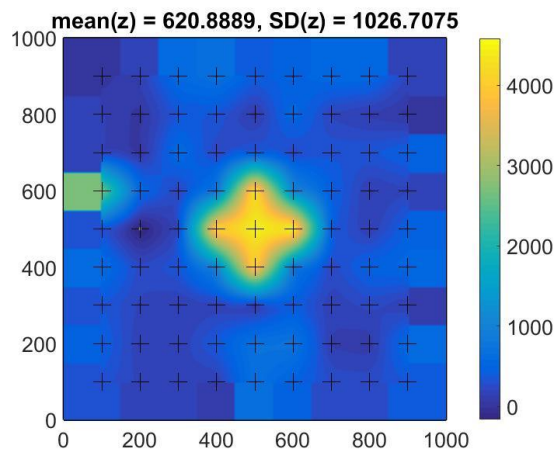
Obr. 116 Ultrazvukové měření referenčního panelu po výbuchu.



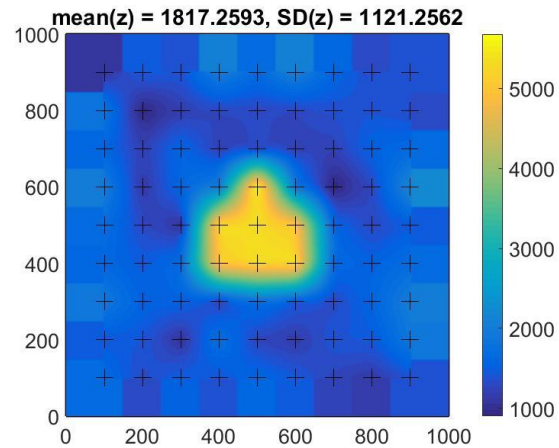
Obr. 117 Rozdíl hodnot ultrazvukových měření před výbuchem referenčního panelu a po něm.



Obr. 118 Rozdíl hodnot ultrazvukových měření před výbuchem panelu s drátky Fibrex A1 a po něm při 50% náhradě.



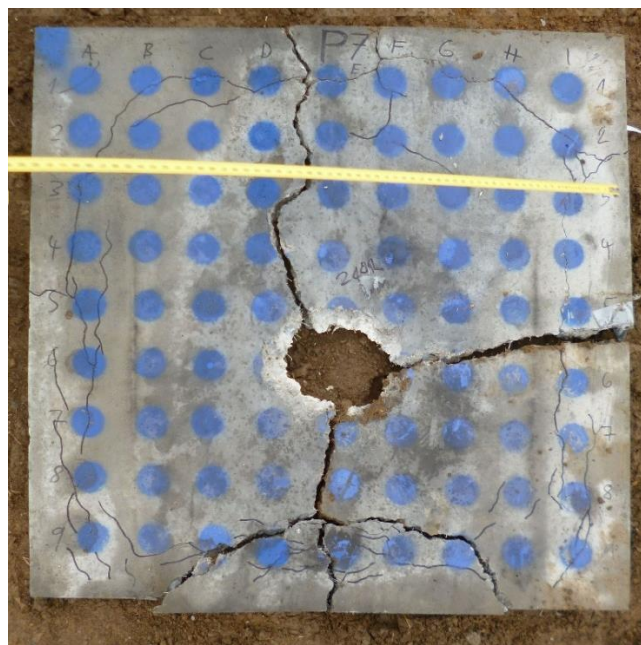
Obr. 119 Rozdíl hodnot ultrazvukových měření před výbuchem panelu s drátky kord a po něm při 50% náhradě.



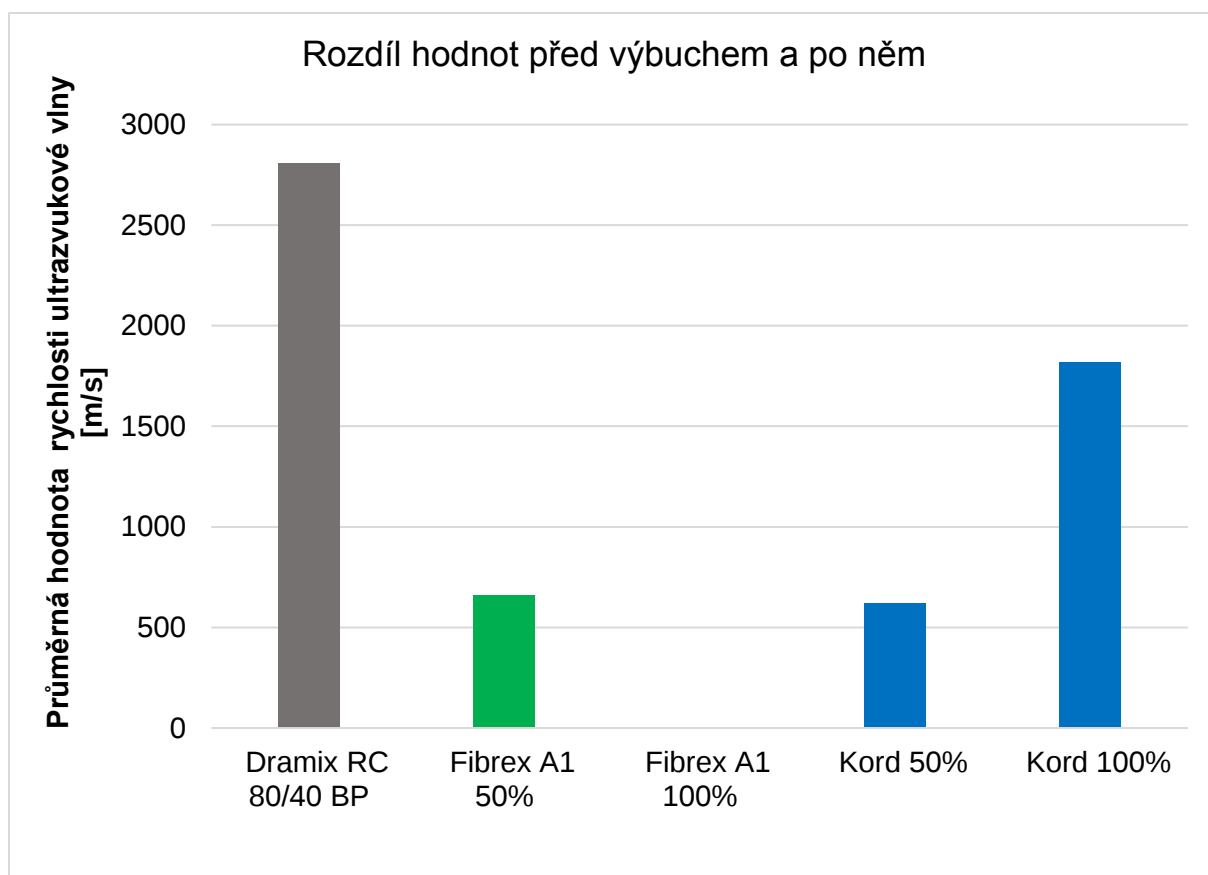
Obr. 120 Rozdíl hodnot ultrazvukových měření před výbuchem panelu s drátky kord a po něm při 100% náhradě.

Pro názorné porovnání naměřených dat byl vytvořen graf na Obr. 122, který zobrazuje průměrné hodnoty odolnosti jednotlivých panelů. Čím vyšší je průměrná hodnota z rozdílu měření před výbuchem a po něm, tím je panel více poškozen, protože velká část panelu si zachovala původní hodnotu naměřenou na neporušeném panelu. Při hodnocení kvality je třeba si uvědomit, že čím je beton pevnější, tím větší poškození vnitřní struktury vykazuje. Tento efekt je způsoben pórovitostí a přítomností vody.

Panel se 100% náhradou drátků Dramix drátky Fibrex vykazuje nulovou hodnotu, což bylo způsobeno skutečností, že tento panel nebylo možné po výbuchu změřit, protože jeho destrukce byla fatální (viz Obr. 121).



Obr. 121 Panel se 100% náhradou drátků Dramix drátky Fibrex po zatížení kontaktním výbuchem.

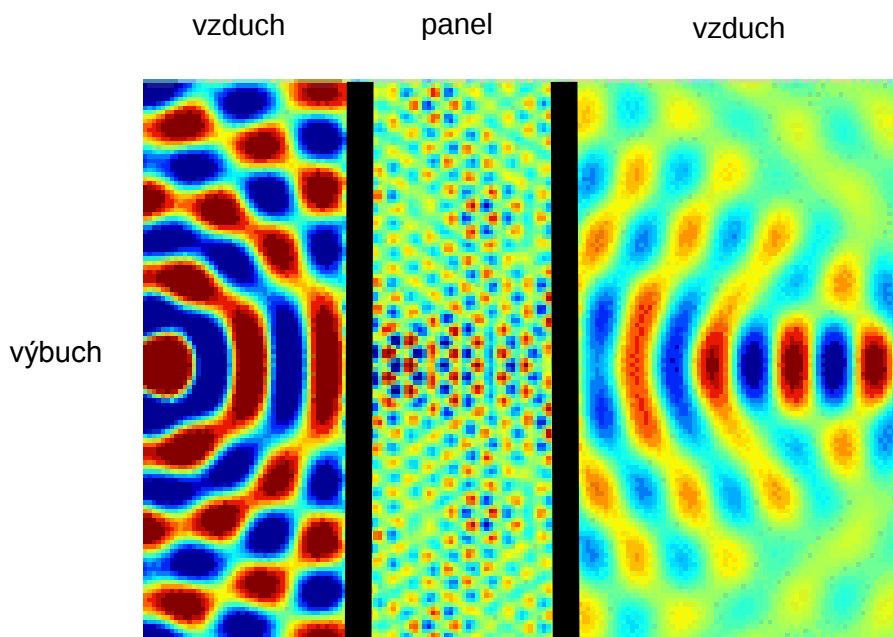


Obr. 122 Porovnání výbuchové odolnosti různých náhrad drátků Dramix.

Výsledky jasně ukázaly, že použití drátků s co nejvyšší tahovou pevností je nezastupitelné pro získání žádané odolnosti vysokohodnotného betonu proti výbuchům, i když jsou tyto drátky finančně nákladné. K podobným výsledkům lze dojít i při porovnání hodnot lomové energie zjištěné ze tříbodové ohybové zkoušky se zářezem.

Třetí fáze výzkumu

V poslední fázi výzkumu byly realizovány zkoušky ověřující posílení odolnosti betonového panelu pomocí vnitřní tlumicí vložky. Motivací k tomuto pokusu byl způsob chování tlakové vlny vzniklé při výbuchu. Tlaková vlna se šíří od svého epicentra vzdušným prostředím jen s minimální ztrátou energie až k místu, kde narazí na rozhraní dvou látek o různé hustotě (v našem případě rozhraní vzduch-beton). Na tomto povrchu dojde k částečnému odrazu tlakové vlny, čímž pokračující tlaková vlna v původním směru ztratí velkou část své energie. Tlaková vlna se dále šíří novým prostředím (betonovým panelem) až se opět dostane na rozhraní dvou těles s rozdílnou hustotou (rozhraní beton-vzduch). Zde opět dojde k odrazu a v původním směru pokračuje tlaková vlna s další výraznou ztrátou energie. Pokud tedy do betonového panelu vložíme tlumicí vrstvu s jinou hustotou, než má beton, dojde k několika odrazům v rámci panelu a výstupní energie tlakové vlny bude výrazně nižší a tím bude vyšší poškození panelu.



Obr. 123 Model šíření tlakové vlny [109].

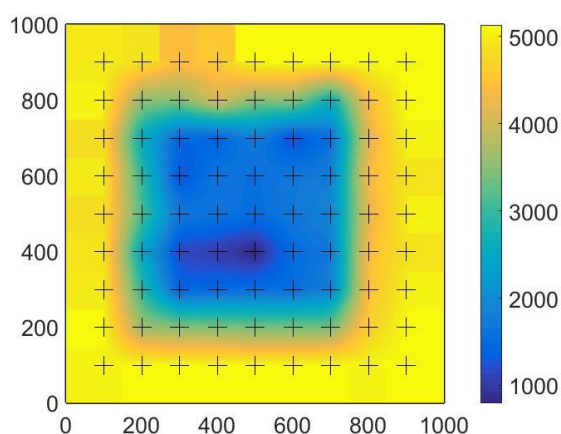
Sendvičový panel byl ve všech případech sestaven stejně, tedy z 50 mm vysokohodnotného betonu, 50 mm tlumicí vrstvy a 50 mm vysokohodnotného betonu. Pro tlumicí vrstvu byly variantně použity tyto materiály:

- **Pěnový polystyren** o objemové hmotnosti 20 kg/m^3 .
- **Stered** je produkt stejnojmenné slovenské firmy, který je určen jako tepelná a akustická izolace. Vlastní desky jsou vyráběny ze zbytků z recyklace interiéru vozidel, takže se jedná o velmi heterogenní materiál s objemovou hmotností 250 kg/m^3 .
- **Sklolaminát** je materiál vzniklý spojením skleněných vláken a pryskyřice. Během výroby jsou desky ještě lisovány pro zvýšení objemové hmotnosti. Objemová hmotnost sklolaminátu je 2200 kg/m^3 .
- Tlumicí vrstva označená jako **Guma 1** je vyráběná z gumového granulátu vzniklého během recyklace starých pneumatik. Gumový recyklát byl v tomto případě lisován na objemovou hmotnost 1050 kg/m^3 .
- **Guma 2** je obdoba Guma 1, jen s objemovou hmotností o hodnotě 700 kg/m^3 .

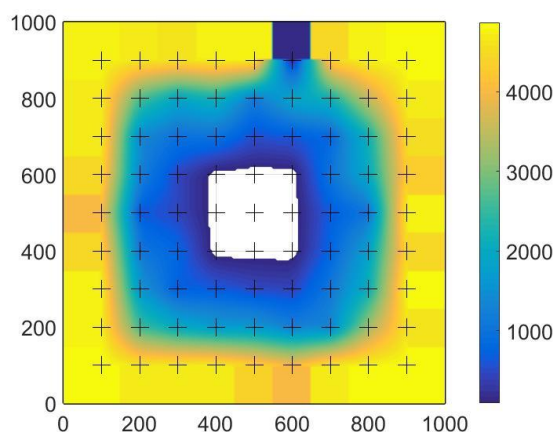
Zkoušení a vyhodnocování probíhalo podobným způsobem jako v předchozí fázi výzkumu. Rozdíl spočíval pouze ve větší náloži trhaviny, která odpovídala 500 g Pentritu. Zvětšení hmotnosti nálože bylo provedeno z důvodu nárůstu odolnosti panelů. Referenční panel byl téže tloušťky jako ostatní sendviče, tedy 150 mm, ale neobsahoval žádnou tlumicí vrstvu. Všechny panely byly vyrobeny podle receptury v Tab. 23. ve výrobním závodě B&BC a.s. Zbůch. Spolu s výrobou panelů byla vyrobena také doprovodná tělesa pro ověření mechanických vlastností betonu. Vlastní ověřování probíhalo opět v akreditované laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze. Rozdíl ultrazvukových rychlostí před zkouškou a po ní je pro jednotlivé panely zobrazen na Obr. 126 až Obr. 131.

Tab. 45 Hodnoty mechanických vlastností betonu vyráběného v B&BC a.s. Zbůch.

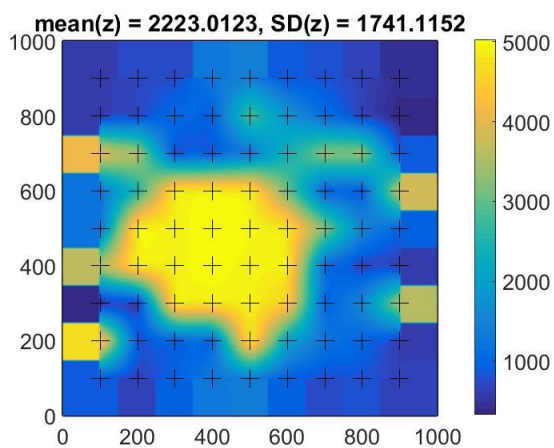
Parametr	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Charakteristická hodnota
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2 570	12,25	2 550
Tlaková pevnost [MPa]	124,53	5,04	114,0
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	8,85	1,01	7,3
Sečnový modul pružnosti [GPa]	113,10	11,39	80,3



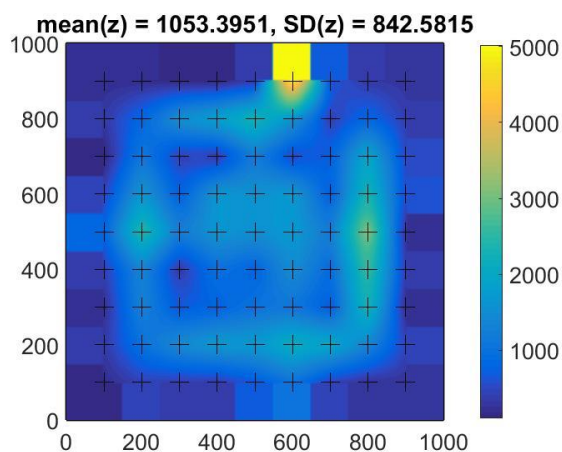
Obr. 124 Ultrazvukové měření panelu s tlumicí vrstvou před výbuchem.



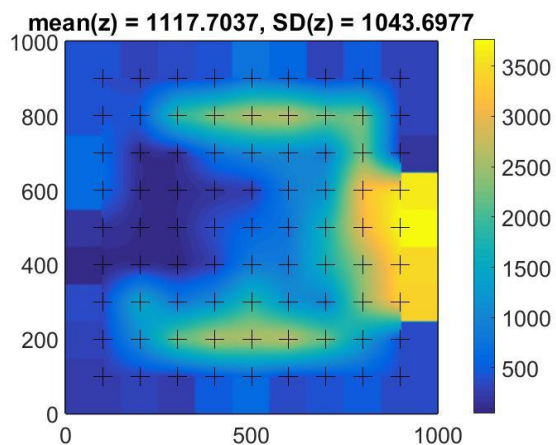
Obr. 125 Ultrazvukové měření panelu s tlumicí vrstvou po výbuchu.



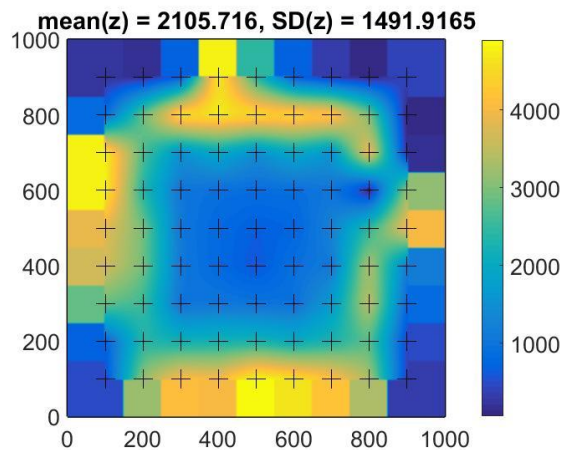
Obr. 126 Rozdíl hodnot ultrazvukových měření před výbuchem referenčního panelu a po něm.



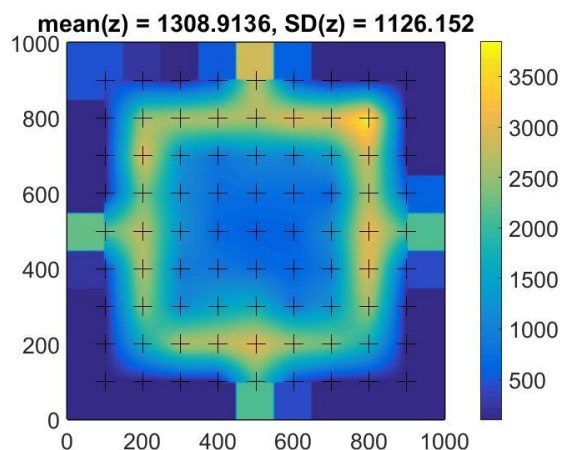
Obr. 127 Rozdíl hodnot ultrazvukových měření před výbuchem panelu s polystyrenem a po něm.



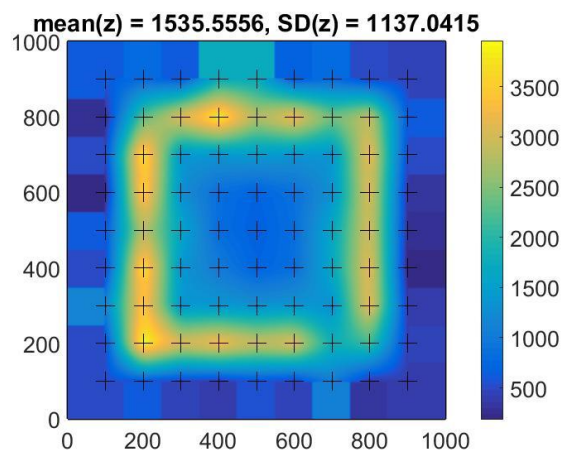
Obr. 128 Rozdíl hodnot ultrazvukových měření před výbuchem panelu se Steredem a po něm.



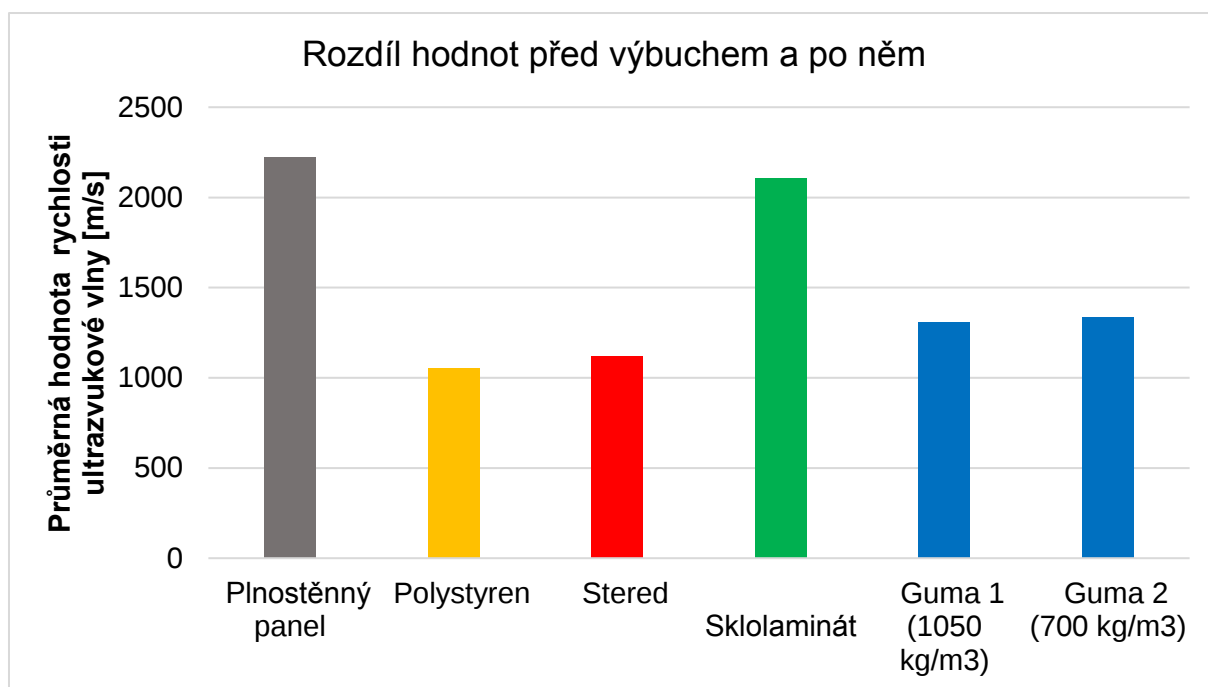
Obr. 129 Rozdíl hodnot ultrazvukových měření před výbuchem panelu se sklaminátem a po něm.



Obr. 130 Rozdíl hodnot ultrazvukových měření před výbuchem panelu s gumou 1 (1050 kg/m³) a po něm.



Obr. 131 Rozdíl hodnot ultrazvukových měření před výbuchem panelu s gumou 2 (700 kg/m³) a po něm.

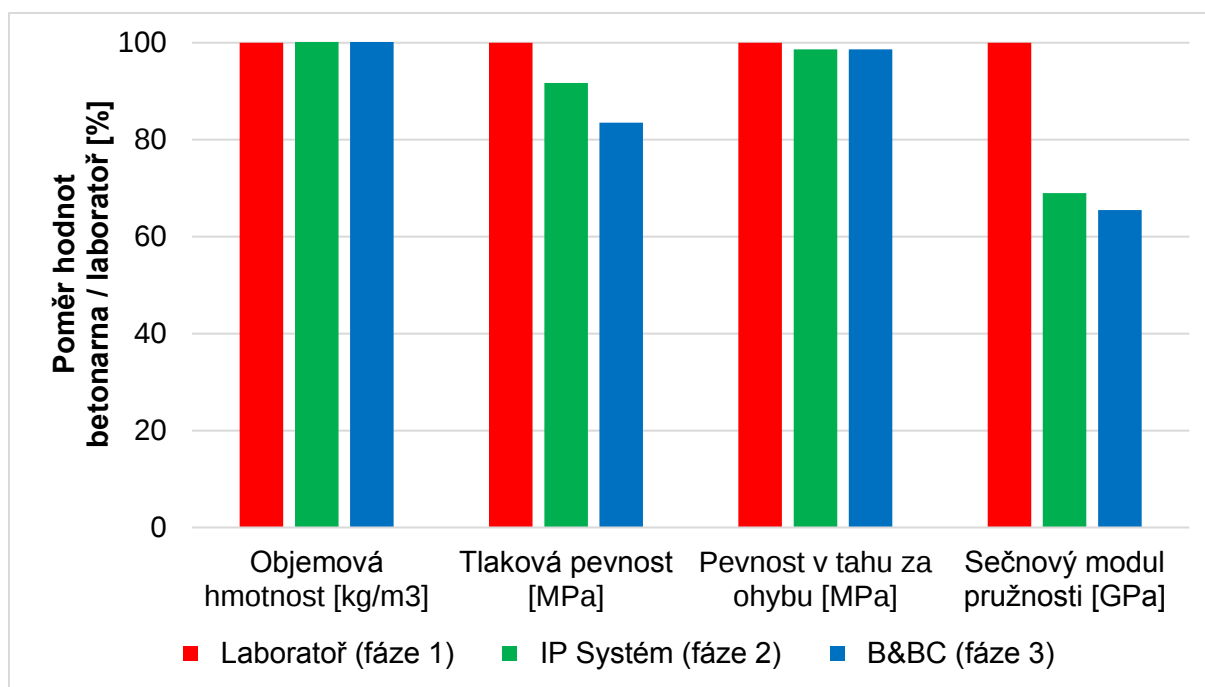


Obr. 132 Porovnání výbuchové odolnosti sendvičových panelů s různou tlumicí vrstvou.

Teoretické předpoklady o poklesu poškození se nepotvrdily, už podle vizuálního hodnocení prvku. Všechny sendvičové panely vykazovaly podobné poškození. Pro porovnání energie tlakové vlny po průchodu sendvičovým panelem by bylo nutné měřit konkrétní hodnoty přetlaku za panelem. Toto měření by nebylo technicky možné realizovat na zkušebních tělesech o velikosti 1,0 x 1,0 m, protože instalovaný snímač by zachytil i různé odrazy tlakové vlny např. od země. Věrohodné výsledky by mohly být zaznamenány při velikosti panelu alespoň 2,5 x 2,5 m. Při takto velkých panelech by jejich výroba a náklady na manipulaci byly řádově vyšší. Rozhodně by však další výzkum v této oblasti byl přínosný.

Z naměřených poškození panelů vyplývá, že nejefektivnějším byl plnostěnný panel, což je pravděpodobně způsobeno vysokou hodnotou lomové energie vysokohodnotného betonu. Výborné výsledky byly dosaženy s tlumicí vrstvou ze sklolaminátu, který má opět velmi vysoké hodnoty mechanických vlastností. Nejhorších vlastností bylo dosaženo s pěnovým polystyrénem, což je materiál prakticky bez mechanické odolnosti.

Pro všechny tři fáze hodnocení výbuchové odolnosti byla použita stejná receptura, což umožnilo realizovat porovnání vlivu transferu výroby z laboratorních podmínek do průmyslových. Výsledky vykazovaly perfektní shodu s výjimkou sečnového modulu pružnosti. Graf na Obr. 133 je sestaven z charakteristických hodnot, které vykazovaly velmi dobrou shodu. Průměrné hodnoty byly již více rozptýlené.



Obr. 133 Porovnání mechanických vlastností v jednotlivých fázích.

8.3.2. Bezpečnostní lavička

V rámci řešení projektu TAČR TH02010888 byl vyvinut ochranný prvek ve tvaru lavičky, která je chráněna užitným vzorem číslo 31203. Lavička má sloužit jako ochranná bariéra před účinky tlakové vlny vzniklé výbuchem a před útokem z palných zbraní. K dosažení maximální požadované bezpečnostní funkce byly vždy dvě lavičky umístěny zády k sobě. V tomto uspořádání zajišťuje dvojitá stěna opěradla lavičky dostatečnou ochranu před palbou z útočné pušky AK-47 s nábojem 7,62 x 39 mm, což je jedna z nejrozšířenějších zbraní používaných teroristy. Bezpečnostní dvojlavička může sloužit jako krycí prvek pro civilisty nebo poskytnout ochranné postavení pro zasahující jednotky. Bezpečnostní lavička poskytuje i ochranu před účinky tlakové vlny. Pokud dojde v uzavřeném prostoru k výbuchu, způsobuje tlaková vlna četná zranění i ve větší vzdálenosti od epicentra výbuchu. Chování tlakové vlny je totiž v uzavřených prostorech velmi chaotické, protože dochází k četným odrazům vlny od konstrukcí objektu a od jeho vybavení. Bezpečnostní lavička je navržena tak, aby při čelním postavení k výbuchu výraznou část tlakové vlny odklonila směrem vzhůru. Odklonění tlakové vlny vytvoří za lavičkou dostatečný „stín“, aby se do něj ukryla dospělá osoba. Tvarová optimalizace lavičky probíhala na základě numerické simulace na Katedře ženijských technologií Univerzity obrany v Brně.

Vývoj receptury pro realizaci lavičky vycházel ze standardní receptury uvedené v Tab. 23, kterou bylo nutné upravit kvůli složitému tvaru prefabrikátu. Bezpečnostní lavička byla trojrozměrným prefabrikátem s náročným tvarem, který mohl být realizován pouze v uzavřené formě. Použití uzavřené formy je z technologického hlediska významná změna ve srovnání s betonáží plošných prvků realizovaných v předchozích kapitolách.

Výroba opět probíhala ve výrobním závodě B&BC a.s. Zbůch. Betonáž probíhala v inverzní poloze a beton byl lit do nohou, aby betonovaná hrana výrobku nebyla viditelná. Velikost

nalévacího prostoru byla 1200 x 40 mm a lití probíhalo ze dvou stran (do každé nohy zvlášť). Hutnění bylo realizováno pomocí dvojice příločných vibrátorů, připevněných přímo na ocelovou formu.



Obr. 134 Betonáž do uzavřené formy – vnitřní jádro.



Obr. 135 Betonáž do uzavřené formy – celá forma.

Komplikované podmínky betonáže si vyžádaly snížení velikosti maximálního zrna kameniva na pouhých 8 mm a také omezení délky drátků na 30 mm. Pro zlepšení pohyblivosti betonu byl snížen i stupeň ztužení ocelovými drátky proti běžné receptuře. Poslední úprava se týkala změny konzistence, která byla realizována mírným snížením dávky vody, protože příločná vibrace byla velmi účinná.

Tab. 46 Receptura pro výrobu lavičky do uzavřené formy.

Složka	Původní receptura		Receptura pro lavičku	
	Specifikace	Dávka [kg/m ³]	Specifikace	Dávka [kg/m ³]
Cement	CEM I 42,5 R – Mokrý	600	CEM I 42,5 R – Mokrý	600
Voda		150		140
v/c		0,22		0,20
Kamenivo 0 / 4	Čedič – Bílčice	750	Čedič – Bílčice	820
Kamenivo 4 / 8	Čedič – Bílčice	340	Čedič – Bílčice	830
Kamenivo 8 / 16	Čedič – Bílčice	400		
Superplastifikátor	Stachement 951	30	Stachement 508	20
Mikrosilika	Stachesil S	80	Stachesil S	80
Drátky	Dramix OL13/.20	120	Dramix OL13/.20	80
Drátky	Dramix RC 80/40 BP	80	Dramix RC 80/30 BP	60

Během betonáže byla opět vyráběna i doprovodná zkušební tělesa pro ověřování mechanických vlastností vyráběného betonu. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 47. Zjištěné mechanické vlastnosti ukazují, že úprava receptury byla provedena citlivě, protože prakticky nedošlo ke změně mechanických vlastností proti původní receptuře, jejíž mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 45.

Tab. 47 Hodnoty mechanických vlastností betonu vyráběného v B&BC a.s. Zbůch.

Parametr	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Charakteristická hodnota
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2 570	20,69	2 500
Tlaková pevnost [MPa]	125,0	2,95	115,5

Betonáží v inverzní poloze a použitím velkých poloměrů zakřivení bylo docíleno velmi vysoké kvality povrchu betonu, z kterého nevystupovaly žádné drátky. Přesto sezení na betonu by v zimním nebo naopak v letním období nemuselo být pohodlné, proto byl komfort uživatelů zvýšen pomocí dřevěných lamel, které byly připevněny na povrch betonu pomocí epoxidového lepidla.

Po výrobě prvních prototypů zrealizovala Katedra ženíjných technologií Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany v Brně polní zkoušky, kde bylo otestováno chování lavičky při působení tlakové vlny vzniklé vzdáleným výbuchem. Pro tento experiment byl použit jako trhavina Trinitrotoluen (TNT) o hmotnosti 10 kg ve vzdálenosti 5 m. Zkouška proběhla velmi úspěšně, podle Obr. 137 je zřejmé, že tlaková vlna utrhla z lavičky pouze dřevěné lamely, ale betonová nosná část zůstala neporušená. Realizovaná zkouška také dokazuje správnost tvaru lavičky, protože dřevěné lamely byly odtrženy v místě přechodu mezi nohou a sedákem a v horní části opěráku. Odtržení lamel prokázalo místa s maximálním namáháním - v těchto místech právě dochází k odklonění tlakové vlny vzhůru.

Balistická odolnost lavičky byla zkoušena pouze na zkušebních deskách, které měly shodné parametry jako opěradlo lavičky. Zkoušení probíhalo ve zkušebně balistické odolnosti materiálů za velmi přísných bezpečnostních opatření, protože vysokohodnotné betony jsou charakteristické odletujícími kusy betonu nebo munice proti směru střelby. Také při těchto zkouškách lavička splnila definovanou odolnost.



Obr. 136 Hotový výrobek.



Obr. 137 Lavička po a před zkouškou.



Obr. 138 Vizualizace osazené lavičky.

8.3.3. Ochranný kryt

Ve spolupráci s Armádou České republiky měl autor možnost účastnit se zkoušek výbuchové odolnosti nově vyvíjeného mobilního krytu pro ochranu živé síly. Výzkum probíhal pod vedením Vojenského výzkumného ústavu, který také celý projekt financoval. Mobilní kryt byl složen z betonových rámců o vnějších rozměrech 1,8 x 1,8 m, které byly spřaženy k sobě. Cílem výzkumu bylo zjistit odolnost této konstrukce na vzdálený i blízký výbuch. Díky vstřícné vzájemné spolupráci vznikla možnost doplnit celou sestavu mobilního krytu o dva segmenty z vysokohodnotného betonu, a tedy otestovat chování i tohoto materiálu [98].



Obr. 139 Ukázka postaveného krytu.

Výroba všech prvků probíhala ve výrobním závodě Prefa Grygov a.s. Běžné prvky měly být vyrobeny z betonu C 50/60, ale v konzistenci SCC, který byl ukládán do přestavitelné formy bez možnosti hutnění. Tato podmínka představovala pro výrobu dvou segmentů z vysokohodnotného nepřekonatelný problém, protože vyvíjenou recepturu betonu bylo možné upravit na konzistenci maximálně S5, ale nikoliv až na typ SCC. Zvýšení třídy konzistence bylo realizováno snižováním dávky drátků a zvyšováním dávky záměsové vody. Experimentálně bylo ověřeno, že množství drátků lze snížit pouze na 120 kg/m³. Další snižování množství drátků již znamenalo zásadní pokles hodnot mechanických vlastností. Ani při této dávce drátků a maximální dávce vody se ale nepodařilo docílit konzistence SCC.

Segmenty z vysokohodnotného betonu byly tedy nakonec vyrobeny za pomoci starší ocelové formy, která nebyla přestavitelná, ale byla osazena osmi příložitými vibrátory. Tato forma však byla navržena na velikost rámu 2,0 x 2,0 m. Rozdílná velikost dílců neumožňovala segmenty z vysokohodnotného betonu efektivně připojit do sestavy ze segmentů z betonu C 50/60. Segmenty z vysokohodnotného betonu byly přiloženy na jeden konec sestavy a k primární konstrukci připojeny pomocí textilních kurtů (viz Obr. 139).

Výroba segmentů probíhala nakonec podle upravené receptury, která vycházela z receptury uvedené v Tab. 22. Změny receptury byly provedeny z důvodu úpravy mechanických vlastností ztvrdlého betonu.

Tab. 48 Receptura pro výrobu segmentu ochranného krytu.

Složka	Původní receptura		Receptura pro ochranný kryt	
	Specifikace	Dávka [kg/m ³]	Specifikace	Dávka [kg/m ³]
Cement	CEM I 42,5 R – Mokrý	600	CEM I 42,5 R – Mokrý	650
Voda		150		156
v/c		0,22		0,21
Kamenivo 0 / 4	Čedič – Bílčice	750	Čedič – Bílčice	730
Kamenivo 4 / 8	Čedič – Bílčice	340	Čedič – Bílčice	350
Kamenivo 8 / 16	Čedič – Bílčice	400	Čedič – Bílčice	400
Superplastifikátor	Stachement 951	30	Stachement 2483	33
Mikrosilika	Stachesil S	80	Stachesil S	97,5
Drátky	Dramix OL13/.20	120	Dramix OL13/.20	80
Drátky	Dramix RC 80/40 BP	80	Dramix RC 80/40 BP	80



Obr. 140 Příprava výztužného armokoše.



Obr. 141 Betonáž rámu.

Detailní záznamy z realizovaných polních zkoušek jsou ve vlastnictví Vojenského výzkumného ústavu. Největším přínosem vyvinuté receptury vysokohodnotného betonu pro další aplikace byla zkouška odolnosti proti výbuchu minometného granátu. Granát byl umístěn na strop segmentu z vysokohodnotného betonu a iniciován malým množstvím trhaviny. Jak je vidět na Obr. 143, výbuch minometného granátu povrch betonu vůbec nepoškodil.

Před výbuchem minometného granátu byla z vnitřní strany segmentu osazena deska zachytávající odštěpky během výbuchu. Tato deska simuluje svou odolností lidskou kůži a z jejího poškození lze usuzovat na velikost zranění lidí přítomných uvnitř krytu. Po realizované zkoušce však zůstala tato deska neporušena.



Obr. 142 Osazení minometného granátu na střechu segmentu.



Obr. 143 Poničený vnější povrch po výbuchu minometného granátu.

9. Závěr

Vývoj jakékoliv receptury betonu a vysokohodnotného betonu obzvlášť vyžaduje detailní teoretické znalosti o vlastnostech a chování jednotlivých složek a jejich interakcích, ale také dostatek praktických technologických zkušeností, protože pro návrh receptury neexistuje exaktní postup. Jedinou výjimkou je rovnice objemu (15), která ale slouží spíše ke kontrole než k návrhu.

Míra vlivu jednotlivých složek betonu na jeho vlastnosti se z publikovaných výzkumných článků dá stanovit jen obtížně, protože výsledky jsou významně ovlivněny lokálními materiály, zvyklostmi a okrajovými podmínkami experimentu, které v textech nejsou většinou uvedeny. Relevantní informace lze získat pouze z experimentů realizovaných v zemích používajících evropskou legislativu. Velké množství výzkumných prací vzniká v Asii, kde se používají suroviny pro výrobu betonu se zcela odlišným složením i rozdílné způsoby zkoušení, což činí výsledky pro nás nevypovídajícími a je vhodné stanovené hypotézy vždy ověřit i v podmínkách České republiky.

Recepturu betonu navrženou a ověřenou v laboratorních podmínkách je nutné přenést do průmyslového prostředí, což si ve všech realizovaných případech v této práci vyžádalo další úpravu receptury. Ze zkušeností autora vyplývá, že ve většině případů došlo k zlepšení reologických vlastností betonu, což je způsobeno hlavně efektivnějším míchacím zařízením, než jaké se používá v laboratořích. Druhým aspektem transferu technologie z laboratorního prostředí do průmyslu je požadavek na prodloužení doby zpracovatelnosti, protože přesun čerstvého betonu z míchacího zařízení k místu ukládání je výrazně delší než v laboratorních podmínkách.

Receptura navržená v této práci již byla upravena o uvedené aspekty. Kvalita receptury byla ověřena jejím průmyslovým využitím v těchto betonárnách:

- PREFA PRO a.s. – Zápy (dříve součástí podniku SMP CZ),
- IP systém a.s. – Olomouc,
- B&BC a.s. – Zbůch,
- PREFA BRNO a.s. – závod Hodonín,
- PREFA BRNO a.s. – závod Kuřim,
- CS-BETON Prefa s.r.o. – závod Grygov.

S použitím uvedené receptury bylo realizováno pět velkých konstrukčních aplikací, které byly vyrobeny v uvedených betonárnách, a další tři drobné prvky, které byly vyráběny částečně v laboratorním a částečně v průmyslovém prostředí.

Hlavním přínosem této práce je sestavení nového postupu míchání betonu, uvedeného v kapitole 7.1, který umožní navýšení tlakové pevnosti zhruba o 10 % pouze tím, že efektivněji využívá vlivu superplastifikátorů, a tudíž umožňuje snížení vodního součinitele při zachování stejné zpracovatelnosti.

Významným přínosem pro průmyslovou výrobu betonu je i ověření vlivu praní kameniva na mechanické vlastnosti betonu, které je uvedeno v kapitole 2.5. V realizovaném experimentu bylo zjištěno, že lze zlepšit tlakovou pevnost betonu o zhruba 10 %, pokud jsou nejprve vyprána zrna hrubého kameniva. Praní hrubého kameniva odstraní jemný prach usazený na

povrchu hrubých zrn, který zde ulpěl během těžby a třídění kameniva. Odstranění tohoto prachu zlepší spojení mezi kamenivem a cementovou pastou, což způsobí nárůst pevnosti. Praní kameniva nepředstavuje pro výrobce betonu významnou komplikaci, protože tuto službu nabízí řada dodavatelů kameniva do betonu. Zvýšení nákladů na praní kameniva se pohybuje kolem 50 Kč/t kameniva, což je v ceně vysokohodnotného betonu zanedbatelná částka. Toto navýšení ceny je dokonce přijatelné i pro běžné betony.

V kapitole věnované latentně hydraulickým příměsím byla jako nejvhodnější příměs pro beton zvolena mikrosilika s velikostí náhrady cementu kolem 20 %. Při takto vysoké náhradě dosahovala cementová pasta i beton dobrých mechanických vlastností. Existují však výzkumy zabývající se trvanlivostí železobetonu s vysokou dávkou mikrosiliky, které prezentují, že mikrosilika významně snižuje hodnotu pH betonu. Tím oslabuje pasivační ochranu betonářské výztuže, a tudíž jsou železobetonové konstrukce obsahující mikrosiliku méně trvanlivé. Druhá skupina výzkumníků zastává názor, že u vysokohodnotných betonů je tento efekt zanedbatelný, protože hutná struktura vysokohodnotných betonů významně omezuje prostup vlhkosti i karbonataci, takže snížení trvanlivosti je jen minimální.

Autor této práce by chtěl problematiku vysokohodnotného betonu dále rozvíjet a objasnit skutečný stav za pomoci dlouhodobých zkoušek. Experimenty by měly být zaměřeny hlavně na rychlost šíření karbonatace ve vysokohodnotných betonech s různou hodnotou vodního součinitele. Dále by měl být objasněn dopad různých velikostí náhrad cementu mikrosilikou na skutečnou hodnotu pH, a to vše v podmínkách České republiky.

10. Literatura

- [1] Šafrata, J.: Modul pružnosti a kamenivo, Stachema 2011, Skalský dvůr, 2011.
- [2] Collepardi, M.: The New Concrete, Treviso: Grafiche Tintoretto, 2006, p. 436.
- [3] Ichikawa, T.: Alkali–silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect, *Cement and Concrete Research*, volume 39, p. 716–726, 2009.
- [4] Pertold, Z.; Šachlová, Š.; Šťastná, A.; Bílek, V. ml.; Krutilová, K.; Bílek, V. st.; Topolář, L.: Alkalicko-křemičitá reakce v České republice a možnosti její eliminace, *Beton TKS*, pp. 34-41, 2/2014.
- [5] Seidlová, Z.: Experimentální výzkum alkalicko-křemičité reaktivnosti vulkanických hornin, Praha: Karlova univerzita, Přírodovědecká fakulta, 2010.
- [6] Šauman, Z.: Maltoviny I, Brno: Vysoké učení technické, 1993, p. 198.
- [7] ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [8] Cajz, V.; Valečka, J.; Rapprich, V.: Geologické lokality, Česká geologická služba, 1993. [Online]. Available: <http://lokality.geology.cz/>.
- [9] Ařtcin, P. C.: High-performance concrete, sv. 1, New York: Spon Press, 1998, p. 591.
- [10] Maso, J. C.: Influence of the interfacial transition zone on composite mechanical properties, *Interfacial Transition Zone in Concrete*, pp. 103-106, 1996.
- [11] Bentur, K. L.; Alexander, M. G.: A review of the work of the RILEM TC 159-ETC: Engineering of the interfacial transition zone in cementitious composites, *Materials and Structures*, volume 33, pp. 82-87, 2000.
- [12] Cwizern, A.; Penttala, V.: Aggregate-cement paste transition zone properties affecting the salt-frost damage of high-performance concretes, *Cement and Concrete Research*, volume 35, pp. 671-679, 2005.
- [13] Stavební stroje, [Online]. Available: http://tstsw.cz/stavebni_stroj/predmet-bw03/prednaska-4#%C4%8Delis%C5%A5ov%C3%A9-drti%C4%8De. [Přístup získán 28.3.2020].
- [14] Třidičky, [Online]. Available: <http://tridicky.cz/kamenivo.html>. [Přístup získán 28.3.2020].
- [15] Pytlík, P.: Technologie betonu, 2 vyd., Brno: VUT v Brně, 2000.

-
- ~ 137 ~

-
- [30] Vítek, L. J.; Kolísko, J.; Coufal, R.; Huňka, P.; Števula, M.: Modul pružnosti, Praha: Česká betonářská společnost, 2016.
- [31] ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [32] Fládr, J.; Bílý, P.; Chylík, R.; Trtík, T. Hrbek, V.: The influence of washing of crushed aggregate on mechanical properties of high-performance concrete containing supplementary cementitious materials, v 26. *Betonářské dny 2019*, Praha, 2019.
- [33] Českomoravský cement, [Online]. Available: www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement. [Přístup získán 4.4.2020].
- [34] ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [35] Veselý, V.: Přísady a příměsi, *Beton TKS*, 2/2015, 2/2015.
- [36] Duan, P.; Shui, Z.; Chen, W.; Chunhua, S.: Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete., *Construction and Building Materials*, volume 44, pp. 1-6, 2013.
- [37] Ťažký, M.; Hela, R.; Ťažký, T.: Vývoj konstrukčních betonů s elektrárenskými popílky, *Beton TKS*, pp. 38-41, 2/2015.
- [38] Thomas, M. A.; Shehata, M. H.; Shashiprakash, S. G.; Hopkins, D. S.; Cail, K.: Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete, *Cement and Concrete Research*, volume 29, pp. 1207-1214, 1999.
- [39] Ambily, P. S.; Umarani, C.; Ravisankar, K.: Studies on ultra high performance concrete incorporating copper slag as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, volume 77, pp. 233-240, 2015.
- [40] Šiler, P.: Studium vlivu chemických modifikujících přísad a příměsí na vlastnosti, v *Disertační práce na VUT v Brně, Fakulta chemická*, Brno, 2009.
- [41] Snelson, D. G.; Wild, S.; O'Farrell, M.: Heat of hydration of Portland Cement–Metakaolin–Fly ash, *Cement and Concrete Research*, volume 38, pp. 832-840, 2008.
- [42] Dittrich, S.; Neubauer, J.; Goetz-Neunhoeffler, F.: The influence of fly ash on the hydration of OPC within the first 44 h – A quantitative in situ XRD and heat flow calorimetry study, *Cement and Concrete Research*, volume 56, pp. 129-138, 2014.
- [43] Hela, R.: Příměsi do betonu, *Beton TKS*, pp. 4-10, 2/2015.
- [44] Alaa, M. R.: Metakaolin as cementitious material, *Construction and Building Materials*, volume 41, pp. 303-310, 2013.
- [45] Taфраoui, A.; Escadeillas, G.; Lebailli, S.; Vidal, T.: Metakaolin in the formulation of UHPC, *Construction and Building Materials*, volume 23, pp. 669-674, 2009.
-

-
- [46] Antoni, M.; Rossen, J.; Martirena, F.; Scrivener, K.: Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone, *Cement and Concrete Research*, volume 42, pp. 1579-1589, 2012.
- [47] Fojtík, T.: *Ověření možnosti zvýšení trvanlivosti některých druhů betonů aplikací odpadních surovin a příměsí s pucolánovými vlastnostmi*, Disertační práce na VUT FAST Brno, 2005.
- [48] Esfandiari, J.; Loghmani, P.: Effect of perlite powder and silica fume on the compressive strength and microstructural characterization of self-compacting concrete with lime-cement binder, *Measurement*, č. 147, 2019.
- [49] Richard, R.; Cheyrezy, M.: Composition of reactive powder concretes, *Cement and Concrete Research*, volume 25, pp. 264-277, 2006.
- [50] Terzijski, I.: Technologické aspekty vývoje a aplikace vysokohodnotného betonu v podmínkách České republiky - část I. úvod a složky vysokopevnostního betonu, *Beton TKS*, pp. 54-63, 1/2011.
- [51] ASTM C618-19, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, Filadelfia: ASTM, 2019.
- [52] Škvára, F.; Kopecký, L.; Šmilauer, V.; Bittnar, Z.: Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash, *Journal of Hazardous Materials*, volume 168, č. 2-3, pp. 711-720, 2009.
- [53] Šiler, P.; Krátký, J.; Kolářová, I.: Calorimetric determination of the effect of additives on cement hydration process, *Chemical Papers*, volume 67, pp. 213-220, 2013.
- [54] Šiler, P.; Krátký, J.; de Belie, N.: Isothermal and solution calorimetry to assess the effect of superplasticizers and mineral admixtures on cement hydration, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, volume 107, pp. 312-320, 2012.
- [55] Page, C. L.; Vennesland, Ø.: Pore solution composition and chloride binding capacity of silica-fume cement pastes, *Materials and Structures: Research and Testing*, volume 16, pp. 19-25, 1983.
- [56] Muralidharan, S.; Parande, A. K.; Saraswathy, V.; Kumar, K.; Palaniswamy, N.: Effect of silica fume on the corrosion performance of reinforcements in concrete, *Zaštita materijala*, volume 49, pp. 3-8, 2008.
- [57] ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [58] Xiaoying, X.; Xujian, L.; Xiaoxin, P.; Tao, J.; Yongning, L.; Hongru, Z.: Influence of silica fume on the setting time and mechanical properties of a new magnesium phosphate cement, *Construction and Building Materials*, volume 235, 2020.
- [59] Yaseri, S.; Hajiaghaei, G.; Mohammadi, F.; Mahdikhani, M.; Farokhzad, R.: The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary
-

- binder based geopolymer paste, *Construction and Building Materials*, volume 157, pp. 534-545, 2015.
- [60] Kokeš, R.: Technologické, reologické a mechanické vlastnosti cementových kompozitů určených pro solidifikaci kapalného radioaktivního odpadu, Praha: Bakalářská práce, 2019.
- [61] ČSN EN 196-3 Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [62] ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [63] Bažant, Z. P.; Baweja, S.: Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3, 2000. [Online]. Available: <http://cee.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/S39.pdf>. [Přístup získán 14.4.2020].
- [64] Zongjin, L.: Advanced concrete technology, New Jarsey: John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [65] Ahmad, S.; Mohaisen, O. K.; Adekunle, S. K.; Al-Dulaijan, U. S.; Maslehuddin, M.: Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures, *Construction and Building Materials*, volume 198, pp. 437-444, 2019.
- [66] Abdollahnejad, Z.; Mastali, M.; Woof, B.; Illikainen, M.: High strength fiber reinforced one-part alkali activated slag/fly ash binders with ceramic aggregates: Microscopic analysis, mechanical properties, drying shrinkage, and freeze-thaw resistance, *Construction and Building Materials*, volume 241, 2020.
- [67] Vích, M.; Fládr, J.: Influence of concrete additives on cement paste shrinkage, v *Fibre Concrete 2019. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2019. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Prague, 2019.
- [68] Nežerka, V.; Bílý, P.; Fládr, J.; Hrbek, V.: Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of ITZ in concrete, *Cement and Concrete Composites*, volume 103, pp. 252-262, 2019.
- [69] Terzijski, I.: Technologické aspekty vývoje a aplikace vysokopevnostního betonu v podmínkách České republiky – část II. Vlastnosti vysokopevnostního betonu a jejich zkoušení, *Beton TKS*, pp. 44-53, 4/2011.
- [70] Lahlou, K.; Aïtcin, P. C.; Chaallal, O.: Behaviour of high-strength concrete under confined stresses, *Cement and Concrete Composites*, volume 14, pp. 185-193, 1992.
- [71] Ouedraogo, E.; Malecot, Y.; Missemer, L.; Clergue, C.; Rogat, D.: Influence of the nature of the synthetic incorporated fibres in UHPFRC when subjected to fire conditions, v *International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, Marseille, Francie, 2013.

-
- [72] Krátký, J.; Trtík, K.; Vodička, J.: Drátkobetonové konstrukce, Praha: Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků, 1999.
- [73] Orgass, M.; Klug, Y.: Fibre reinforced ultra-high strength concrete, v *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, Kassel, Germany, 2004.
- [74] Mansur, M. A.; Chin, M. S.; Wee, T. H.: Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 11, č. 1, pp. 21-29, 1999.
- [75] Pujadas, P.; Blanco, A.; Cavalaro, S. H. P.; de la Fuente, A.; Aguado, A.: Multidirectional double punch test to assess the post-cracking behaviour and fibre orientation of FRC, *Construction and Building Materials*, volume 58, pp. 214-224, 2014.
- [76] Pujadas, P.; Blanco, A.; Cavalaro, S. H. P.; de la Fuente, A.; Aguado, A.: Fibre distribution in macro-plastic fibre reinforced concrete slab-panels, *Construction and Building Materials*, volume 64, pp. 496-503, 2014.
- [77] Stähli, P.; Custer, R.; van Mier, J. G. M.: On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC, *Materials and Structures*, volume 41, č. 1, pp. 189-196, 2008.
- [78] Zerbino, R.; Tobes, J. M.; Bosseio, M. E.; Giaccio, G.: On the orientation of fibres in structural members fabricated with selfcompacting fibre reinforced concrete, *Cement & Concrete Composite*, volume 34, pp. 191-200, 2012.
- [79] Wijffels, M. J. H.; Wolfs, R. J. M.; Suiker, A. S. J.; Salet, T. A. M.: Magnetic orientation of steel fibres in self-compacting concrete beams: Effect on failure behaviour, *Cement and Concrete Composites*, volume 80, pp. 342-355, 2017.
- [80] Mu, R.; Li, H.; Qing, L.; Lin, J.; Zhao, Q.: Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field, *Construction and Building Materials*, volume 131, pp. 309-316, 2017.
- [81] Ferrara, L.; Meda, A.: Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements, *Materials and Structures*, volume 39, pp. 411-420, 2006.
- [82] Ferrara, L.; Bamonte, P.; Caverzan, A.; Musa, A.; Sanal, I.: A comprehensive methodology to test the performance of steel fibre reinforced self-compacting concrete (SFR-SCC), *Construction and Building Materials*, volume 37, pp. 406-424, 2012.
- [83] Vitek, J. L.; Smiřinský, S.; Veselý, P.; Veselý, V.: Variation of steel-fiber reinforced concrete parameters depending on the mixing procedure, v *Fibre Concrete 2013 Proceedings*, Prague, Czech Republic, 2013.
- [84] Vodička, J.; Hobst, L.; Šeps, K.: Způsob zkoušení homogenity drátkobetonu na hotových drátkobetonových konstrukcích. Česká republika, Patent číslo 304173, Udělen 23.10.2013.
-

- [85] Ponikiewski, T.; Katzer, J.; Bugdol, M.; Rudzki, M.: X-ray computed tomography harnessed to determine 3D spacing of steel fibers in self compacting concrete (SCC) slabs, *Construction and Building Materials*, volume 74, pp. 102-108, 2015.
- [86] Fládr, J.; Bílý, P.; Broukalová, I.: Evaluation of steel fiber distribution in concrete by computer aided image analysis, *Composite Materials and Engineering*, volume 1, č. 1, pp. 49-70, 2019.
- [87] Burcu, A.; Tasdemir, M. A.; Mechanical behaviour and fiber dispersion of hybrid steel fiber reinforced self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, volume 28, pp. 287-293, 2012.
- [88] Sebaibi, N.; Benzerzour, M.; Abriak, N. E.: Influence of the distribution and orientation of fibers in a reinforced concrete with waste fibers and powders, *Computers and Concrete*, volume 5, č. 11, pp. 365-382, 2014.
- [89] Fládr, J.; Vodička, J.; Kohoutková, A.; Broukalová, I.: Drátkobeton ultravysokých pevností. Česká republika, Patent číslo 304478, Udělen 17.12.2012.
- [90] ČSN EN 1990 ed. 2 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [91] Fládr, J.; Bílý, P.; Kohoutková, A.: Způsob homogenizace vysokohodnotného nebo ultra-vysokohodnotného betonu. Česká republika, Patent číslo 307462, Udělen 24.1.2017.
- [92] ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [93] Schwing - Stetter, [Online]. Available: [http://www.cmcgulf.com/public/uploads/downloads/Pan and Twin Shaft Mixers.pdf](http://www.cmcgulf.com/public/uploads/downloads/Pan_and_Twin_Shaft_Mixers.pdf). [Přístup získán 21.4.2020].
- [94] Planetové míchačky Eurostar, [Online]. Available: <http://www.ivar.cz/Technologie/Michacka%201.htm>. [Přístup získán 21.4.2020].
- [95] BFT International, [Online]. Available: https://www.bft-international.com/imgs/tok_00c0cd09ce4c12c99f8860323203ecca/w300_h200_x400_y266_103954853_a014f414fb.jpg. [Přístup získán 21.4.2020].
- [96] Fládr, J.; Bílý, P.; Kohoutková, A.: Method of homogenization of high-performance or ultra-high-performance concrete. Evropský patent, Patent číslo 3351518, Udělen 3.7.2019.
- [97] Fládr, J.; Bílý, P.; Šeps, K.; Chylík, R.; Hrbek, V.: The effect of homogenization procedure on mechanical properties of high-performance concrete with partial replacement of cement by supplementary cementitious materials, *Solid State Phenomena*, volume 292, pp. 102-107, 2019.
- [98] Fládr, J.: Řízení materiálových vlastností UHPC, Praha: Disertační práce, 2015.

-
- [99] Fládr, J.; Šmilauer, V: Vyhodnocení receptur UHPFRC s rozdílným způsobem vyztužení, Praha: Výzkumná zpráva, 2018.
- [100] TNI CEN/TR 16949 (737001) A Silniční záchytné systémy - Záchytné systémy pro chodce - Mostní zábradlí, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [101] ČSN EN 1015-3 Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku), Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000.
- [102] Šmilauer, V.; Havlásek, P.; Fládr, J.; Tichý, J.; Slanský, B.; Ševčík, S.: Dynamická zkouška zábradelního panelu z UHPC, 25. *betonářské dny*. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2018.
- [103] Šíkola, P.; Černoch, J.; Lajda, Š.: *Cyklopointy Chocenice, architektonická studie*, Architektonická kancelář Domy jinak, 2013.
- [104] Fládr, J.; Kohoutková, A.; Broukalová, I.; Vodička, J.: Prefabrikovaný dílec z vysokohodnotného betonu, *Ověřená technologie*, č. TE01020168-001/2013, 2013.
- [105] Fládr, J.; Chylík, R.; Šeps, K.; Trtík, T.; Štoller, J.: Odolnost sendvičových betonových desek proti výbuchu, *Beton TKS*, pp. 56-60, 2/2020.
- [106] Coughlin, A. M.; Musselman, E. S.; Schokker, A. J.; Linzell, D. G.: Behavior of portable fiber reinforced concrete vehicle barriers subject to blasts from contact charges, *International Journal of Impact Engineering*, volume 37, pp. 521-529, May 2010.
- [107] ČSN EN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [108] Štefan, R.; Foglar, M.: *SVDult – Software for visualisation of data from ultrasound measurements of concrete samples*, Praha: Stavební fakulta, ČVUT v Praze, 2015.
- [109] Zhao, D.; Xie, K.; iMechanica web of mechanics and mechanicians, Texas A&M University, College Station, USA, [Online]. Available: <https://imechanica.org/node/5048>. [Přístup získán 6.5.2020].

11. Seznam použitých zkratk

ASR	alkalicko-křemičitá reakce (anglicky alkali-silica reaction)
SiO ₂	oxid křemičitý
ITZ	interakční tranzitní zóna
LD CSH	hydrát křemičitanu vápenatého s nízkou hustotou
HD CSH	hydrát křemičitanu vápenatého s vysokou hustotou
CH	hydroxid vápenatý Ca(OH) ₂
AFm	sloučenina Al ₂ O ₃ s Fe ₂ O ₃ s jedním molem CaSO ₄
C ₃ S	trikalciumsilikát – alit, 3CaO.SiO ₂
C ₂ S	dikalciumsilikát – belit, 2CaO.SiO ₂
C ₃ A	trikalciumaluminát – celit, 3CaO.Al ₂ O ₃
C ₄ AF	tetrakalciumaluminátferit – brownmillerit, 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃
UHPC	ultra-vysokohodnotný beton
HPC	vysokohodnotný beton
<i>D_{max}</i>	maximální velikost zrna kameniva udávaná v milimetrech
PVA	polyvinyl alkohol
PP	polypropylén
SCC	samozhutnitelný beton (anglicky self-compacting concrete)