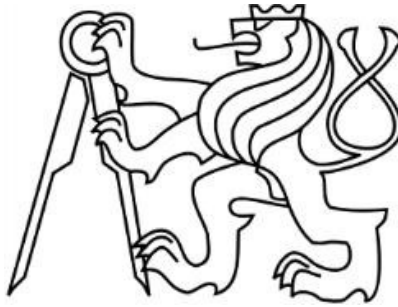


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2018

ZDENĚK HLAVSA

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí

Úbytek záměsové vody v čerstvém betonu během dopravy na stavbu

Bakalářská práce

Vypracoval: Zdeněk Hlavsa
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Bílý, Ph.D.
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Praha 2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hlavsa	Jméno: Zdeněk	Osobní číslo: 438099
Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Úbytek záměsové vody v čerstvém betonu během dopravy na stavbu	
Název bakalářské práce anglicky: Decrease of mixing water content in fresh concrete during transport to construction site	
Pokyny pro vypracování: Složení betonu a vliv vodního součinitele na jeho konečné vlastnosti Zkušební metody pro měření obsahu vody v čerstvém betonu Experiment pro zjištění obsahu vody v betonu v závislosti na době po ukončení hlavního míchacího cyklu	
Seznam doporučené literatury: Pytlík - Technologie betonu, VUTIUM 2000 Colleparidi - Moderní beton, ČKAIT 2009 Archiv časopisu BETON TKS Samostatně vyhledejte další vhodnou literaturu	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Petr Bílý, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 23.2.2018	Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2017 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s využitím poskytnutých odborných konzultací. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Jsem si vědom toho, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č. 81/2005 Sb. (autorský zákon).

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Ústřední knihovně Fakulty stavební a Fakulty architektury ČVUT.

V Praze dne

.....

Zdeněk Hlavsa

Poděkování

Na prvním místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Petru Bílému, Ph.D. za cenné připomínky a trpělivost při konzultacích. Dále bych poděkoval panu Ing. Vladimíru Veselému a panu Ing. Stanislavovi Smiřinskému za poskytnutí zajímavého tématu a možnost provádět experiment v akreditované zkušební laboratoři společnosti BETOTECH, s.r.o. V poslední řadě děkuji panu Luboši Proškovi a Viktoru Hirnerovi za pomoc při provádění experimentu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na odpařování vody z čerstvého betonu a problematiku vodního součinitele. V první části jsou uvedeny vlivy jednotlivých složek betonu na celkový obsah vody a hodnotu vodního součinitele. Dále jsou shrnuty poznatky z oblasti odpařování vody z čerstvého betonu a vliv okolního prostředí na jeho intenzitu. Hlavní částí práce je experiment, který přinese konkrétní hodnoty úbytku záměsové vody v čerstvém betonu během dopravy na stavbu a jeho vliv na pevnost v tlaku ztvrdlého betonu po 28 dnech.

Klíčová slova

Čerstvý beton, odpařování, celkový obsah vody, vodní součinitel, pevnost v tlaku, transportbeton.

Abstract

This bachelor diploma thesis is focused on evaporation of water from fresh concrete and water-to-cement ratio topic. Firstly, influences of concrete components on total water content and water-to-cement ratio are discussed. Then knowledge about evaporation of water from fresh concrete and influence of environmental conditions on its rate is summarized. The main topic of this thesis is an experiment which will bring results about the loss of mixing water from fresh concrete during transportation on the construction site and its influence on the compressive strength of hardened concrete after 28 days.

Key words

Fresh concrete, evaporation, total water content, water-to-cement ratio, compressive strength, ready-mixed concrete.

Obsah

1. Úvod	9
2. Složky betonové směsi	10
2.1. Kamenivo	10
2.1.1. Vliv velikosti a tvaru zrn, křivka zrnitosti	11
2.1.2. Vliv vlhkosti a nasákavosti	12
2.1.3. Shrnutí	13
2.2. Cement	14
2.3. Voda	16
2.3.1. Kritéria použití vody do betonu	17
2.3.2. Problematika vodního součinitele	17
2.3.3. Shrnutí	21
2.4. Příměsi	22
2.4.1. Popílek	23
2.4.2. Křemičité úlety, silika	24
2.4.3. Shrnutí	25
2.5. Přísady	25
3. Odpařování vody z čerstvého betonu	28
3.1. Vliv surovin na teplotu betonu a odpařování vody	32
3.2. Vliv okolního prostředí na odpařování vody	33
4. Použité metody zkoušení vzorků	37
4.1. Zkouška nasákavosti kameniva	37
4.2. Zkouška sednutí kužele	39
4.3. Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu	41
4.4. Stanovení obsahu vody v čerstvém betonu	42
4.5. Měření pevnosti v tlaku zkušebních těles	44
5. Experimentální část	46
5.1. Úvod	46
5.2. Složení betonové směsi	47
5.3. Použité přístroje při experimentech	50
5.4. Postup a popis experimentu	52
5.5. Výsledky experimentu	57
5.5.1. Nasákavost kameniva	58
5.5.2. Záměs NT	59
5.5.3. Záměs VT	60

5.5.4. Pokus BS.....	61
5.6. Porovnání výsledků a diskuze.....	62
5.6.1. Teploty vzduchu a betonu.....	62
5.6.2. Objemová hmotnost čerstvého betonu.....	63
5.6.3. Konzistence.....	64
5.6.4. Množství vody odpařené z čerstvého betonu.....	64
5.6.5. Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu.....	66
5.7. Shrnutí experimentu.....	67
6. Závěr.....	69
7. Literatura.....	71

1. Úvod

Od návrhu specifikace betonu projektantem, přes jeho výrobu a dodání dodavatelem betonu, až po jeho zpracování a zdárné provedení konstrukce stavbou se jedná dlouhý proces. V dnešní uspěchané a ekonomicky hnané době se může při tomto náročném procesu často něco zanedbat, pokazit anebo také ošidit. Jedním z těchto problémů je i dodatečné přidávání vody do autodomíchávače na stavbě, v zásadě za účelem zlepšení zpracovatelnosti betonu a jeho snazšího ukládání. Ačkoliv je tento zásah do složení betonu přísně zakázaný a může mít vážné následky na pevnost a trvanlivost betonu, na stavbách se to přesto děje velmi často.

Špatná zpracovatelnost při dodání na stavbu může mít řadu vysvětlení. Jedním z nich může být úbytek záměsové vody odpařením během dopravy na stavbu a tím pokles konzistence čerstvého betonu. V takovém případě by teoreticky bylo možné určité množství vody do mixu na stavbě přidat, aniž by to ovlivnilo vlastnosti ztvrdlého betonu, které jsou od hotové konstrukce požadovány.

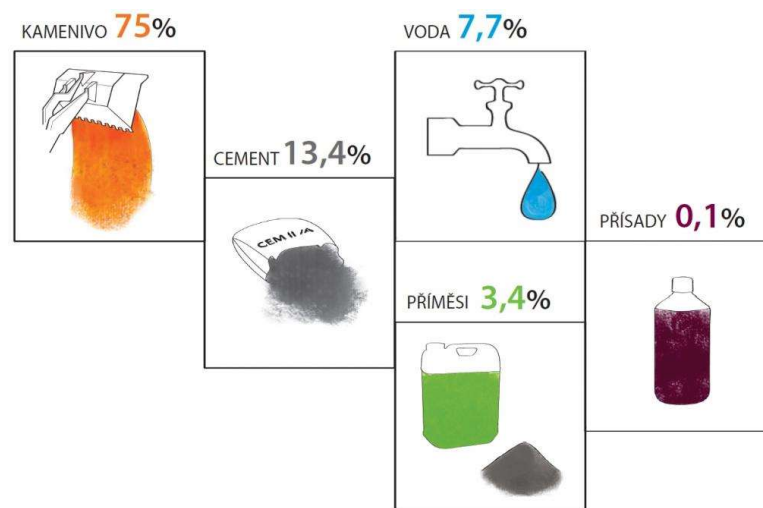
Tato práce si klade za cíl bližší zhodnocení úbytku záměsové vody v čerstvém betonu během dopravy na stavbu následkem vlivu odpařování. Jelikož se jedná o ne zcela probádanou fázi výroby a zpracování betonu, práce se v první věnuje problematice odpařování vody z čerstvého betonu obecně a shrnuje dosavadní poznatky v této oblasti. Úbytek vody v betonu má přímý vliv na hodnotu vodního součinitele, na kterém závisí téměř všechny vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. Proto bude vysvětlena problematika vodního součinitele a bude shrnuto, jak ho jednotlivé složky betonu mohou svými vlastnostmi ovlivnit.

V druhé části této práce pak bude prezentován praktický experiment, který si klade za cíl přispět, alespoň v malé míře, k poznání problematiky odpařování vody, a to zejména odpařování během dopravy na stavbu. Výsledkem experimentu jsou konkrétní změřené hodnoty úbytku vody a tudíž odhad přípustného množství vody, které by bylo možné na stavbě dodatečně přidat do autodomíchávače.

2. Složky betonové směsi

Tato kapitola bude věnována pěti hlavním složkám, které se v dnešní době používají pro výrobu betonové směsi. Obecně je tato kapitola sama o sobě velmi obsáhlá a dala by se tím popsat celá kniha, což je pro účely této práce zbytečné. Autor se tedy rozhodl, že se bude soustředit pouze na problematiku, která se týká tématu této bakalářské práce, tj. na otázky související s vodním součinitelem a zpracovatelností.

Základními složkami pro výrobu běžného betonu jsou kamenivo (= plnivo) a cementová matrice (= pojivo), která se skládá z cementu a vody. Spolu se základními složkami se v moderních betonech používají i složky doplňkové ve formě příměsí a chemických přísad, které slouží pro modifikaci nebo docílení konkrétních vlastností čerstvého, anebo ztvrdlého betonu a jelikož se na beton v dnešní době klade velké množství požadavků, použití doplňkových složek je už zcela běžné.



Obr. 1 Zastoupení jednotlivých složek v běžném betonu (zdroj: [1])

2.1. Kamenivo

Kamenivo zaujímá 75 až 80 % objemu betonu, a proto má významný vliv na objemovou stálost, pevnost, trvanlivost a díky několika vlastnostem i na celkový obsah vody, který má následně mimo výše zmíněné vliv i na pórovitost nebo zpracovatelnost betonu.

2.1.1. Vliv velikosti a tvaru zrn, křivka zrnitosti

Kamenivo je zrnitý, převážně přírodní a anorganický materiál, který se rozděluje do množin zvaných frakce podle velikosti zrn. Nejmenší možné zrno kameniva se uvažuje od 0,125 mm, největší do 125 mm. Obecně se ale dělí na drobné kamenivo neboli písek s velikostí zrn do 4 mm a hrubé kamenivo neboli štěrk (který vznikl přirozeným rozpadem horniny, je těžený z řek nebo v pískovnách a jehož zrna jsou oválná s hladkým povrchem vzniklým po transportu a zvětrání) či drť (která vzniká drcením lomového kamene a její zrna jsou nepravidelného tvaru s drsným povrchem) s velikostí zrn 4 – 125 mm.

Pro vytvoření kostry betonu s minimálním objemem mezer mezi zrny se používá v betonu jak drobného tak i hrubého kameniva. Mezery pak musí být vyplněny cementovou maticí. Pro získání maximální možné hutnosti (minimálního objemu mezer mezi jednotlivými zrny kameniva) a tím snížení pórovitosti výsledného ztvrdlého kompozitu je nutné se při návrhu zrnitosti směsi kameniva co nejvíce přiblížit k ideální křivce zrnitosti. V případě dosažení maximální hutnosti se používá Fullerova rovnice ideální křivky zrnitosti, ta ale neuvažuje zpracovatelnost, takže výsledkem je sice ideálně hutná směs kameniva s cementem, ale pohyblivost se zhutnitelností je velmi špatná. Tento problém řeší Bolomeyova rovnice, která upravuje ideální křivku zrnitosti v závislosti na požadované konzistenci a druhu hrubého kameniva (těžené/drcené). V obou případech do rovnic vstupuje jako hlavní parametr velikost maximálního zrna kameniva, který je výsledkem specifikace betonové směsi dané projektantem a vychází z nejmenšího rozměru betonové konstrukce, konstrukčních zásad ukládání výztuže a její krycí vrstvy. [2]

Právě velikost maximálního zrna kameniva a křivka zrnitosti také ovlivňují celkový obsah vody v betonové směsi, jelikož se snižující se velikostí zrn stoupá měrný povrch kameniva (povrch, který je nutno obalit cementovou maticí). Pokud je tedy v betonové směsi větší podíl písku než štěrku (nebo drti), je potřeba více cementu s vodou (cement pouze v případě, kdy chceme zachovat stejný vodní součinitel) k obalení všech zrn kameniva a dosažení požadované konzistence. Tento poznatek je výsledkem Lyseho práce z roku 1932 [3], která zároveň uvádí orientační dávku vody v závislosti na požadované konzistenci a použité velikosti maximálního zrna kameniva. Collepardi převzaté hodnoty prezentuje takto:

Tab. 1 Dávka záměsové vody v závislosti na požadované konzistenci a velikosti maximálního zrna kameniva podle Lyseho pravidla (převzato z: [2])

Max. zrno [mm]	Dávka vody podle stupňů konzistence [kg/m ³]				
	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230
25	175	190	210	215	225
32	165	180	200	210	220
63	140	155	175	185	190
125	125	140	155	165	170
160	120	135	150	160	165

Hodnoty dávky vody jsou orientační a vztahují se pouze na betonové směsi s vodním součinitelem v rozmezí 0,4 – 0,8, ze kterých vycházejí výsledky Lyseho práce (obecně ale musíme brát v úvahu i množství cementu, které má na konzistenci také vliv).

Zpracovatelnost ovlivňuje mimo zvolenou křivku zrnitosti kameniva i druh hrubého kameniva (těženého/drceného). Nepravidelný a drsný povrch drceného kameniva zvyšuje tření mezi jednotlivými zrny a tím klesá zpracovatelnost betonové směsi, z toho vychází potřeba větší dávky záměsové vody k udržení stejné konzistence. Naopak u těženého kameniva s oblým povrchem je potřeba záměsové vody méně. V poslední řadě je nutné se zmínit, že zpracovatelnost stoupá i v případě použití vyššího podílu drobného kameniva nad hrubým, protože směs jemnějších zrn se rozpohybuje snáze než směs zrn hrubších. To je důvod proč zrnitosti kameniva stanovené podle Bolemye mají vyšší podíl písku než v případě stanovení podle Fullera. [2]

2.1.2. Vliv vlhkosti a nasákavosti

Druhým a zároveň jedním z nejdůležitějších faktorů, který ovlivňuje obsah vody v betonové směsi a tím následně i zpracovatelnost, pevnost a trvanlivost – je vlhkost kameniva. Hodnota vlhkosti w je vyjádřena procentuálně jako hmotnost vody ve zkušební navážce po jejím vysušení v sušárně při teplotě 110 ± 5 °C do ustálení hmotnosti. [4]

Kamenivo se může vyskytovat ve čtyřech různých stavech vlhkosti:

- absolutně suché kamenivo, vysušené v sušárně při 110 °C;
- přirozeně suché, na vzduchu vysušené;

-
- nasycené vodou, ale povrchově suché;
 - vlhké až mokré.

Stav, kde je kamenivo nasycené (všechny otevřené vnitřní póry jsou zaplněné vodou) a povrchově suché, se bere jako nulový bod ($w = w_0$). Jedná se o stav, ve kterém se kamenivo nachází krátce po namíchání betonové směsi a zároveň se z něj určuje objemová hmotnost a míra nasákavosti kameniva (o tom podrobnější popis dále). Jestliže se tedy kamenivo nachází ve stavu vlhkosti absolutně suchém ($w = 0$) nebo přirozeně suchém ($w < w_0$), pak voda po namíchání betonové směsi ubyde, jelikož zaplní všechny zbylé prázdné póry (vsákne se do kameniva). Zatímco pokud se kamenivo nachází ve stavu mokřím ($w > w_0$), pak celkový obsah vody v záměsi stoupne. S tímto faktorem se neustále musí počítat a dávka záměsově vody musí být upravována v závislosti na vlhkosti kameniva, která by v průmyslových betonárnách měla být měřena minimálně jedenkrát denně. První dva stavy se v betonárnách nevyskytují vůbec, stav při nasycení vodou ojedinele, záleží na způsobu skladování kameniva a počasí. Nejčastěji se setkáme s variantou vlhká až mokrá, kdy se následně musí dávka vody snížit, aby bylo dosaženo předepsaných vlastností betonu. Zároveň musí být kontrolována nasákavost kameniva a to obzvláště pokud se mění podmínky v lomu nebo pískovně (např. při změně dodávané suroviny). V případě, kdy by se vlhkost kameniva neměřila a dávka vody neupravovala, mohlo by dojít ke změnám vlastností betonu, hlavně pevnosti v tlaku, vodního součinitele, nebo zpracovatelnosti. [2]

2.1.3. Shrnutí

Vliv kameniva na dávku záměsově vody a vodní součinitel shrneme do několika bodů:

- velikost maximálního zrna kameniva má vliv na zrnitost směsi kameniva, která ovlivňuje dávku vody, zpracovatelnost a vodní součinitel;
- pro zlepšení zpracovatelnosti můžeme použít Bolemeyovu ideální křivku zrnitosti s vyšším podílem drobné frakce kameniva, ale za cenu větší potřeby vody (a cementu);
- vlhkost a nasákavost kameniva má zásadní vliv na dávkování záměsově vody a musí být v častých intervalech kontrolována.

2.2. Cement

Zatímco kamenivo plní funkci plniva, cement s vodou vytváří tmel, který jednotlivá zrna spojuje a dohromady tak vytváří kompozitní materiál se stálou pevností (i ve vodě). Jedná se o hydraulické pojivo, jemně mletou anorganickou látku, ze které se po smíchání s vodou stane plastická, snadno zpracovatelná hmota a postupně se přemění díky chemickým reakcím vápenatých silikátů a aluminátů (tzv. hydrataci cementu), vyvolávající tuhnutí a následně tvrdnutí, na pevný a mechanicky odolný materiál podobný hornině. Definicí, složením a specifikací se zabývá norma ČSN EN 197-1 [5].

Hlavní složkou cementu je portlandský slínek, který vzniká vypálením směsi vápenatých, jílovitých a někdy i dalších vedlejších surovin při teplotě na mezi slinutí (cca 1450 °C). Vypálená směs se následně mele za přítomnosti sádrovce (regulátoru tuhnutí) a popřípadě, podle výsledného druhu cementu, i s dalšími příměsemi (jedná se např. o pucolán, strusku, popílek aj.). Vzniká šedivý prášek, v základním složení tzv. portlandský cement.

Cement přímo ovlivňuje pevnost ztvrdlého betonu a to jak jeho třídou normalizované pevnosti (vaznosti), která je ovlivněna chemickým složením a jemností mletí, tak i jeho množstvím, které vstupuje ve formě hmotnosti spolu s vodou do hodnoty vodního součinitele. Pro nás hlavním zajímavým parametrem bude jemnost mletí, která ovlivňuje zpracovatelnost, celkový obsah vody i intenzitu vypařování vody z čerstvého betonu.

Jemnost mletí cementu je vyjádřena měrných povrchem, který souvisí s velikostí částic, pohybující se v rozsahu 1 – 250 μm, a zrnitostí. Stanovuje se podle normy ČSN EN 196-6, která uvádí prosévací metodu, permeabilní metodu dle Blaina a prosévací metodu proudem vzduchu. Minimální požadovaná hodnota jemnosti mletí je 225 m².kg⁻¹ a maximální doporučená 600 m².kg⁻¹. Běžné cementy se ale pohybují mezi 250 – 400 m².kg⁻¹. Stejně jako u kameniva, čím větší je měrný povrch cementu, tím větší množství vody je potřeba ke smočení všech zrn. Zároveň cement rychleji a úplněji hydratuje – v cementové matici zůstává menší podíl velkých nezhydratovaných zrn. To má na jednu stranu pozitivní efekt na rychlejší nárůst pevnosti a její konečnou hodnotu. Na stranu druhou se posunem počátku tuhnutí zkrátí doba zpracovatelnosti, což se musí v případě potřeby vykompenzovat zvýšením vodního součinitele nebo v případě nutnosti jeho zachování větší dávkou plastifikátorů. Také stoupne vývin hydratačního tepla,

keré má za následek vyšší teplotu čerstvého betonu, intenzivnější vypařování vody (jak během dopravy tak i při ošetřování) a tím i větší smrštění. [6]

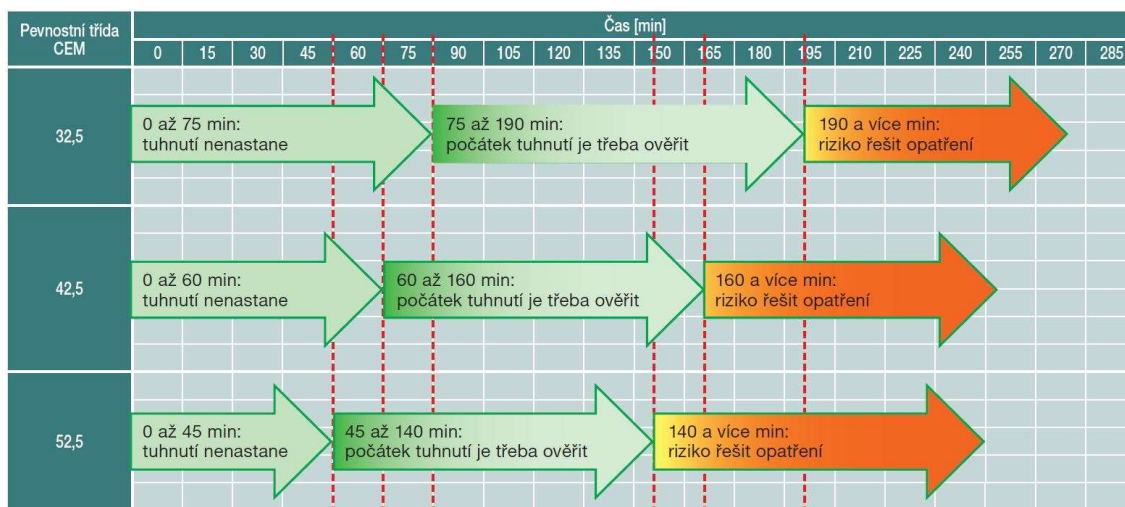
V Tab. 2 jsou uvedeny orientační hodnoty vývoje tepla, hydratační teplo totiž závisí mimo jemnosti mletí také i na obsahu slínku v cementu, čím je jeho podíl vyšší, stoupá i obsah reaktivních oxidů a tím se urychluje proces hydratace probíhající za většího vývinu hydratačního tepla. Největší obsah slínku má portlandský cement (95 – 100 %).

Tab. 2 Vývoj hydratačního tepla cementů (převzato z: [6])

Hydratační teplo při 20 °C (orientační hodnoty) [kJ.kg ⁻¹]					
Pevnostní třída	Vývoj pevnosti a tepla	1 den	3 dny	7 dní	28 dní
32,5	Pomalý	60 – 175	125 – 250	150 – 300	200 – 375
32,5 R; 42,5	Normální	125 – 200	200 – 335	275 – 375	300 – 425
42,5 R; 52,5, 52,5 R	Rychlý	200 – 275	300 – 350	325 – 375	375 – 425

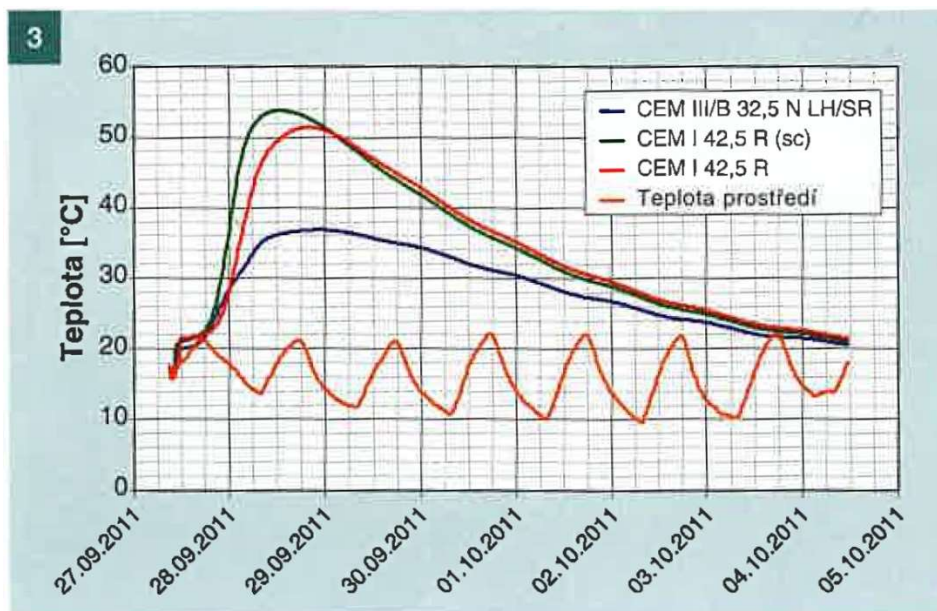
Cementy s nízkým hydratačním teplem pro masivní betonové konstrukce mají mít hydratační teplo za 7 dní nejvýše 270 kJ.kg⁻¹.

V tabulce 3 normy ČSN EN 197-1 jsou definovány požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti pro jednotlivé pevnostní třídy cementu, mimo jiné i minimální čas, ve kterém může započít jeho tuhnutí. Pro cement pevnostní třídy 32,5 je počátek tuhnutí ≥ 75 minut, pro 42,5 ≥ 60 min. a pro 52,5 ≥ 45 min. [5]. Na obr. 2 je znázorněno orientační porovnání doby, která je teoreticky za běžných teplotních podmínek a bez speciálních opatření k dispozici pro celý proces výroby, přepravy a zpracování čerstvého betonu.



Obr. 2 Doba pro zpracování betonu v závislosti na počátku tuhnutí cementu (zdroj: [7])

Na obr. 3 je pak vidět vývoj teploty betonového prvku v závislosti na použitém cementu, předmětem měření byla v tomto případě deska tloušťky 1 m, tedy masivní konstrukce, které jsou na vývin hydratačního tepla obzvláště náchylné. Důvodem je vysoký teplotní gradient mezi povrchem a středem konstrukce a tím zvýšené napětí od objemových změn při chladnutí konstrukce.



Obr. 3 Vývoj teploty betonovaného prvku v závislosti na použitém cementu (zdroj: [8])

2.3. Voda

Alfa a omega při návrhu betonové směsi a poslední ze tří hlavních složek při výrobě betonu. Bez smíchání vody s cementem by se totiž nespustily hydratační procesy a nedošlo by k náběhu mechanických vlastností betonu a jeho přeměny z tekuté do pevné formy.

Voda v zásadě plní dvě funkce:

- hydratační; která podmiňuje hydrataci cementu a vytváří s ním tuhous cementovou maticí s póry, potřeba vody na hydrataci cementu je minimálně 23 – 25 % hmotnosti cementu;
- reologickou; která umožňuje ve spojení s ostatními složkami vytvoření plastického a tvárného čerstvého betonu.

Dále se dá rozdělit z pohledu technologie provádění na vodu záměsovu (dávkovanou při výrobě čerstvého betonu) a na ošetřovací (voda použitá při udržování vlhkého stavu betonu, aplikována většinou od zatuhnutí betonu po dobu několika dní). [6]

2.3.1. Kritéria použití vody do betonu

Oba technologické druhy vody musí splňovat kvalitativní požadavky, které ukládá norma ČSN EN 1008 [9]. Jakost záměsové vody použité při výrobě betonu může ovlivnit dobu tuhnutí, vývoj pevnosti nebo ochranu výztuže proti korozi. Vhodnost vody pro výrobu betonu je všeobecně závislá na jejím původu. Norma uvádí následující typy vod:

- pitná voda; vhodná pro použití do betonu bez jejího zkoušení;
- recyklovaná voda; využívaná zejména při výrobě transportbetonu v uzavřeném technologickém cyklu betonárny denně se musí měřit její objemová hmotnost (přijatelná do 1010 kg.m^{-3} , voda s vyšší hodnotou obsahuje větší podíl cementového kalu, který je nutné nechat déle sedimentovat), chemické složení se během provozu testuje jednou měsíčně (viz příloha A normy), recyklovaná voda běžně vyhovuje pro použití do betonu;
- podzemní, povrchová a průmyslová voda; před jejím použitím je nutno jí vyzkoušet, obecně jí ale lze použít do betonu;
- mořská voda; použitelná pro prostý beton, nevhodná pro železový a předpjatý beton z důvodu velkého obsahu chloridů;
- splašková voda; pro výrobu betonu nepoužitelná.

Voda pro použití do betonu musí vyhovovat následujícím požadavkům:

- úvodní posouzení záměsové vody; jedná se o obsah olejů a tuků, detergentů, rozptýlených a humusovitých látek, dále se posuzuje barva se zápačem a měří pH (požadavky a zkušební metody jsou uvedeny v tabulce 1 normy);
- chemické vlastnosti; obsah chloridů, síranů, alkálií a škodlivého znečištění cukry, fosfáty, dusičnany, olovem a zinkem;
- doba tuhnutí a pevnost; začátek a konec doby tuhnutí cementové kaše připravené se zkoušenou vodou se nesmí lišit o více než 25 % od počátku a konce doby tuhnutí zjištěné na cementové kaši připravené s destilovanou nebo deionizovanou vodou, zároveň počátek tuhnutí nesmí být kratší než 1 hodina a konec tuhnutí delší než 12 hodin.

2.3.2. Problematika vodního součinitele

Norma ČSN EN 206+A1 [10] definuje dva pojmy, co se týče obsahu vody v čerstvém betonu:

-
- celkový obsah vody; jedná se o dávkovanou vodu při výrobě čerstvého betonu, vodu obsaženou v kameninu i na povrchu zrn kameniva, vodu obsaženou v přísadách i příměsích přidávaných ve formě suspenze, ale i vodu z přidávaného ledu při chlazení či při ohřívání betonu parou;
 - účinný obsah vody; rozdíl mezi celkovým obsahem vody přítomným v čerstvém betonu a vodou nasáknutou kamenivem.

Hodnota vodního součinitele je vyjádřena poměrem účinného obsahu vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu a ovlivňuje téměř všechny vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Počínaje zpracovatelností při dopravě a ukládání, vysycháním, které je příčinou rozhodující části smrštění a dotvarování betonu, přes obsah pórů ve ztvrdlém betonu, ve kterých se může držet zbytková voda a ovlivnit tak odolnost proti okolnímu prostředí (v důsledku rozpouštění agresivních látek a jejich přenosu v konstrukci), mrazuvzdornost (zmrznutím vody v pórech a porušením konstrukce vnitřním napětím od expandujících krystalků ledu) nebo požární odolnost (kdy se voda v pórech za vysokých teplot začne vypařovat a dojde k odstřelování kusů betonu vlivem unikající vodní páry), až po výslednou pevnost v tlaku. Těchto několik příkladů znázorňuje, jak široký dopad má vodní součinitel na vlastnosti betonu a kolik inženýrských problémů se musí vyřešit pro zdárné provedení a fungování konečné konstrukce. [11]

V inženýrské praxi platí, že pevnost betonu v tlaku je závislá při daném stáří, dané teplotě se správným způsobem ošetřování a daným cementem pouze na dvou faktorech: vodním součiniteli a stupni zhutnění (který ovlivňuje obsah vzduchu v betonu)*. Pokud je beton plně zhutněn, v tomto případě to znamená, že obsah vzduchu ve ztvrdlém betonu je menší než 1 %, pak pevnost závisí pouze na vodním součiniteli. Tato závislost se dá popsat následujícím zákonem nebo spíše pravidlem, protože vychází z empirických zkušeností, publikovaným D. A. Abramsem v roce 1918. [12]

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{w/c}} \quad (1)$$

* V dnešní době toto tvrzení platí pouze u běžných betonů s vodním součinitelem w/c nad 0,45 a při dosahovaných tlakových pevnostech do 60 MPa. V tom případě je totiž nejslabším článkem cementová matrice. Vývoj plastifikátorů ale umožnil snížit vodní součinitel až na hodnoty 0,25 – 0,35, následkem byl vznik nových tzv. vysokohodnotných (HPC) a ultra vysokohodnotných (UHPC) betonů s pevnostmi dosahujícími i přes 100 MPa. Zde může být cementová matrice hutnější a pevnější než kamenivo, které se pak stává nejslabším článkem betonu [2].

kde je:

f_c	pevnost betonu v tlaku;
w/c	vodní součinitel čerstvého betonu;
K_1, K_2	empirické konstanty zohledňující složení betonové směsi a okolní podmínky při zrání betonu.

Abrams ve své studii ke vztahu dodává: „*Závislost uvedeného vztahu funguje, pokud beton není příliš suchý pro požadovanou pevnost a kamenivo není příliš hrubé při daném množství cementu. Jinými slovy, pokud máme zpracovatelnou záměs.*“ a dále: „*Pevnost betonu reaguje na změny účinného obsahu vody bez ohledu na důvod její změny. Vodní součinitel se může změnit z jakéhokoliv důvodu ze zde uvedených:*

1. *Změna v záměsi (množství cementu);*
2. *Změna ve velikosti a zrnitosti kameniva;*
3. *Změna v požadované konzistenci;*
4. *Jakákoliv kombinace bodů (1) až (3).*“ [13]

Všechny výše uvedené body byly již zmíněny v předchozích kapitolách, z toho vyplývá, že problematika změny vodního součinitele zůstává již 100 let téměř stejná. Pouze v bodu (1) by u moderních betonů přibylo navíc množství chemických přísad a příměsí.

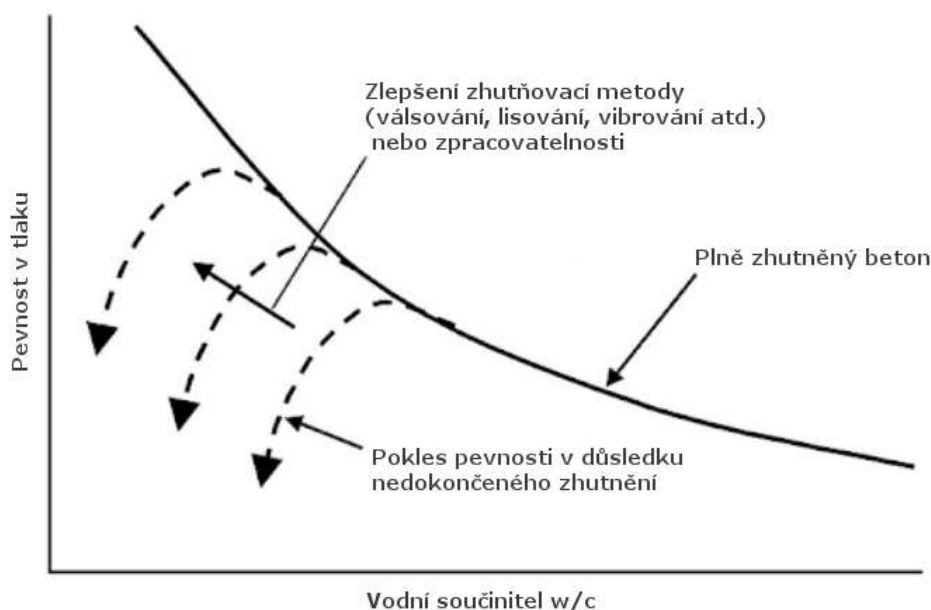
Jak již bylo zmíněno dříve, Abrams ve svém zákoně uvažuje plně zhutněnou směs, kde je obsah vzduchu minimální, což je ale zjednodušený předpoklad. V praxi má vliv na obsahu vzduchu a tedy i na výslednou pórovitost ztvrdlého betonu i voda samotná, která není potřebná pro hydrataci cementu (tedy i vodní součinitel). Toto vzal v úvahu R. Féret, který již v roce 1896 publikoval následujícího pravidlo:

$$f_c = K \left(\frac{c}{c + w + a} \right)^2 \quad (2)$$

kde je:

f_c	pevnost betonu v tlaku;
c, w, a	objemové množství cementu, vody a vzduchu;
K	empirická konstanta zohledňující složení betonové směsi a okolní podmínky při zrání betonu. [12]

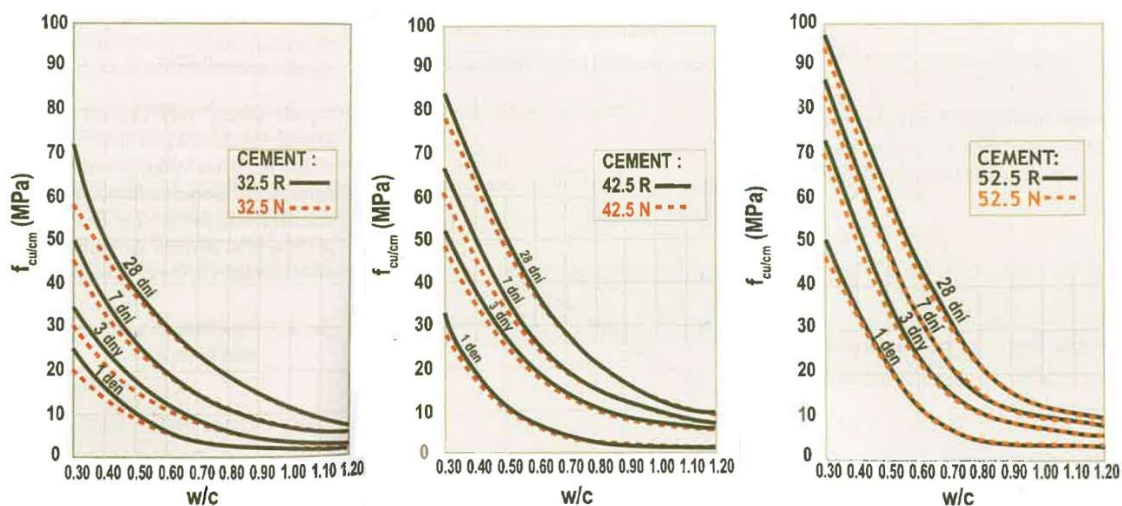
Je nutné zmínit, že oba vědci pracovali nezávisle na sobě a dospěli ke stejným závěrům. Obě pravidla přinášejí jiný pohled na závislost mezi pevností v tlaku a hodnotou vodního součinitele pro plně zhutněný beton, která je schématicky znázorněná na obr. 4. Zároveň je důležité si uvědomit, že tato závislost má určité limity. V první řadě, se snižujícím se vodním součinitelem klesá i zpracovatelnost čerstvého betonu a to až do bodu, kdy již nemůže být plně zhutněn. Féret uvažuje ve svém vztahu obsah vzduchu a pokles pevnosti na něm závislé. Obecně a zjednodušeně řečeno se pevnost sníží o 6 % s každým dalším 1 % obsahu vzduchu navíc. To vede k prudkému poklesu pevnosti znázorněnému čárkovanou čarou. Tento pokles může být oddálen použitím lepší zhutňovací metody nebo zlepšením zpracovatelnosti čerstvého betonu bez zvýšení vodního součinitele, tedy s použitím plastifikátorů nebo 20uperplastifikátoru. Touto metodou se dá dosáhnout hodnoty vodního součinitele pod hranici 0,4. Na druhé straně spektra, pokud je hodnota vodního součinitele vysoká, směs se stane vysoce tekutou a není možné dosáhnout homogenního a soudržného betonu bez zvýšené segregace jednotlivých složek. Vodní součinitel betonů bez přísad se pohybuje v rozmezí 0,45 – 0,70. [14]



Obr. 4 Obecná závislost mezi pevností v tlaku a vodním součinitelem čerstvého betonu (převzato z: [14])

Postupem času byly tyto matematické modely upravovány řadou autorů a jejich empirické koeficienty upřesňovány. Jejich modifikace převážně spočívala v přesnějším stanovení potřebného množství vody, která má přímý vliv na vodní součinitel. Obecně se ale ze všech modelů dají vykreslit funkce zobrazené na obr. 5 – 7, kde je znázorněná

pevnost v tlaku plně ztuhlého betonu ve stáří 1, 3, 7 a 28 dní a pro různé třídy cementu. Z grafu si lze udělat představu o pevnosti betonu z různých cementů v závislosti na vodním součiniteli. Nesmíme ale zapomínat, že pevnost je závislá na všech složkách betonu, tedy i na složení kameniva, typu použitých příměsí nebo obsahu vzduchu, křivky se pak budou lišit v horizontální úrovni, průběh by měl ale v zásadě zůstat stejný.



Obr. 5, 6 a 7 Grafy vlivu vodního součinitele a doby ošetřování na průměrnou pevnost v tlaku betonu vyrobené z cementů 32,5 N (R), 42,5 N (R), 52,5 N (R) (zdroj: [2])

V praxi se hodnota vodního součinitele volí v závislosti na požadované pevnosti betonu v tlaku, třídě použitého cementu. V dalším kroku se tato hodnota musí porovnat s požadavkem na trvanlivost konstrukce, která je specifikována agresivitou prostředí projektantem. Norma ČSN EN 206+A1 v tabulce F.1 přílohy F udává spolu s minimální pevnostní třídou betonu, minimálním obsahem cementu a minimálním obsahem vzduchu, také i maximální hodnoty vodního součinitele pro jednotlivé typy a stupně agresivity prostředí. Oba požadavky musí být vždy splněny a volí se přísnější kritérium. Ovšem na vodní součinitel má vliv i požadovaná konzistence, která si může v případě vysokých nároků na zpracovatelnost vyžádat větší dávku záměsové vody, v tom případě se musí místo vody použít plastifikátory, které snižují účinný obsah vody při zachování stejné zpracovatelnosti.

2.3.3. Shrnutí

Roli vody a její dopady na vlastnosti betonu můžeme shrnout následovně:

- minimální potřebné množství vody pro hydrataci cementu je 23 % z hmotnosti cementu, nadbytečná voda (reologická) už slouží pouze pro vytvoření dobře zpracovatelného, plastického čerstvého betonu;

-
- čím vyšší je obsah účinné vody, stoupá i hodnota vodního součinitele;
 - obecně platí, že čím menší je vodní součinitel, tím je beton (cementová matrice) kompaktnější s menším obsahem vzduchových pórů a tím je zároveň i pevnější a trvanlivější;
 - pro snížení vodního součinitele při zachování stejné zpracovatelnosti, je nejúčinnější metodou použití plastifikátorů a superplastifikátorů.

2.4. Příměsi

První doplňková složka, která není k výrobě betonu potřeba, neboť slouží pouze pro zlepšení nebo k docílení zvláštních vlastností betonu. Většinou ve formě práškových látek nebo vodních suspenzí, které se přidávají do čerstvého betonu. Dle ČSN EN 206+A1 [10] se dělí se na dva druhy:

- Druh I: Téměř inertní příměsi, například mleté horniny, filery (kamenná moučka, jemně mletý vápenec) nebo pigmenty pro barvení stavebních materiálů na bázi cementu;
- Druh II: Pucolány nebo latentní hydraulické příměsi, jedná se o popílký, křemičité úlety (silika) nebo vysokopecní strusku.

V obou případech se jedná o velmi jemně mletou látku s měrným povrchem podobným cementu a vyšším, velmi reaktivní křemičité úlety však mají měrných povrch i více než $15\,000\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$. Hlavním účelem je zvětšení podílu jemných částic a tím docílení kompaktnějšího a hutnějšího materiálu s minimálním množstvím vzduchových pórů. Z hlediska účinného obsahu vody a vlivu na vodní součinitel nás budou zajímat pouze příměsi druhu II.

Látka s hydraulickou aktivitou dokáže tvrdnout ve vodním prostředí za normální teploty. Látka s latentní hydraulitou potřebuje k vyvolání chemických reakcí navíc ještě $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sloučeninu také známou jako vápno. Podobné vlastnosti mají i pucolánové látky, které se od latentně hydraulických liší obsahem některých minerálů (např. vysokým podílem aktivního SiO_2). V obou případech je ale podmínkou pro spuštění reakce alkalické prostředí v roztoku, vytvořené i jinou chemickou sloučeninou. Latentně hydraulické látky se přidávají jak při mletí cementu, tak i do čerstvého betonu při jeho míchání. [6]

Při použití příměsi druhu II ve složení betonu se musí vzít v úvahu, že příměs částečně nahrazuje cement a má vliv na vodní součinitel, ať už z důvodu modifikace vlastností betonu, snížení jeho ceny anebo z důvodu ekologického využití odpadních produktů, jako to je např. u popílku. Z toho důvodu norma ČSN EN 206+A1 [10] zavádí tzv. koncepci k-hodnoty, která upravuje hodnotu vodního součinitele v závislosti na druhu použité příměsi následujícím vztahem:

$$v/c_{\text{upravená}} = \frac{v}{c + k \cdot p} \quad (3)$$

kde je:

- v účinný obsah vody [kg/m^3];
- c hmotnost cementu [kg/m^3];
- p hmotnost použité příměsi [kg/m^3];
- k součinitel závislý na druhu příměsi [-].

Níže si uvedeme dvě nejpoužívanější latentně hydraulické příměsi do betonu a jejich koncepcí k-hodnoty s vlivem na vodní součinitel.

2.4.1. Popílek

Popílek je odpadní produkt energetického průmyslu, který vzniká při spalování uhlí v práškovém stavu, kde je následně zachycován v odlučovačích. Jejich jakost je proměnlivá, jelikož závisí na druhu spalovaného uhlí, způsobu odlučování z exhalátu, ale také na technickém způsobu spalování. Vhodností popílku do betonu se zabývá norma ČSN EN 450-1 [15], která definuje obsah aktivního SiO_2 minimálně 25 % hmotnosti. Taková látka už vykazuje určité pucolánové vlastnosti a při přidání do betonu zvyšuje jeho dlouhodobou pevnost, snižuje hloubku karbonatace a částečně i jeho smrštění.

Maximální množství popílku se omezuje hmotnostním poměrem (popílek/cement) $\leq 0,33$, v případě většího množství se přebývající část nebere v úvahu při výpočtu opravného vodního součinitele ani pro minimální obsah cementu. Zároveň minimální obsah cementu nutný pro specifikovanou agresivitu prostředí se může snížit maximálně o množství [$k \times (\text{minimální obsah cementu} - 200)$] kg/m^3 , množství (cement + popílek) ale stále musí být větší než minimální požadované množství cementu. K-hodnoty jsou při použití popílku s cementem druhu CEM I následující:

-
- CEM I 32,5 $k = 0,2$
 - CEM I 42,5 a vyšší $k = 0,4$ [10]

Hodnota $k = 0,2$ se používá také pro cementy CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM III A. [16]

Na závěr si autor dovolí menší odbočku k aktuálnímu dění. Ačkoliv je recyklace této odpadní látky ekologická a ještě k tomu je její využití prospěšné, zejména v oboru stavebnictví, jeho využití v posledních letech klesá a to hlavně z důvodu poklesu jeho kvality. Nároky na snižování emisních limitů z uhelných elektráren nutí k nákladným investicím do nových a účinnějších metod odsiřování, které ale budoucí využití popílku komplikují (je potřeba dalších investic do zařízení a provozu jeho úpravy) nebo ho zanechávají zcela nepoužitelný. [17]

2.4.2. Křemičité úlety, silika

Křemičité úlety jsou vedlejším produktem hutnických provozů, kde se při výrobě křemíkových kovů a slitin ferosilicia zachytávají pomocí filtrů. Vyznačují se velkým obsahem SiO_2 a výraznou pucolanitou, přičemž norma ČSN EN 13263-1+A1 zabývající se požadavky na křemičité úlety definuje, že obsah oxidu křemičitého nesmí být menší než 85 % hmotnosti pro třídu 1, nebo ne menší než 80 % hmotnosti pro třídu 2. Dále se vyznačují mimořádně velkým měrným povrchem $15\,000 - 30\,000 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ s průměrem kulových zrn $0,1 - 0,2 \text{ } \mu\text{m}$. Těmito charakteristikami zlepšují vlastnosti čerstvého betonu, jako je krvácení betonu (odlučování cementového mléka), segregace nebo čerpatelnost, ale i vlastnosti ztvrdlého betonu zvýšením pevnosti a trvanlivosti důsledkem snížení jeho porozity. Vysoký měrný povrch si ale opět vyžaduje zvýšení dávky vody. [6]

Koncepce k-hodnoty pro křemičité účely s použitím cementu druhu CEM I je podle normy následující:

- pro určený vodní součinitel $\leq 0,45$ $k = 2,0$
- pro určený vodní součinitel $> 0,45$ $k = 2,0$ (kromě stupně vlivu prostředí XC a XF, kdy $k = 1,0$)

Maximální množství křemičitého úletu je omezeno hmotnostním poměrem (křemičitý úlet/cement) $\leq 0,11$. Zároveň množství (cement + $k \times$ křemičitý úlet) nesmí být menší, než je minimální obsah cementu požadovaný stupněm agresivity prostředí. [10]

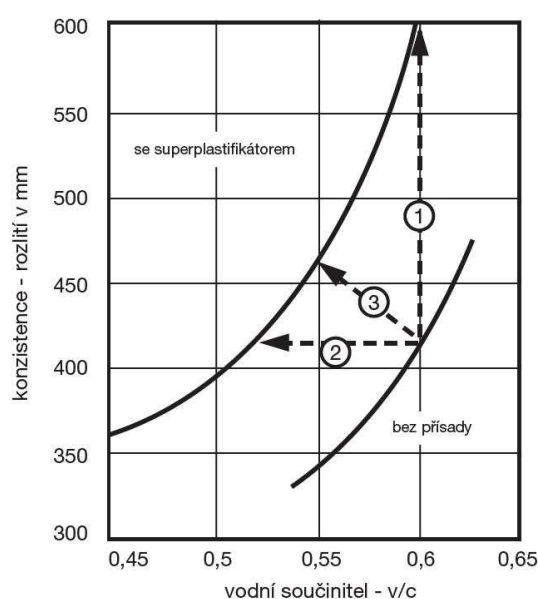
2.4.3. Shrnutí

Používání příměsí do betonu můžeme shrnout takto:

- vyznačují se velkým měrným povrchem a pucolánovými vlastnostmi;
- zlepšují vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu, hlavním důvodem je právě zvýšení podílu jemných částic a snížení porozity;
- velký měrný povrch si vyžaduje větší dávku vody, která je upravena v rámci vodního součinitele zavedením tzv. koncepce k-hodnoty.

2.5. Přísady

Druhou doplňkovou složkou pro modifikaci nebo zlepšení vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu jsou chemické přísady. Běžně se ve formě kapaných látek přidávají při míchání betonu v množství 0,2 – 5 % hmotnosti cementu. Přísady se dělí podle jejich hlavní funkce, kterých existuje celá řada, pro účely této práce si ale uvedeme jen ty, které mají efekt na dávku záměsové vody a vodní součinitel, jimiž jsou plastifikátory (přísady redukující vodu) a superplastifikátory (přísady silně redukující vodu).



Obrázek 8 Vliv plastifikační přísady na konzistenci (rozlítí) při různém vodním součiniteli (zdroj: [16])

Hlavní důvody použití přísad redukujících vodu jsou tyto:

1. Zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu.
2. Snížení množství záměsové vody a tím redukování vodního součinitele pro zvýšení pevnosti a trvanlivosti ztvrdlého betonu, při zachování stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu.
3. Snížení množství vody a cementu při zachování stejné zpracovatelnosti a tím snížení vývoje hydratačního tepla (např. u masivních konstrukcí nebo při betonáži v teplém klimatu) a omezení dotvarování se smršťováním. [6]

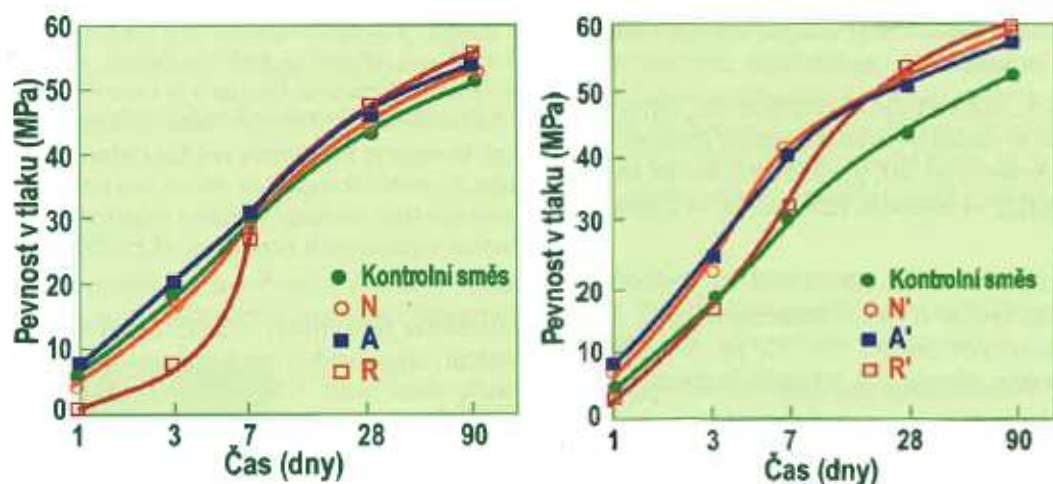
V zásadě se tedy jedná vždy o zlepšení nebo zachování zpracovatelnosti při snížení hodnoty vodního součinitele. Tento jev se dá znázornit obr. 8.

Požadavky na snížení množství vody ukládá norma ČSN EN 934-2+A1, kde plastifikátory musí redukovat množství záměsové vody o více jak 5 % při zachování stejné konzistence stanovené sednutím nebo rozlitím, u superplastifikátoru je to o více jak 12 %. Zároveň musí pevnost v tlaku po přidání plastifikační přísady stoupnout po 7 a 28 dnech minimálně o 10 %, u superplastifikačních po 1 dnu minimálně o 40 % a po 28 dnech o 15 %. Superplastifikátory dostupné na trhu mají ale mnohdy ještě lepší účinky, než ukládá norma. [6]

Chemické složení vodoredukujících přísad je stejné jako u přísad zpomalující tuhnutí, přidávkem urychlovacích látek se zpomalující účinek potlačuje a podle jejich dávky se vodoredukující přísady dělí do tří druhů:

- Typ R, snižující obsah vody a zpomalující tuhnutí;
- Typ N, snižující obsah vody bez vlivu na tuhnutí;
- Typ A, snižující obsah vody a zrychlující tuhnutí.

Na obr. 9 a 10 jsou grafy znázorňující pevnost v tlaku v závislosti na čase pro referenční směs oproti směsím s různými typy vodoredukujících přísad. Jeden při daném vodním součiniteli $v/c = 0,55$, druhý při daném sednutí 70 mm. Jedná se o záměsi s použitým cementem druhu CEM I o obsahu 300 kg/m^3 , vyráběné při běžné teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$. [2]



Obr. 9 a 10 Vliv různých typů vodoredukujících přísad na pevnost v tlaku v závislosti na čase, vlevo s daným vodním součinitel ($v/c = 0,55$), vpravo s daným sednutím 70 mm (zdroj: [2])

Z grafů lze vidět, že při daném vodním součiniteli je nárůst pevnosti oproti referenčnímu vzorku menší, než při stanovém sednutí. Pomalejší nárůst u přísady typu R je dán jejím vedlejším zpomalujícím účinkem.

Plastifikátory a superplastifikátory jsou nejpoužívanější chemické přísady při výrobě betonu a považují se za nejdůležitější pokrok v technologii betonu za posledních 30 let. Benefity, které tato technologie přinesla, daly prostor pro vznik HPC a UHPC betonů, kdy se v dnešní době díky jejich vynikajícím vlastnostem staví odvážnější, ale hlavně spolehlivější a trvanlivější konstrukce, které by z běžných betonů nebylo možné realizovat.

3. Odpařování vody z čerstvého betonu

Na začátku by chtěl autor práce podotknout, že tato kapitola nepojednává o problematice odpařování vody z čerstvého betonu při dopravě na stavbu. Pouze shrnuje dosavadní poznatky a používané metody z oblasti výzkumu odpařování vody z čerstvého betonu, které se uplatňují převážně ve fázi ošetřování již odlitého a zpracovaného betonu, k posouzení rizika vzniku trhlin následkem plastického smrštění. Odpařování vody během dopravy na stavbu nebylo doposud věnováno tolik pozornosti, v literatuře nebyly nalezeny žádné relevantní informace. To je jedním z důvodů, proč byl realizován experimentální program, který bude prezentován ve druhé části této práce.

Odpařování kapalin při každé teplotě je všeobecně známý fakt. Míru odpařování z povrchu vody ale poprvé matematicky vyjádřil J. Dalton v roce 1802 svým zákonem odpařování ve tvaru:

$$E = C.(e_w - e_a) \quad (4)$$

kde je:

- E míra odpařování;
- C konstanta zohledňující intenzitu větru nad odpařovaným povrchem;
- e_w tlak nasycené vodní páry odpařovaného povrchu;
- e_a tlak vodní páry vzduchu nad odpařovaným povrchem.

Míra odpařování tedy závisí na rozdílu tlaku nasycené vodní páry odpařovaného povrchu a tlaku vodní páry vzduchu nad odpařovaným povrchem. Na tlak vodní páry má velký vliv teplota. Dalším výrazně ovlivňujícím faktorem je intenzita výměny vzduchu nad odpařovaným povrchem. Čím rychleji se vyměňují molekuly nasycené vodou z odpařovaného povrchu za nové, tím je proces odpařování intenzivnější. V poslední řadě je odpařování ovlivněno také relativní vlhkostí vzduchu. [18]

Tento vztah byl pak dále upravován mnoha dalšími autory a vzniklo několik variací s různými empirickými konstantami, které vycházely z konkrétních experimentů prováděných po celém světě. Jeden z těchto experimentů byl základem práce prezentované M. A. Kohlerem v roce 1952, který provedl řadu měření u jezera Hefner ve státě Oklahoma v USA. Dva roky na to (1954) C. Menzel použil Kohlerovu práci a aplikoval

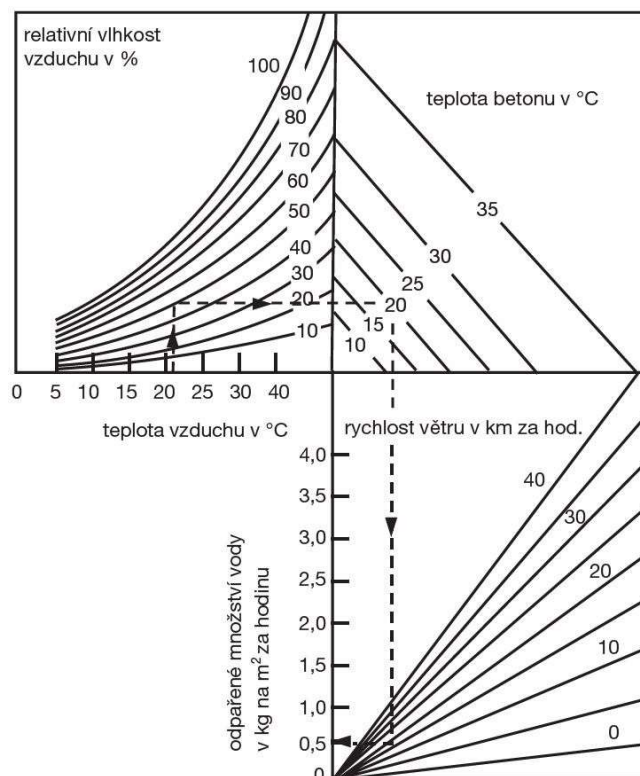
ji pro beton. Rovnice odvozená Kohlerem a následně aplikovaná Menzelem pro využití u betonu je v tomto tvaru:

$$W = 0,315 \cdot (e_o - e_a) \cdot (0,253 + 0,060 \cdot V) \quad (5)$$

kde je:

- W množství odpařené vody [kg/m^2];
- e_o tlak nasycené vodní páry vzduchu v těsné blízkosti nad odpařovaným povrchem se započítaným vlivem jeho teploty (v tomto případě je to teplota betonu) [kPa];
- e_a tlak vodní páry vzduchu obklopující odpařovaný povrch se započítaným vlivem jeho teploty a vynásobený relativní vlhkostí vzduchu, který je roven tlaku nasycené vodní páry [kPa];
- V průměrná rychlost větru nad odpařovaným povrchem [km/h].

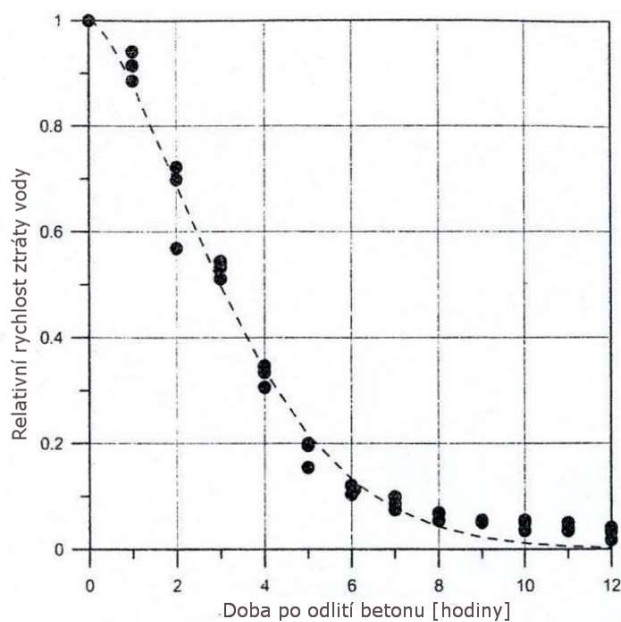
Spolu s rovnicí byl vytvořen i nomogram, který byl v roce 1960 upraven do dnešní podoby, ve které se prezentuje v knihách, technologických příručkách a dalších publikacích (viz obr. 11). Oproti původní verzi je srozumitelnější a uživatelsky přívětivější. [19]



Obr. 11 Nomogram pro odhadnutí maximální potenciální míry odpařování vody z čerstvého betonu v závislosti na okolních podmínkách, s předpokladem vodou pokrytého povrchu betonu, jehož teplota je rovna teplotě betonu (zdroj: [16])

Ačkoliv se to na první pohled zdá být nástroj užitečný a použitelný, jeho aplikace má mnoho omezení a úskalí. Za prvé, jeho aplikace předpokládá povrch betonu pokrytý vodou, jelikož rovnice byla původně vyvinuta z experimentů prováděných za účelem předvídání rychlosti odpařování vody z volného vodního povrchu (u jezera Hefner byly použity normové nádoby o průměru 2 m a hloubky 0,6 m, tzv. odpařovací pánve). Rovnice nebyla vyvinuta ani následně upravena Menzelem pro předvídání rychlosti odpařování vody z povrchu čerstvého betonu. Hodnota, která nám tedy vyjde po výpočtu z rovnice nebo odečtením z nomogramu, představuje odhad schopnosti stavebního prostředí odpařovat vodu z odpařovací pánve, jestliže povrchová teplota vody je rovna teplotě betonu. V betonářské praxi se to bere jako přiměřený odhad rychlosti ztráty vody z vodou pokrytého povrchu betonu, ačkoliv tento předpoklad není zcela přesný. Skutečné odpařování z povrchu čerstvého betonu závisí na více faktorech, než jen na vlivu prostředí, který je zahrnutý v rovnici. Přesněji by se dalo říci, že se jedná spíše o odhad „odpařivosti“ stavebního prostředí, než o předvídání rychlosti ztráty vody. Byly provedeny experimenty, které sledovaly rozdíl mezi potencionální mírou odpařování z odpařovací pánve (a tudíž odhadované nomogramem) a skutečným odpařováním z povrchu čerstvého betonu ve formě

malé betonové desky. Oba sledované vzorky se umístily do větrného tunelu na elektronické váhy a sledovaly se ztráty vody z betonové desky spolu se ztrátami z vodní pánve a odhadovanou odpařivostí. Výsledky jsou znázorněné na Obr. 12, kde je z grafu vidět, že ztráty vody z betonové desky se ztrátami z vodní pánve byly podobné po dobu několika prvních hodin, kdy se na povrch dostávala voda z betonu pomocí vztlínání (do-



Obr. 12 Rychlost ztráty vody z betonu jako poměr rychlosti ztráty vody z vodní pánve (zdroj: [19])

cházel k tzv. krvácení betonu), jakmile se tento proces zpomalil nebo zastavil, začalo docházet k vysoušení povrchu a rychlost ztráty vody z betonu výrazně klesla, po 12 hodinách až na hodnotu 5 %. Tento experiment potvrzuje dříve zmíněnou hypotézu, že výsledkem nomogramu je odhad odpařovacího potenciálu stavebního prostředí (odpař-

vosti), nikoliv rychlost ztráty vody z čerstvého betonu. Rozdíl mezi těmito dvěma může být ale malý, pokud je povrch betonu pokrytý vodou z procesu krvácení betonu. [19]

Druhým důležitým faktorem při používání rovnice nebo nomogramu je způsob získávání vstupních dat k výpočtu, který musí úzce korelovat s postupem praktikovaným Kohlerem při jeho měření u jezera Hefner. Kohler měřil teplotu vzduchu ve stínu a vlhkost vzduchu proti větru cca 1,5 m nad odpařovaným povrchem. Teplota vody byla měřena plovoucím měřidlem v hloubce 13 mm a musela být odstíněna od přímého svitu slunečního záření. V poslední řadě rychlost větru byla měřena zhruba 0,51 m nad odpařovaným povrchem. Na rozdíl od teploty a vlhkosti vzduchu, které nejsou tolik závislé na výšce a proměnlivé v krátkém časovém úseku, mohou při měření rychlosti větru vznikat velké nepřesnosti. Rozhodující je prvních několik hodin od zpracování betonu a u těch se může rychlost větru výrazně lišit od průměru celého dne. Zároveň také záleží na poloze betonovaného prvku, protože síla větru je jiná při betonáži např. základové desky, která může být skryta ve stavební jámě, oproti stropní desce v 8. nadzemních podlaží. Z těchto důvodů se dá zcela vyloučit použití dat získaných mimo pracoviště, kde se nachází betonovaný prvek, jelikož pokud bychom chtěli použít data např. z blízké meteorologické stanice, mohli bychom dostat úplně zcestné informace, které s aktuální situací (během několika prvních hodin od zpracování betonu) na pracovišti korespondují minimálně. Důvodem může být rozdílná výšková poloha nebo jiný terén obklopující dotyčná místa (meteorologické stanice jsou většinou na otevřeném prostoru, zatímco staveniště může být v husté okolní zástavbě). V poslední řadě teplota povrchu betonu uvažovaná pro použití do nomogramu se většinou měří v době provádění zkoušek konzistence, ta se ovšem může lišit od skutečné teploty povrchu betonu ve fázi odpařování a to má za následek jiný tlak vodní páry a zároveň i odhadovanou rychlost odpařování vody. [19]

Po vyčtení všech těchto omezujících pravidel a faktorů, které mohou výsledky výrazně ovlivnit, se zdá téměř nemožné tento nástroj správně aplikovat, avšak už mnoho desítek let slouží k odhalení potenciálně problematických situací, které by mohly vést k nenávratnému poškození prováděné betonové konstrukce.

V následujících podkapitolách si uvedeme, jak jednotlivá vstupní data mohou odhadovanou rychlost odpařování vody ovlivnit a v jaké míře.

3.1. Vliv surovin na teplotu betonu a odpařování vody

Jak již bylo zmíněno dříve, rychlost odpařování vody závisí, mimo jiné, i na tlaku vodní páry při povrchu odpařované plochy, který se exponenciálně mění s teplotou, jejíž hodnota je rovna teplotě betonu. Ta může být ze strany surovin, které do betonové směsi vstupují, ovlivněna dvěma faktory.

Prvním je druh použitého cementu a jeho jemnost mletí. Dříve bylo řečeno, že vývin hydratačního tepla je ovlivněn hlavně procentuálním obsahem slínku v cementu a jeho jemností mletí. Se vzestupem jednoho anebo druhého vývin hydratačního tepla stoupá a to má za následek vyšší teplotu betonu při jeho tunutí (více viz kapitola 2.2).

Druhým faktorem jsou parametry jednotlivých složek, konkrétně se jedná o jejich celkové množství, měrnou tepelnou kapacitu a logicky i teplotu, při které složky vstupují do míchacího cyklu. Teplota čerstvého betonu se následně vypočítá pomocí jednoho z řady vzorců odvozených na základě kalorimetrické rovnice. Jeden takový uvádí německá verze Příručky technologa: Beton vydaná HeidelbergCementem [20]:

$$T_{\text{čb}} = \frac{0,84.(C.T_C + P.T_P + K.T_K) + 4,2.V.T_V}{0,84.(C + P + K) + 4,2.V} \quad (6)$$

kde je:	$T_{\text{čb}}$	teplota betonové směsi [°C]
	T_C	teplota cementu [°C]
	T_K	teplota kameniva [°C]
	T_V	teplota záměsové vody [°C]
	T_P	teplota příměsi [°C]
	C	hmotnost cementu [kg]
	K	hmotnost kameniva [kg]
	V	hmotnost vody [kg]
	P	hmotnost příměsi [kg]
	0,84	přibližný poměr měrné tepelné kapacity tuhých složek čerstvého betonu
	4,2	měrná tepelná kapacita vody

V betonářské praxi se řeší dvě problematické situace: extrémní zima nebo extrémní teplo. Z hlediska odpařování vody je jedna z nejhorších situací ta, kdy je beton teplý a vzduch chladný, suchý (nízká relativní vlhkost) a větrný. Takové podmínky mohou

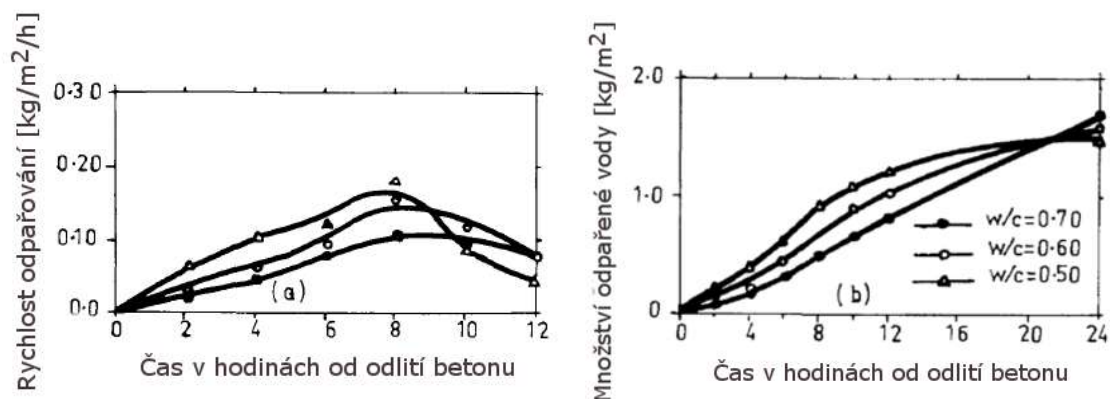
nastat v zimním období, při betonáži za nízkých teplot, kdy se musí na betonárně udělat pasivní opatření (zahřátí kameniva anebo záměsově vody, použití cementu typu CEM I 42,5R, resp. 52,5R), popřípadě i aktivní opatření (dávkování urychlovače tvrdnutí betonu do záměsi), aby teplota betonu neklesla pod 5 °C, jelikož při nižších teplotách se postupně zpomaluje proces hydratace a oddaluje se nárůst pevnosti betonu.

Nicméně velmi nepříznivé podmínky mohou nastat i v letním období, kdy teplota čerstvého betonu může po smíchání ohřátých složek a dopravě na stavbu za vysokých okolních teplot dosahovat i kolem 25 °C. V tomto případě je naopak nutné teplotu čerstvého betonu snížit, aby nepřekročila mezní teplotu při ukládání (může se lišit pro různé typy konstrukcí, pro betonové konstrukce pozemních komunikací platí hodnota 27 °C, udávaná předpisem ŘSD TKP 18 [21]). U typických receptur má největší vliv na teplotu čerstvého betonu použité kamenivo, jeho zchlazení (např. skrápěním vodou) je tudíž spolu s použitím cementu nižších pevnostních tříd a pomalejším nárůstem pevnosti (např. CEM III 32,5N) i nejefektivnější cestou z výčtu pasivních opatření. K ochlazení čerstvého betonu o 1 °C stačí ochladit kamenivo zhruba o 1,5 °C, zatímco vodu s cementem by bylo nutné zchladit cca o 8 °C. Co se aktivních opatření týče, je možné použít drcený led do záměsi (v tomto případě, spolu se skrápěním kameniva vodou, je nutné kontrolovat účinný obsah vody a hodnotu vodního součinitele), chladit pomocí tekutého dusíku nebo dávkovat zpomalovač tuhnutí betonu do záměsi. Samozřejmě je také možné bránit již samotnému ohřátí jednotlivých složek, a to např. stíněním skládek kameniva. [7], [16]

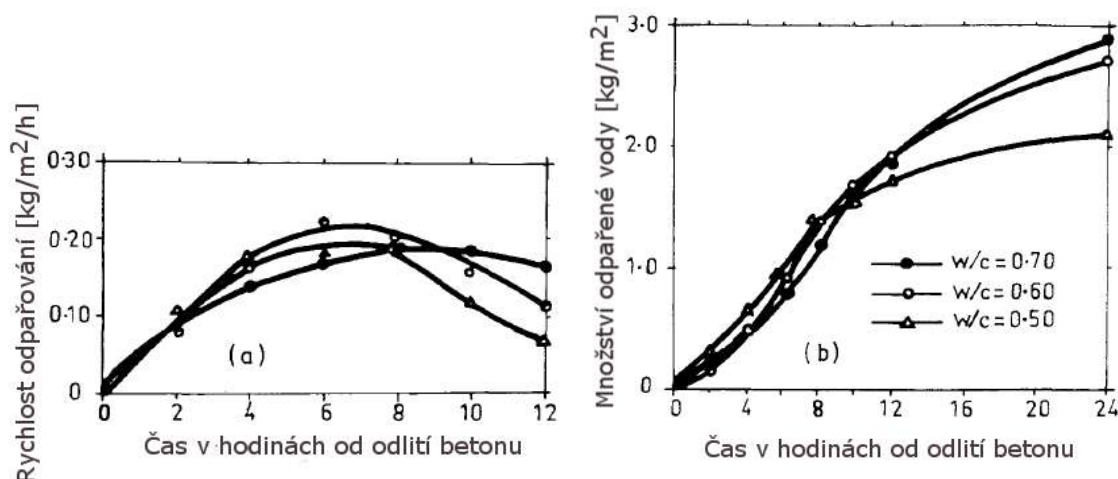
3.2. Vliv okolního prostředí na odpařování vody

Mimo teploty betonu rychlost odpařování ovlivňuje také teplota vzduchu okolí, relativní vlhkost vzduchu a rychlost větru. Efekt jednotlivých aspektů prezentoval ve své práci Z. Berhane v roce 1984 [22], který sledoval rychlost a množství odpařené vody z čerstvé malty a betonu. Berhane nasimuloval pomocí klimatických komor několik různých okolních podmínek prostředí, konkrétně měnil teplotu okolí (30 a 40 °C), relativní vlhkost (35, 70 a 95 %) a rychlost větru (0 a 15 km/h), dále také vyrobil záměsi s odlišným vodním součinitelem (0,5; 0,6 a 0,7) a použil dva různé druhy cementu, u těch ale nevyzozoroval žádný výrazný rozdíl, co se týče celkového množství odpařené vody. Vyrobené záměsi odlil do kruhových nádob o ploše 177 cm² a výšce 5,7 cm a pomocí elektrické váhy měřil úbytek vody v čase. Výsledky prezentuje ve

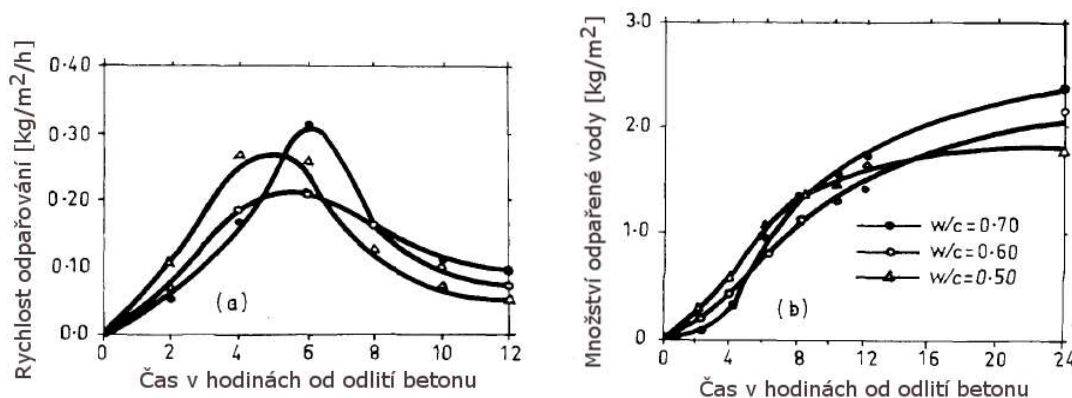
formě grafů (viz Obr. 13 – 20), kde je uvedena závislost rychlosti odpařování vody a množství odpařené vody na čase od odlití betonu do nádob. K popisu podmínek, které se daného grafu týkají, použil značení ve tvaru (teplota vzduchu / relativní vlhkost / rychlost větru).



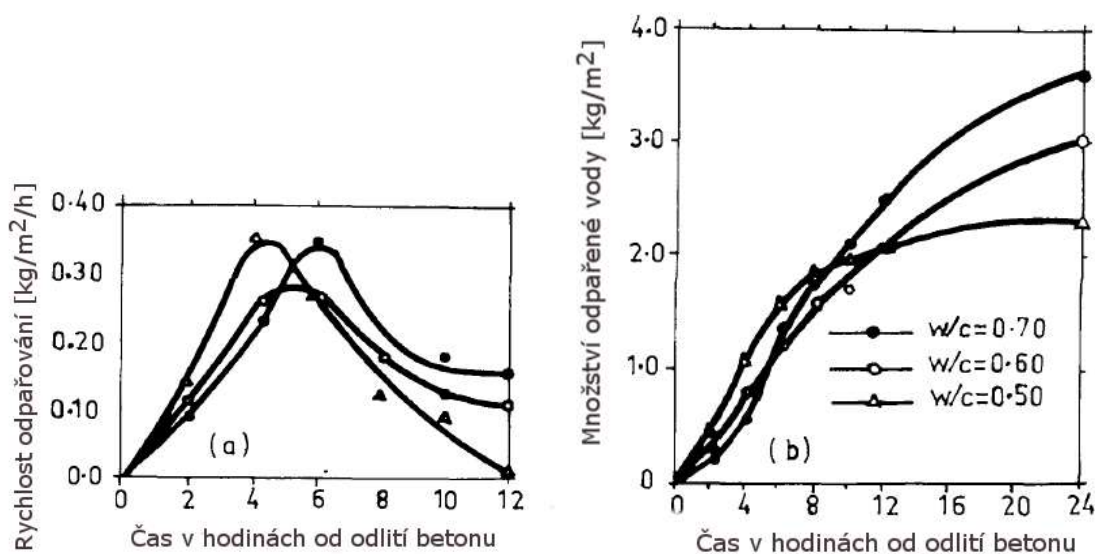
Obr. 13, 14 Závislost odpařování-čas pro různé druhy záměsí vystavené okolním podmínkám (30/95/0), vlevo (a) rychlost odpařování vody, vpravo (b) množství odpařené vody (převzato z: [22])



Obr. 15, 16 Závislost odpařování-čas pro různé druhy záměsí vystavené okolním podmínkám (30/95/15), vlevo (a) rychlost odpařování vody, vpravo (b) množství odpařené vody (převzato z: [22])



Obr. 17, 18 Závislost odpařování-čas pro různé druhy záměsí vystavené okolním podmínkám (40/95/0), vlevo (a) rychlost odpařování vody, vpravo (b) množství odpařené vody (převzato z: [22])



Obr. 19, 20 Závislost odpařování-čas pro různé druhy záměsí vystavené okolním podmínkám (40/95/15), vlevo (a) rychlost odpařování vody, vpravo (b) množství odpařené vody (převzato z: [22])

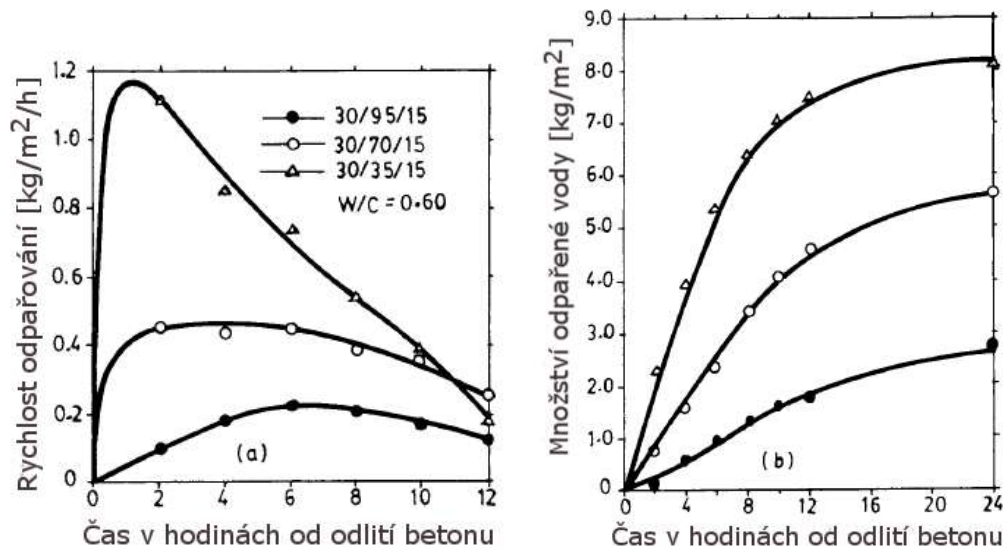
Při pohledu na grafy a po jejich vzájemném porovnání lze vyčíst následující:

Ve všech případech záměs s nejvyšší hodnotou vodního součinitele vykázala největší celkové množství odpařené vody. Avšak největší rychlost odpařování v prvních hodinách (0 – 4) zaznamenaly záměsi s nejnižším vodním součinitelem. To je pravděpodobně způsobeno vyšší teplotou betonu v důsledku menšího množství vody v záměsi.

Změna teploty z 30 na 40 °C bez působení větru zvýšila množství odpařené vody v prvních hodinách zhruba o 45 % a za 24 hodin o 15 %. Zatím co s působením větru byl tento nárůst o 30 % v prvních hodinách a 30 % během 24 hodin. Berhane také porovnává naměřené hodnoty s odhadem, který lze získat z rovnice či nomogramu sestaveného Menzelem. Vliv teploty na odpařování v prvních hodinách je prakticky stejný jaký uvádí rovnice, avšak obecně je její efekt nižší.

Vliv rychlosti větru stoupá s vyšším vodním součinitelem, a to převážně v prvních hodinách od odlití betonu. Rychlost větru 15 km/h při teplotě 30 °C a relativní vlhkosti 95 % vykazovala zvýšení odpařování zhruba o 60 % v prvních hodinách a o 45 % později, zatímco při teplotě 40 °C byly tyto hodnoty navýšeny pouze o 50 a 30 %. Vliv rychlosti větru je značně větší, než udává Menzelova rovnice.

V poslední řadě vliv relativní vlhkosti má podle získaných výsledků největší vliv na odpařování vody, jak uvádí následující graf.



Obr. 21, 22 Vliv relativní vlhkosti na úbytek vody z čerstvého betonu, vlevo (a) rychlost odpařování vody, vpravo (b) množství odpařené vody (převzato z: [22])

Berhane uzavírá svoji práci závěrem, že úbytek vody odpařováním je v horkém a vlhkém prostředí zhruba 3,5 krát menší než v teplém a průměrně vlhkém prostředí a 7,5 krát menší než v teplém a suchém prostředí. Zároveň tvrdí, že Menzelova rovnice není vhodná pro odhadování rychlosti odpařování vody v žádné fázi čerstvého betonu a ani v žádných klimatických podmínkách. Nejblíže se sobě hodnoty rovnaly při působení větru v rozmezí 3 až 6 hodin od odlití betonu. Hodnoty naměřené bez působení větru se významně lišily od těch, které nabízí rovnice. [22]

4. Použité metody zkoušení vzorků

4.1. Zkouška nasákavosti kameniva

Zkouška nasákavosti kameniva se provedla podle normy ČSN EN 1097-6 [23]. Pro účely experimentu nebylo nutné stanovovat objemovou hmotnost kameniva.

Postup zkoušky byl následující. Z připraveného materiálu, který byl určený pro zkušební betonové záměsi, se odebral vzorek od každé frakce kameniva. Hmotnost zkušebních navážek závisí na horní velikosti zrn kameniva (D). Pro frakci 0/4 nesmí být menší než 300 g, pro frakci 8/16 minimálně 2 kg a pro frakci 11/22 minimálně 5 kg. Dále se postup dělí podle velikosti zrn kameniva.

Pro zrna kameniva propadlá sítem 31,5 mm a zachycená sítem 4 mm se nejdříve zkušební vzorek propláchl, aby se odstranily drobnější částice a odstranila se zrna zachycená na síte 31,5 mm. Následně se zkušební navážka vložila do pyknometru naplněného vodou o teplotě cca 20 °C a třepáním se odstranily všechny vzduchové bubliny. Vzorky se nechaly po dobu 24 hodin ve vodní lázni. Po vyjmutí z pyknometru se navážka okapala, rozprostřela se na suché utěrce a lehce se povrchově usušila. Dále se kamenivo nechalo na okolním vzduchu tak dlouho, dokud nezmizel vodní film, ale kamenivo se stále vizuálně zdálo mokré. Nasáklá a povrchově osušená zkušební navážka se dala na plechový táč a zvažila se hmotnost M_1 . Poté se navážka umístila do sušárny o teplotě 110 °C, kde byla ponechána do ustálení hmotnosti a zvažila se hmotnost vysušené zkušební navážky M_4 .

Nasákavost kameniva WA_{24} ponořeného 24 hodin ve vodě se vypočítal následujícím vztahem:

$$WA_{24} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (7)$$

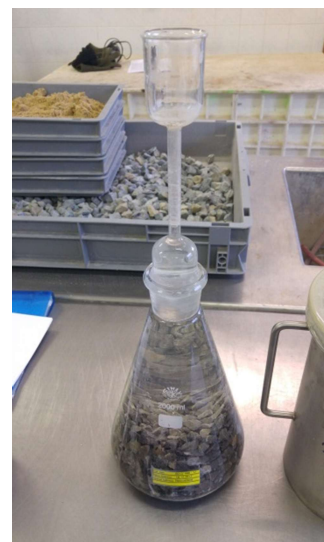
kde je:

WA_{24} nasákavost kameniva [%];

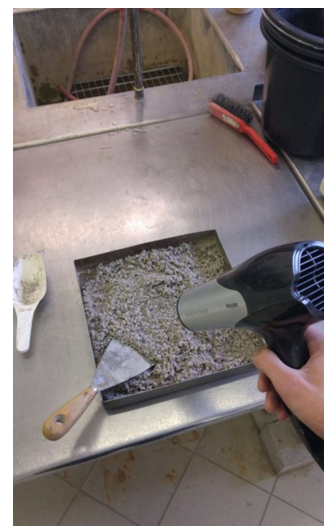
M_1 hmotnost vodou nasáklé a povrchově osušené zkušební navážky [g];

M_4 hmotnost v sušárně vysušené zkušební navážky [g].

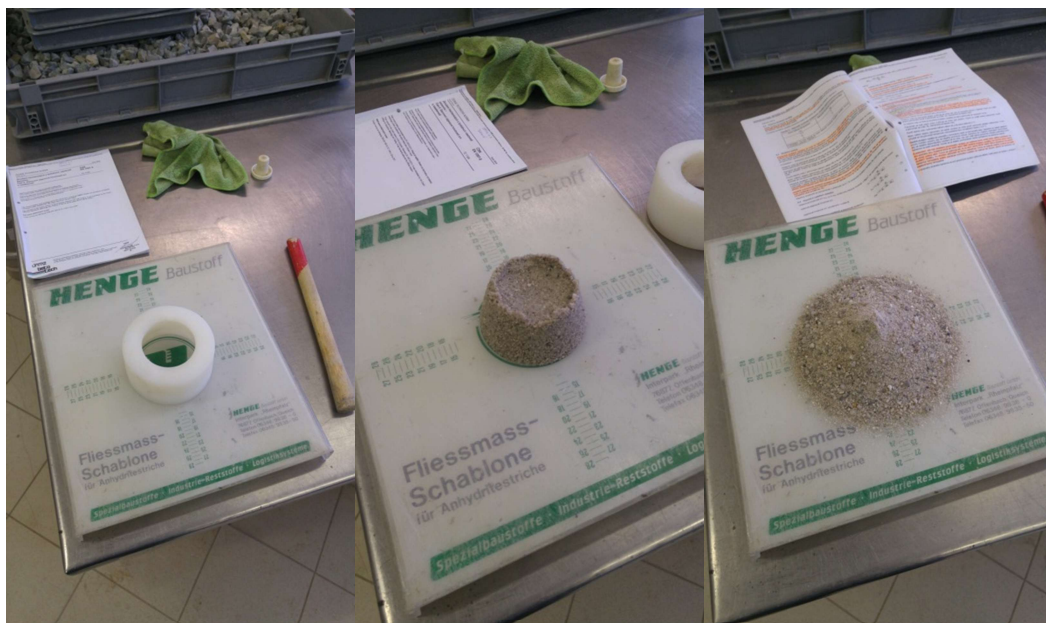
Pro zrna kameniva propadlá sítím 4 mm a zachycená na sítu 0,063 mm se obdobně vzorek propláchl k odplavení drobných částic a odstranila se zrna zachycená na síti 4 mm. Zkušební navážka se uložila do pyknometru s vodou o teplotě cca 20 °C, odstranily se bubliny potřepáním a nechala se plně nasáknout po dobu 24 hodin. Nasáklá zkušební navážka se následně rozprostřela na plechový táč a pomocí fénu se vystavila proudu horkého vzduchu, aby se odpařila povrchová vlhkost. Vzorek se promíchával špachtlí, aby došlo k rovnoměrnému vysušení. Vysoušení probíhalo až do doby, kdy nebyla vidět žádná povrchová vlhkost, a jednotlivá zrna kameniva se nelepila k sobě. Velký důraz se musel dát na sílu proudu vzduchu, protože fénování z bližší vzdálenosti způsobovalo v pozdější fázi vysoušení odfukování jemných částic vzorku a tím mohlo dojít ke snížení přesnosti výsledku. K posouzení, zda bylo dosaženo povrchového vysušení, se odebral menší vzorek a naplnila se jím kuželová forma, která byla položena svým větším průměrem na podkladní desku. Po naplnění se vzorek upěchoval 25 dopady „improvizovaného“ pěchu (namísto ocelového pěchu posloužila násada na kladívko) na horním povrchu formy. Po upěchování se vzorek nedoplňoval. Forma se opatrně zvedla, a pokud se kužel kameniva nerozpadl, sušení pokračovalo, v opačném případě se pokračovalo zvážení hmotnosti nasáklé a povrchově vysušené zkušební navážky M_1 a umístěním do sušárny o teplotě 110 °C do ustálení hmotnosti. Provedlo se zvážení hmotnosti vysušené zkušební navážky a vypočítala se nasákavost kameniva WA_{24} ponořeného 24 hodin ve vodě podle vztahu (7).



Obr. 24 Zkušební navážka ponořená v pyknometru po 24 hodin do vody



Obr. 23 Vysoušení frakce 0/4 pomocí fénu



Obr. 25, 26, 27 Vlevo kuželová forma s podkladní deskou a pětím; uprostřed vzorek stále povrchově vlhký; vpravo vzorek po povrchovém uschnutí a připravený do sušárny



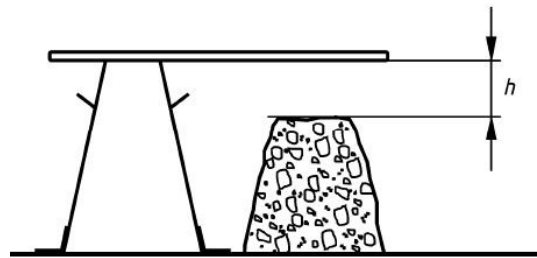
Obr. 28 Kamenivo frakce 8/16 a 11/22 ponecháno povrchově uschnout na suchých utěrkách

4.2. Zkouška sednutí kužele

Zkouška sednutí kužele byla provedena podle normy ČSN EN 12350-2 [24]. Účelem zkoušky je zjištění konzistence čerstvého betonu a tím jeho zpracovatelnosti (vlastnost čerstvého betonu se pohybovat a být zhutňován).

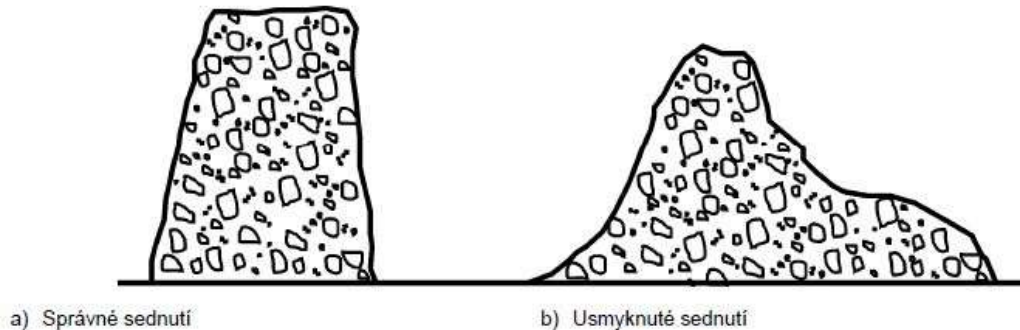
Postup zkoušky byl následující. Na ocelovou navlhčenou desku se umístila forma ve tvaru komolého kužele (tzv. Abramsův kužel) o přesných rozměrech s tolerancí ± 2 mm – průměr dolní základny 200 mm, průměr horní základny 100 mm a výška kužele 300

mm. Navlhčená forma se přišlápla k desce a ve třech vrstvách se naplnila pomocí lopatky a násypky betonovou směsí. Postup odběru vzorku se řídil normou ČSN EN 12350-1. Betonová směs byla v průběhu zhutňována vždy 25 vpichy ocelovou tyčí, které byly rozloženy rovnoměrně po průřezu zhutňované vrstvy. Po naplnění se horní povrch zarovnal a odstranil se přebytečný beton. Forma se svislým pohybem bez otáčení zvedla v čase cca tři sekund a následně se zaznamenala výška sednutí (h) s přesností na 10 mm, naměřená od horní hrany formy po nejvyšší bod sednutého zkušebního vzorku (Obr. 29). Výška sednutí se měřila pomocí metru s přesností 1 mm. Po změření hodnoty se deska s formou očistily a připravily k dalšímu použití.



Obr. 29 Měření výšky sednutí (h) (zdroj: [24])

Norma udává, že výsledek je platný pouze v případě, kdy dojde ke skutečnému sednutí zkušebního tělesa (Obr. 30 a). V případě, kdy dojde k usmyknutí (Obr. 30 b), je nutné zkoušku opakovat s jiným vzorkem. Pokud dojde k opětovnému usmyknutí, zkouška sednutím kužele je pro zjištění konzistence nevhodná a je nutné použít jinou.



Obr. 30 Způsoby sednutí (zdroj: [24])

Výsledkem zkoušky je zařazení do pěti různých stupňů konzistence, podle naměřené výšky sednutí (Obr. 31)

Právě konzistence hraje velkou roli ve výsledném vodním součiniteli betonové směsi a tudíž i ve výsledné pevnosti betonu. Na stavbách často dochází k dodatečnému přidání vody a to z důvodu dosažení lepší zpracovatelnosti. Motivací může být ulehče-

Stupeň	Sednutí v mm
S1	10 až 40
S2	50 až 90
S3	100 až 150
S4	160 až 210
S5 ¹⁾	≥ 220

Obr. 31 Stupně konzistence a sednutí kužele (zdroj: [10])

ní si práce ze strany dělníků stavby, ale i špatný návrh stupně konzistence ze strany projektanta, který tuto specifikaci bere jako nedůležitou nebo jen špatně zhodnotí proveditelnost jím navržené konstrukce a stavba pak může narazit na obtíže s ukládáním a probetonováním celé konstrukce hlavně v místech, kde je obtížné zhutnění betonu pomocí vibrace. Zlepšení zpracovatelnosti při zachování stejné pevnosti betonu bude vždy provázet zvýšení ceny betonové směsi za m^3 a to ať už se jedná o způsob přidáním vody a vyšší dávky cementu nebo použití chemických přísad - plastifikátorů. Proto také může docházet k záměrnému objednání levnějšího betonu s horší konzistencí odběratelem a následnému naředění vodou na stavbě.

Pro ilustraci si uvedeme jednoduchý numerický příklad. Uvažujme betonovou směs s požadovanou konzistencí S3, maximálním zrnem kameniva 25 mm a použitým cementem CEM II 42,5N. Požadovaná pevnost v tlaku daná statickým výpočtem je 30 MPa. Použijeme Lyseho pravidlo pro stanovení dávky záměsové vody a z Tab. 1 vezmeme hodnotu 210 kg/m^3 (uvažujme tuto hodnotu jako účinný obsah vody). Dále odečteme z grafu na Obr. 6 hodnotu vodního součinitele pro pevnost 30 MPa po 28 dnech: $v/c = 0,69$, a vypočítáme dávku cementu $c = v / 0,69 = 210 / 0,69 = 290 \text{ kg/m}^3$. Takto připravená směs je dodána autodomíchávačem na stavbu a za vlastnosti betonu se zaručuje výrobce (v tomto případě betonárna). Na stavbě je poté zjištěno, že konzistence betonu je příliš tuhá a nelze jí efektivně uložit do bednění a následně zhutnit. Důvodem může být např. velmi hustá výztuž prvku. Na místo objednání nové dávky betonu s lepší konzistencí se stavba rozhodne jednat na místě a přidá do autodomíchávače 15 kg/m^3 (pro dosažení konzistence S5 dle Lyseho pravidla), ale obsah cementu zůstane stejný. Tento počín změní hodnotu vodního součinitele na: $v/c = 225 / 290 = 0,78$. Následně odečteme pomocí grafu na Obr. 6 pevnost v tlaku po 28 dnech a získáváme hodnotu kolem 22 MPa. Jak je vidět z příkladu, po přidání 15 litrů vody na m^3 by teoreticky měla klesnout pevnost v tlaku po 28 dnech o 8 MPa a to již může mít rozhodující vliv na únosnost i trvanlivost konstrukce.

4.3. Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

Stanovení objemové hmotnosti proběhlo podle normy ČSN EN 12350-6 [25]. Měření se provádělo současně se zkouškou sednutí kužele a následně se začal ukládat beton do forem. Objemová hmotnost poslouží dále při výpočtu účinného obsahu vody na jednotku objemu (litr/m^3).

K měření objemové hmotnosti čerstvého betonu byla použita vodotěsná nádoba známého objemu ($V = 8$ litrů) a známé hmotnosti v prázdném stavu ($m_1 = 3,95$ kg), která byla zvážená předem na vynulované váze. Následně se nádoba naplnila čerstvým betonem a zhutnila na vibračním stole. Mírné sednutí betonu bylo doplněno a zarovnáno zednickou lžící s okrajem nádoby. Následně se naplněná nádoba betonem opět zvážila a zaznamenala se hmotnost (m_2).

Výpočet objemové hmotnosti se vypočte z následujícího vztahu:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (8)$$

kde je: D objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m^3];
 m_1 hmotnost prázdné nádoby [kg];
 m_2 hmotnost naplněné nádoby zhutněným betonem [kg];
 V objem nádoby [m^3].

4.4. Stanovení obsahu vody v čerstvém betonu

Pro stanovení hmotnostního obsahu vody čerstvého betonu byly pro experiment použity dvě metody.

První metoda spočívala v odebrání vzorku, který se umístil na plechový tác o předem zvážené hmotnosti (M_1), následně se zvážila hmotnost vzorku s plechovým tácem (M_2), hmotnost navážky byla vždy 1000 g, poté se vzorek vložil na dobu 24 hodin do sušárny o teplotě 110 °C. Po vyndání ze sušárny se nechal plechový tác se vzorkem zchladnout a zvážila se hmotnost po vysušení (M_3). Z jednoduchého rozdílu zvážených hmotností se zjistí hmotnostní obsah vody v čerstvém betonu:

$$R = (M_2 - M_1) - (M_3 - M_1) \quad (9)$$

kde je: R hmotnostní obsah vody v čerstvém betonu [g];
 M_1 hmotnost nádoby [g];
 M_2 hmotnost nádoby se vzorkem [g];
 M_3 hmotnost po vysušení [g].

Tato metoda je zmíněná v normě ČSN 73 1314 [26] spolu s metodou, kde se obsah vody v čerstvém betonu zjistí ze změny chemické koncentrace standardního roztoku chloridu sodného, který se smíchá se zkušební navážkou. Tyto dvě metody jsou v normě uvedeny jako jedny z použitelných.

Druhá metoda spočívala ve vysoušení kameniva nad hořákem. Opět se odebrala zkušební navážka, tentokrát o hmotnosti 5000 g, uložila se do plechové nádoby (M_1) a zvažila spolu s nádobou (M_2). Následně se začal vzorek vysoušet nad plynovým hořákem a v průběhu se promíchával špachtlí, aby docházelo k rovnoměrnému vysoušení vzorku a zároveň aby se beton “nepřipaloval” k nádobě. Zda je zkušební navážka zcela vysušena se zjišťovalo pomocí sklíčka, které se přiložilo



Obr. 32 Zcela vysušený vzorek nad hořákem

nad vysušený vzorek a sledovalo se, jestli se sklíčko zamlží od vypařované vody. V případě, že na sklíčku žádná voda nezkondenzovala, vzorek se dal považovat za zcela vysušený, nechal se zchladnout na teplotu okolí a zvažila se jeho hmotnost po vysušení (M_3). Hmotnostní obsah vody se dále zjistí opět ze vztahu (3). Jisté úskalí této zkoušky tkví v promíchávání zkušebního vzorku během vysoušení, protože docházelo k prášení jemných částic a tím mohou být získané výsledky negativně ovlivněny.

Výsledky obou použitých metod se s vysokou pravděpodobností budou lišit. Z hlediska získaných výsledků předpokládám, že metoda první, vysoušení v sušárně, by měla přinést přesnější výsledky než metoda vysoušení nad hořákem. Porovnání výsledků obou metod bude uvedeno v dalších kapitolách.



Obr. 33 Vysoušení zkušební vzorku v sušárně o teplotě 110 °C



Obr. 34 Vysoušení zkušební vzorku nad plynovým hořákem

4.5. Měření pevnosti v tlaku zkušebních těles

Zkouška pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu proběhla podle normy ČSN EN 12390-3 [27]. Pevnost v tlaku se zkoušela na všech vyrobených zkušebních vzorcích, tedy 24 těles o tvaru krychle vyhovující požadavkům normy ČSN EN 12390-1 [28] se zvoleným rozměrem hrany krychle $d = 150$ mm. Zkušební tělesa byla vyrobena v souladu s normou ČSN EN 12350-1 [29] a ČSN EN 12390-2 [30].

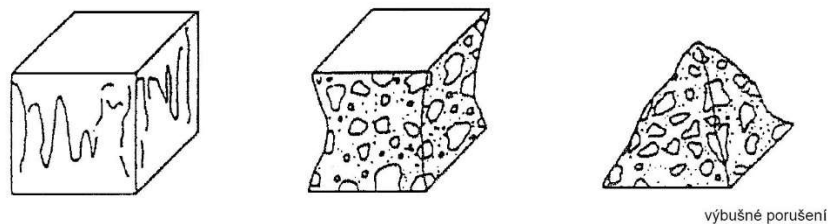
Prvně se zkontrolovalo, zda zkušební tělesa nepřekračují dovolené odchylky rozměrů ploch od zvoleného rozměru. Následně se připravil zkušební lis, dotykové plochy tlačných desek lisu se očistily od uvolněného materiálu z předchozích zkoušek a jiných

nečistot a ořely se hadříkem, totéž se udělalo s plochami zkušebních těles. Krychle se osadily do lisu tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu a umístily se na střed spodní tlačné desky. V lisu se nastavil rozměr tlačené plochy vypočtené ze zvoleného rozměru zkušebního tělesa ($A_c = 150 \cdot 150 = 22\,500 \text{ mm}^2$) a konstantní rychlost zatěžování 0,6 MPa/s. Vzorek se zatěžoval do porušení a následně se zaznamenala maximální síla F v kN. Pevnost v tlaku se získá ze vztahu:

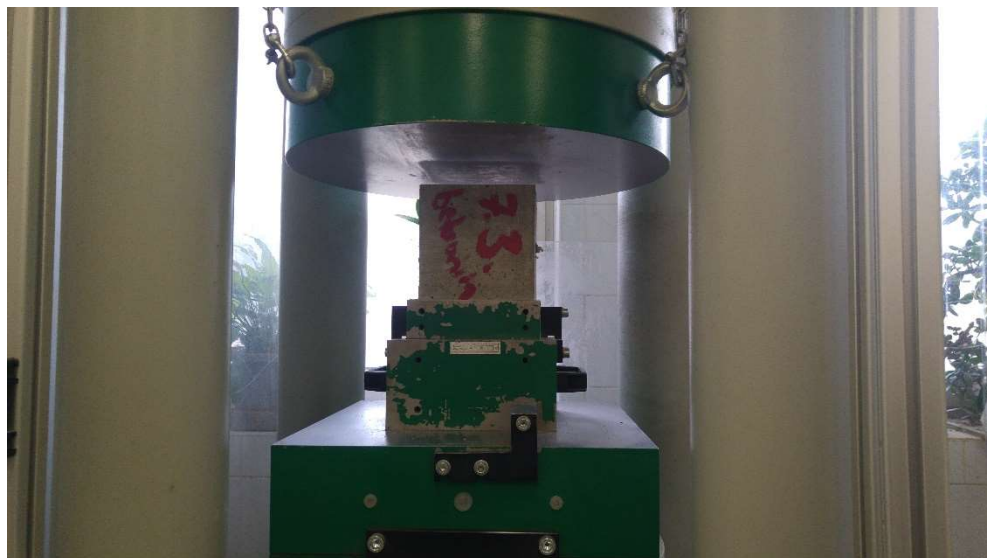
$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (10)$$

kde je: f_c pevnost v tlaku [MPa]
 F maximální síla při porušení tělesa [N]
 A_c průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku [mm^2]

Všechna porušení vzorků byla v souladu s vyhovujícími způsoby porušení, které jsou popsány v normě (viz Obr. 35) a k nevyhovujícím způsobům porušení nedošlo.



Obr. 35 Vyhovující způsoby porušení zkušebních krychlí (zdroj: [27])



Obr. 36 Zkušební těleso před zatížením zkušebním lisem

5. Experimentální část

5.1. Úvod

Tématem bakalářské práce je úbytek záměsové vody v čerstvém betonu během dopravy na stavbu, hlavní náplní praktické části je vyrobit čerstvé betonové směsi, na kterých se následně provede řada měření a zkoušek, které přinesou konkrétní hodnoty několika vlastností betonu získaných za různých podmínek, mimo jiné i úbytek záměsové vody v čerstvém betonu a její dopad na pevnost ztvrdlého betonu po 28 dnech.

V první fázi experimentu bude v laboratoři provedena dvojice referenčních záměsí betonové směsi lišící se vstupní teplotou záměsové vody. Cílem jsou rozdílné teploty výsledných betonových směsí, tudíž i rozdílné podmínky pro vypařování záměsové vody z čerstvého betonu. Tímto krokem se

zjednodušeně simulují podmínky, které mohou nastat při betonáži za letních horkých dnů, kde jsou jednotlivé složky betonové směsi vystaveny vyšším teplotám a ohřívány, ať už to je kamenivo na skládce vystavené přímému slunečnímu záření, či uložení jednotlivých složek v silách, které jsou ohřívány kondukcí (výměnou tepla vedením) mezi maticí



Obr. 37 Sila betonárny vystavená slunečnímu záření během letních dní (zdroj: [34])

konkrétní složky a rozpálenou stěnou sila. Výsledná betonová směs má pak tedy vyšší teplotu. Nasimulování okolních podmínek (např. teplota ovzduší a relativní vlhkost) by z technologických důvodů už bylo náročnější, proto v tomto experimentu budou zanedbány. U každé záměsi budou odebrány vzorky v čase 5, 45 a 90 minut po ukončení hlavního míchacího cyklu, na kterých se vždy provedou zkoušky čerstvého betonu a vyrobí tři zkušební tělesa pro zkoušku pevnosti ztvrdlého betonu v tlaku po 28 dnech. Jednotlivé zkoušky jsou popsány v kapitole 4.

V druhé fázi experimentu se provede praktický pokus, při kterém se odebere vzorek před odjezdem autodomíchávače s dávkou betonu na stavbu (cca 5-10 minut po ukončení hlavního míchacího cyklu) a následně další vzorek po transportu dávky betonu odebraný přímo na stavbě (cca 45 – 90 minut po ukončení hlavního míchacího cyklu,

záleží na vzdálenosti stavby od betonárny). Na obou vzorcích pak budou provedeny stejné zkoušky a měření jako na záměsích vyrobených v laboratoři, získané výsledky se porovnají a okomentují.

Hypotéza experimentu je následující. S rostoucím časem bude růst množství odpařené vody z čerstvého betonu a tím i pevnost ztvrdlého betonu po 28 dnech následkem snižujícího se vodního součinitele. Předpokládané množství odpařené vody je však minimální až nulové, zejména u záměsi s běžnou teplotou betonu, ale také u pokusu odběru vzorků betonárna-stavba, jelikož se experiment prováděl v zimním období a teploty ovzduší se pohybovaly okolo 5 °C, z toho vyplývá menší množství odpařené vody, dáno nižší teplotou okolí i betonu. Dalším omezujícím parametrem je časové vystavení procesu vypařování. Z praktického hlediska je doba 45 až 90 minut, co se dávka betonu transportuje na stavbu, zanedbatelná a záleží až na následném ošetřování v průběhu tuhnutí a zrání betonu. Trochu odlišné výsledky by mohla přinést záměs s vyšší teplotou betonové směsi. Od experimentu nejsou očekávány průlomové objevy, jelikož problematika vypařování vody z čerstvého betonu je velmi komplexní záležitost závislá na mnoha jevech a experimenty pro účely této bakalářské práce jsou výrazně zjednodušeny.

Všechna měření a zkoušky probíhaly v akreditované laboratoři společnosti BETOTECH, s.r.o. v Berouně pod dohledem Ing. Stanislava Smiřinského a Ing. Vladimíra Veselého s pomocí Ing. Pavla Veselého. S prováděním experimentu pomáhali zkušení laboranti Luboš Prošek a Viktor Hirner.

5.2. Složení betonové směsi

Záměsi provedené v laboratoři se řídily složením betonové směsi, které bylo plánováno pro betonáž stavby, kde se následně prováděl pokus betonárna-stavba.

Kamenivo bylo použito ve složení: hrubé drcené kamenivo ve frakcích 8/16 a 11/22 z Holého vrchu a drobné těžené kamenivo ve frakci 0/4 z Kaznějova.

Cement použitý v receptuře byl třídy CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N. Tedy portlandský směsný cement s příměsí strusky a vápence o celkovém obsahu organického uhlíku vyšším než 0,2 %, s běžným nárůstem minimální pevnosti 42,5 MPa.

Záměsová voda byla použita pitná z vodovodu laboratoře.

Příměs byla použita ve formě popílku.

Přísada pro zlepšení zpracovatelnosti byla použita ve formě superplastifikátoru STACHEMENT S 35.

V následující tabulce je uvedeno množství jednotlivých složek v kg/m^3 předpokládané receptury betonu určeného pro odvoz k betonáži na stavbě a přepočítané množství pro záměsi v laboratorní míchačce. V laboratoři bylo pro každou záměs namícháno 45 litrů betonové směsi, množství vycházelo z potřeby materiálu na všechny plánované zkoušky a výrobu zkušebních těles.

Tab. 3 Předpokládané složení betonu na 1 m^3 (stavba) a 45 litrů (záměs v laboratoři)

Složky betonové směsi		Složení betonu na m^3	Složení betonu na $0,045 \text{ m}^3$
Kamenivo [kg]	0/4	818	36,8
	8/16	585	26,3
	11/22	352	15,8
Cement [kg]		330	14,9
Záměsová voda [kg]		171	7,7
Popílek [kg]		60	2,7
Plastifikátor [kg]		0,7	0,0315

Vypočítaná objemová hmotnost z receptury na stavbu $2316,7 \text{ kg/m}^3$.

Množství záměsové vody je zde pouze orientační, jelikož pokus betonárna-stavba se z důvodu časových možností konal až po skončení obou experimentů v laboratoři. Termín byl ovlivněn hlavně možností odběru vzorku z jedné dávky betonu určeného na stavbu, betonáž musela být dostatečně veliká a stavba musela být v rozumné vzdálenosti od betonárny, aby vyhověla našim požadavkům pro realizaci pokusu (vzdálenost stavby od betonárny alespoň okolo 45 minut). Druhým ovlivňujícím faktorem bylo nepříznivé počasí v období provádění experimentů, jelikož se první plánovaný termín pokusu musel odložit z důvodu mrazů. Správný postup by bylo nejdříve udělat pokus betonárna-stavba a následně experimenty v laboratoři, aby bylo zajištěno totožné složení betonových směsí a výsledky se daly mezi sebou lépe porovnávat, ale pro účely tohoto experimentu se spokojíme i s touto variantou. Hlavním předmětem sledování tohoto experimentu je množství odpařené vody z čerstvého betonu za různých podmínek a k tomu nemusí být betonové směsi nutně totožné.

Množství záměsové vody dodané na stavbu se řídilo konzistencí betonové směsi, která byla požadována stupně S4 (hodnota sednutí 160 – 210 mm). Požadované konzistence se dosáhlo přidáním vody k již předepsanému množství vody v receptuře v momentě míchání dávky betonu na stavbu. Toto množství vody bylo ovšem v čase konání experimentů neznámé, proto vznikl rozdíl v množství záměsové vody v jednotlivých betonových směsích. Jak u pokusu betonárna-stavba, tak u experimentů v laboratoři byla přidána voda k původní receptuře k dosažení požadované konzistence S4. Rozdíly jsou uvedeny v následující tabulce, 45 litrové záměsi jsou přepočítány na m³.

Pro snazší identifikaci jednotlivých směsí a zkrácení textu jejich popisem budou dále používány následující zkratky:

- Záměs betonové směsi s normální teplotou – NT
- Záměs betonové směsi s vyšší teplotou – VT
- Pokus betonárna-stavba – BS

Tab. 4 Rozdíly v množství záměsové vody pro jednotlivé záměsi

Záměs (označená zkratkou)	NT	VT	BS
Přidáno vody oproti receptuře [kg]	0,6	1	9
Reálná dávka záměsové množství vody v 0,045 m ³ [kg]	8,3	8,7	-
Reálná dávka záměsové vody v 1 m ³ [kg]	184,4	193,3	180

Jak je patrné z tabulky, množství záměsové vody v jednotlivých směsích se liší, v případě VT a BS dokonce až o 13 litrů. Takový rozdíl už může mít znatelný dopad na vodní součinitel a tím i na pevnost v tlaku ztvrdlého betonu po 28 dnech (jak již bylo ukázáno na příkladu v kapitole 4.2). Můžeme tedy předpokládat, že výsledné pevnosti jednotlivých směsí se budou lišit. Ačkoliv u všech směsí bylo docíleno stejné konzistence v prvních 10 minutách (sednutí 160 mm – viz dále), množství záměsové vody je jiné. Hlavním důvodem tohoto rozdílu bude odlišná vlhkost použitého kameniva. Kamenivo použité do záměsi BS se nacházelo před použitím ve venkovním prostředí a poté v síle, zatímco kamenivo pro záměsi NT a VT bylo před použitím uloženo v laboratoři, kde je vlhkost prostředí podstatně nižší, k tomu přispěl i tající sníh v období provádění experimentu. Čísla této hypotézy odpovídají, na záměs BS bylo po-

užito nejmenší množství vody (kamenivo z venku je vlhké a voda v pórech kameniva snižuje množství záměsové vody nutné pro dosažení požadované konzistence). Rozdíl v množství použité vody mezi záměsí NT a VT už je méně jasný, neboť kamenivo pro obě záměsi se před použitím nacházelo v laboratoři stejně dlouhou dobu a proto by vlhkost kameniva měla být totožná. Jeden ovlivňující faktor může být vyšší rychlost odpařování teplejší vody, kdy se mezi odvážením dávky vody a ukončením hlavního míchacího cyklu stihlo odpařit více vody než u záměsí NT. Dalším ovlivňujícím faktorem mohlo být dokonalejší omytí povrchu zrn kameniva vlivem teplejší vody, uvolnění jemných částic a tím větší potřeba vody v důsledku zvýšení měrného povrchu kameniva. Dále mohlo být na záměs odebráno kamenivo o celkovém menším průměru velikosti zrn kameniva (opět zvýšení měrného povrchu) a větší pórovitosti. Kombinace všech těchto faktorů mohla způsobit rozdílný celkový obsah vody záměsí NT a VT o 4 dcl (cca 5 %). Uvedené důvody vysvětlující tento možný rozdíl jsou pouze úvahy autora práce a nejsou podloženy žádnou studií.

5.3. Použité přístroje při experimentech

Pro účely experimentu byly použity tyto laboratorní přístroje:

- Pro zkoušku nasákavosti kameniva a vysoušení čerstvého betonu pro zjištění množství vody bylo použita sušárna od firmy Memmert.
- Pro zkoušky pevnosti v tlaku zkušebních těles byl použit lis od firmy FORM + TEST typ Alpha 4-3000 o maximálním zatížení silou v tlaku 4 000 kN.
- Pro záměsí NT a VT prováděné v laboratoři byla použita laboratorní míchačka s obsahem až 70 litrů.
- Pro vážení všech vzorků byla použita digitální váha od firmy KERN IKT s přesností vážení na 0,1 g.
- Pro povrchové vysušení kameniva frakce 0,063 – 4 mm byl použit fén od firmy Philips.

Jelikož se experimenty konaly v akreditované zkušební laboratoři společnosti BETOTECH, s.r.o. v Berouně, byly všechny zkušební přístroje běžně používané pro různé zkoušky betonu v době konání experimentů akreditovány.



Obr 38, 39 Vlevo sušárna, vpravo lis pro zkoušky pevnosti v tlaku



Obr. 40, 41 Vlevo laboratorní míchačka, vpravo digitální váha

5.4. Postup a popis experimentu

S prvními pracemi na experimentu se začalo v pátek 2. 3. 2018, kdy byl pouze navezen potřebný materiál pro obě záměsi experimentu a kamenivo se přes víkend nechalo oschnout od venkovní vlhkosti. Zároveň se odebraly vzorky všech frakcí kameniva potřebné pro zkoušku nasákavosti a ponořily se do pyknometru s vodou.

V pondělí 5. 3. 2018 se prvně dokončily zkoušky nasákavosti všech frakcí kameniva, konkrétně jejich povrchové usušení a vzorky se vložily do sušárny (podrobný popis celé zkoušky viz kapitola 4.1). Následně se pokračovalo s přípravou první záměsi o normální teplotě betonu (NT), navázilo se přesné množství jednotlivých složek potřebné k záměsi, vymazaly se plastové formy pro výrobu zkušebních



Obr. 42 Vysychající navážka kameniva pro plánované záměsi

krychlí odbedňovacím prostředkem a otvory pro budoucí odformování se ucpaly pěnovou hmotou. Dále se připravily pomůcky pro plánované zkoušky čerstvého betonu, konkrétně se prováděla zkouška sednutí kužele, měřila se objemová hmotnost čerstvého betonu a provádělo se vysoušení nad hořákem a v sušárně pro zjištění obsahu vody čerstvého betonu. Popis všech prováděných zkoušek viz kapitola 4.

Před samotným namícháním záměsi se buben míchačky a její lopatky navlhčily houbičkou, aby se eliminovala absorpce vody suchým povrchem míchačky. Vše je připraveno a může se v čase 12:01 přistoupit k samotnému experimentu. Změřila se teplota vstupních složek záměsi, ta se rovnala teplotě prostředí, jelikož všechny materiál byl uložený přes víkend v laboratoři a teplota prostředí byla 20 °C. Do míchačky se nasypalo kamenivo s cementem a krátce promíchalo, poté se přidala voda s plastifikátorem a celá betonová směs se důkladně propíchala.

Dále se experiment řídil přesným rozvrhem uvedeným v Tab. 3. Pro zkoušku pevnosti betonu v tlaku bylo ze záměsi vyrobeno celkem 9 zkušebních krychlí o hraně $d = 150$ mm. Odběr vzorků se řídil normou ČSN EN 12350-1 [29] a výroba s ošetřováním zkušebních těles byla v souladu s ČSN EN 12390-2 [30]. Zhutnění betonové směsi pro-

bíhalo na vibračním stole v několika vrstvách, aby bylo docíleno náležitého zhutnění. Po naplnění všech tří forem se vzorky označily, zakryly se víkem a nechaly se ve formách po následujících 24 hodin při normové teplotě $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

Tab. 5 Rozvrh experimentu

5. minuta	Změření teploty betonu a prostředí, konzistence a objemové hmotnosti čerstvého betonu; zhotovení 3 těles pro zkoušku pevnosti v tlaku; odběr vzorku na vysušení v misce nad hořákem a v sušárně
5. – 40. minuta	Zvážení vzorků pro vysušení; umístění vzorku do sušárny a vysoušení vzorku v misce nad hořákem; zvážení vzorku po vysušení nad hořákem
20. minuta	Promíchání zbylého betonu v míchačce
40. minuta	Promíchání zbylého betonu v míchačce
45. minuta	Změření teploty betonu a prostředí, konzistence a objemové hmotnosti čerstvého betonu; zhotovení 3 těles pro zkoušku pevnosti v tlaku; odběr vzorku na vysušení v misce nad hořákem a v sušárně
50. – 85. minuta	Zvážení vzorků pro vysušení; umístění vzorku do sušárny a vysoušení vzorku v misce nad hořákem; zvážení vzorku po vysušení nad hořákem
65. minuta	Promíchání zbylého betonu v míchačce
85. minuta	Promíchání zbylého betonu v míchačce
90. minuta	Změření teploty betonu a prostředí, konzistence a objemové hmotnosti čerstvého betonu; zhotovení 3 těles pro zkoušku pevnosti v tlaku; odběr vzorku na vysušení v misce nad hořákem a v sušárně
90. – 125. minuta	Zvážení vzorků pro vysušení; umístění vzorku do sušárny a vysoušení vzorku v misce nad hořákem; zvážení vzorku po vysušení nad hořákem



Obr. 43 Vymazávání forem odbedňovacím prostředkem



Obr. 44 Odlitá zkušební tělesa ve formách a přikrytá víkem

Následující den v úterý 6. 3. 2018 se po příchodu odformovaly vzorky z předchozího dne pomocí stlačeného vzduchu v kompresoru a uložily se do místnosti s ideálními podmínkami pro zrání betonu, $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a relativní vlhkost $\geq 95\%$. Zároveň se zvážily vzorky po vysušení v sušárně. Dále se přistoupilo k přípravě druhé záměsi VT se zvýšenou teplotou. Požadovaná teplota čerstvého betonu záměsi byla alespoň 27 °C . Tuto hodnotu uvádí předpis ŘSD TKP 18 jako mezní teplotu čerstvého betonu při ukládání [21]. K ohřátí betonové směsi na požadovanou teplotu se použila horká záměsová voda. Orientační teplota vody nutná k ohřátí betonové směsi byla spočítána pomocí vzorce (6) uvedeného v kapitole 3.1. Teploty ostatních složek se uvažovaly 20 °C , neboť byly před experimentem uloženy v laboratoři a jejich teplota byla ustálená s teplotou okolí. Hmotnosti jednotlivých složek jsou uvedeny v Tab. 3. Úpravou a dosa-

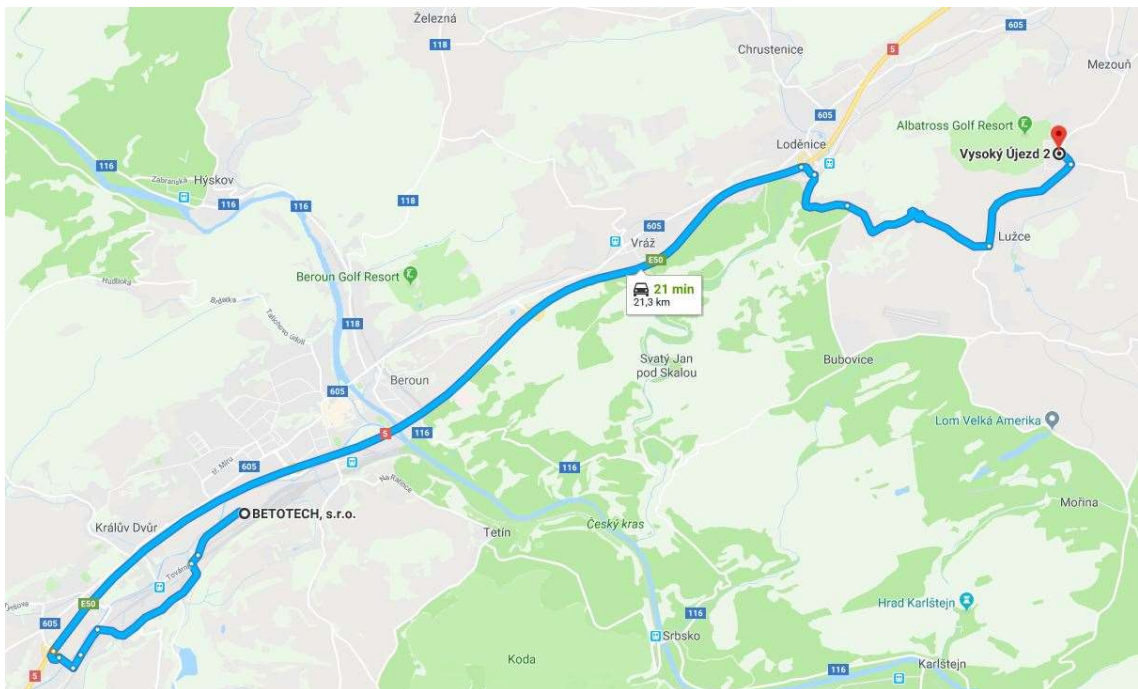
žením do vztahu (6) dostaneme orientační teplotu záměsové vody nutnou k ohřátí betonové směsi:

$$T_V = \frac{27 \cdot [0,84 \cdot (14,85 + 2,7 + 78,9) + 4,2 \cdot 7,69] - 0,84 \cdot (14,85 \cdot 20 + 2,7 \cdot 20 + 78,9 \cdot 20)}{4,2 \cdot 7,69} = 44,5^\circ\text{C}$$

Voda použitá pro záměs byla natočena z vodovodu laboratoře a reálná teplota vody byla z realizačních důvodů 55 °C, ladit vodu přesně na 44,5 °C by bylo zdlouhavé a pro účely tohoto experimentu bylo dosažení přesné teploty 27 °C nepodstatné, hlavním cílem bylo mít teplotu vyšší než u záměsi NT a tím vytvořit rozdílné podmínky pro vypařování vody z čerstvé betonové směsi. Teplota po namíchání betonové směsi byla 35 °C, to dokazuje, že vztah pro výpočet teploty vody nutné pro ohřev betonové směsi byl pouze orientační, protože pokud dosadíme reálně použitou teplotu vody, vychází teplota čerstvého betonu 30 °C. Voda o teplotě 60 °C se nalila i do míchačky a po krátkou chvíli se v ní zamíchala, aby došlo k ohřátí bubnu a lopatek míchačky, teplota povrchu bubnu míchačky byla 55 °C, k měření byl použit laserový teploměr. Následně se v čase 9:34 přistoupilo k namíchání záměsi VT, postup a rozvrh experimentu byl stejný jako v případě záměsi NT, postup je popsán v předchozích odstavcích a rozvrh je uvedený v Tab. 5. Navíc byla měřena laserovým teploměrem povrchová teplota betonové směsi a vpichovým teploměrem teplota uvnitř betonové směsi, měření probíhalo v intervalu 10 minut. Dále je nutné zmínit, že buben míchačky byl v době mezi jednotlivými zkouškami přiklopený a odvod vypařené vody probíhal pouze skrz otevřený plnicí otvor, stejně jako při přepravě betonu u autodomíchávačů.

Poslední den experimentální části, středa 7. 3. 2018, byl vyhrazený pro pokus betonárna-stavba. Po příjezdu do laboratoře se opět prvně odformovaly zkušební tělesa z předchozího dne, uložily se ke zrání a zvážily se vzorky po vysušení v sušárně. Následně se muselo počkat na odjezd správné dávky betonu na stavbu. Betonáž se konala na stavbě ve Vysokém Újezdě, kde probíhá výstavba projektu Zámecké zahrady developerské skupiny CRESTYL real estate, s.r.o. Jedná se o výstavu řadových domů, bytů i moderních vil. Beton byl specifikovaný jako C 25/30 XC2 a byl použit pro betonáž podlah. V čase 9:15 byl ukončen míchací cyklus poslední záměsi a odebral se vzorek do kolečka přímo z autodomíchávače. Laborant pan Prošek se ujal zkoušení v laboratoři a v 9:20 začal provádět zkoušky. Autor práce s dalším laborantem, panem Hirnerem, se vydal následovat dávku betonu na stavbu. Trasa autodomíchávače na stavbu je znázor-

něna na Obr. 45. Čas odběru vzorku na stavbě byl 9:58, doba jízdy (od namíchání poslední záměsi na betonárně po příjezd na stavbu a odběr vzorků) tedy trvala cca 43 minut, to splňuje naši počáteční podmínku. Vzorky se odebraly opět přímo z autodomíchávače do věder a změřila se jejich teplota, následně se naložily do auta, zaizolovaly vrstvou molitanu a překryly plastovou fólií, aby se zamezilo dalšímu vypařování vody. Čas příjezdu zpět na betonárnu v Berouně byl 10:27 (doba jízdy: 29 minut). Beton se přelil z věder do kolečka a v čase 10:36 se začaly provádět zkoušky. Dále je nutné zmínit, že venkovní teplota se pohybovala okolo 3 °C a teplota betonu v momentě odbírání vzorků byla 14 °C. Podmínky pro odpařování vody tedy nebyly nejpříznivější a dá se předpokládat, že množství odpařené vody nebude velké.



Obr. 45 Trasa autodomíchávače na stavbu ve Vysokém Újezdu (zdroj: [31])

Ve dnech 2. - 4. 4. se provedly zkoušky pevnosti ztvrdlého betonu v tlaku po 28 dnech. Postup zkoušky je popsán v kapitole 4.5.



Obr. 46 Betonáž podlah na stavbě ve Vysokém Újezdu



Obr. 47, 48 Vlevo odběr vzorku na stavbě, vpravo připravená betonové směs na zkoušky po přepravě zpět do laboratoře

5.5. Výsledky experimentu

Výsledky měření budou prezentovány v podkapitolách odpovídajících jednotlivým záměsím. Čísla budou uvedena v tabulce a následně převedena do grafů pro lepší znázornění a porovnání výsledků všech záměsí, doplněné krátkým komentářem.

5.5.1. Nasákavost kameniva

Nasákavost kameniva WA₂₄ jednotlivých frakcí použitých do betonové směsi byla spočtena dle vztahu uvedeného v kapitole 4.1.

Tab. 6 Výsledky měření zkoušky nasákavosti kameniva

Frakce kameniva	Hm. před vysušením	Hm. po vysušení	Nasákavost kameniva	Obsah vody v kamenivu na 1 m ³ betonu
-	[g]	[g]	[%]	[kg]
0/4	1132	1127	0,44	3,6
8/16	2104	2099	0,24	1,4
11/22	3195	3186	0,28	1,0

Nasákavost použitého kameniva frakce 0/4 deklarovaná výrobcem v prohlášení o vlastnostech je 1,1 % [32]. Zjištěná hodnota nasákavosti je podstatně nižší, to může být způsobeno nepřesností měření, kdy mohlo dojít k odfouknutí většího množství jemných částic při povrchovém vysoušení. Zároveň mohlo dojít k přesušení vzorku při povrchovém vysoušení, zde hraje určitou roli nezkušenost autora práce s prováděním zkoušky. Přesná hodnota nasákavosti použitého kameniva frakcí 8/16 a 11/22 není v prohlášení o vlastnostech na stránkách výrobce kameniva uvedena [33]. Jedná se ale o horninu vápence, kde se nasákavost pohybuje mezi 0,2 – 0,6 % [16]. Opět zde může být lehká nepřesnost měření, způsobená subjektivní povahou zkoušky při vyhodnocování povrchového vysušení kameniva. Jestliže použijeme naměřené hodnoty nasákavosti, pak množství vody absorbované kamenivem je 6 kg/m³.

Nyní je ale nutné přiznat jeden nezanedbatelný nedostatek tohoto experimentu. Před výrobou záměsí NT a VT bylo opomenuto změření vlhkosti kameniva, které bylo pro použití do betonové směsi připraveno. Známe tedy množství vody, které se do kameniva vsákne, ale není známo, kolik vody v kamenivu před namícháním záměsí bylo, tudíž není ani možné stanovit celkový obsah vody v betonové směsi. Můžeme tedy pouze předpokládat, že u záměsí NT a VT bude celkový obsah vody po namíchání menší než dávka záměšové vody (voda se vsákne do kameniva), zatímco u pokusu BS bude celkový obsah vody větší než dávka záměšové vody (mokré kamenivo do záměsí přidá další vodu).

Pro pokus BS byla při výrobě dávky betonu naměřena vlhkost (množství vody) v písku $8,3 \text{ kg/m}^3$, o tuto hodnotu se tedy předpokládá nárůst obsahu vody po změření v čase t_5 . Pro hrubé kamenivo nebyla naměřena žádná vlhkost.

5.5.2. Záměs NT

Tab. 7 Výsledky měření teploty a zkoušek čerstvého betonu záměsi NT

Čas dle rozvrhu	Teplota vzduchu	Teplota betonu	Objemová hmotnost	Sednutí kužele
-	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[mm]
t_5	20	18,5	2328	160
t_{45}	20	18,0	2335	100
t_{90}	20	17,8	2348	80

Tab. 8 Úbytek záměsové vody z čerstvého betonu záměsi NT. Množství odpařené vody v čase t_i je stanoveno jako rozdíl obsahů vody v časech t_i a t_5 .

Způsob vysušení	Čas dle rozvrhu	Hm. nádoby	Hm. nádoby + vzorek	Hm. vzorku po vysušení	Obsah vody ve vzorku	Obsah vody v m ³	Množství odpařené vody
-	-	[g]	[g]	[g]	[g]	[kg]	[kg]
Nad hořákem	t_5	4014	9014	4616	384	178,8	0,0
	t_{45}	4014	9014	4616	384	179,3	-0,5
	t_{90}	4028	9028	4602	398	186,9	-8,1
V sušárně	t_5	978,3	1978,3	927	73	169,9	0,0
	t_{45}	985	1985	928	72	168,1	1,8
	t_{90}	978,6	1978,6	930	70	164,4	5,6

Tab. 9 Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu po 28 dnech záměsi NT

Čas dle rozvrhu	Zkoušený vzorek	Max. zatěžovací síla	Pevnost v tlaku po 28 dnech	Průměrná pevnost v tlaku po 28 dnech
-	-	[kN]	[MPa]	[MPa]
t_5	A	1249	55,5	54,4
	B	1205	53,5	
	C	1216	54,1	
t_{45}	A	1278	56,7	56,9
	B	1289	57,3	
	C	1273	56,6	
t_{90}	A	1277	56,7	57,3
	B	1266	56,3	
	C	1325	58,9	

5.5.3. Záměs VT

Tab. 10 Výsledky měření teploty a zkoušek čerstvého betonu záměsi VT

Čas dle rozvrhu	Teplota vzduchu	Teplota betonu	Objemová hmotnost	Sednutí kužele
-	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[mm]
t ₅	21,5	35,0	2251	160
t ₄₅	23,5	31,3	2305	50
t ₉₀	24	26,7	2317	30

Tab. 11 Úbytek záměsové vody z čerstvého betonu záměsi VT. Množství odpařené vody v čase t_i je stanoveno jako rozdíl obsahů vody v časech t_i a t₅.

Způsob vysušení	Čas dle rozvrhu	Hm. nádoby	Hm. nádoby + vzorek	Hm. vzorku po vysušení	Obsah vody ve vzorku	Obsah vody v m ³	Množství odpařené vody
-	-	[g]	[g]	[g]	[g]	[kg]	[kg]
Nad hořákem	t ₅	4020	9020	4610	390	175,6	0,0
	t ₄₅	4036	9036	4594	406	187,2	-11,6
	t ₉₀	4039	9039	4591	409	189,5	-14,0
V sušárně	t ₅	1004,8	2004,8	919	81	182,3	0,0
	t ₄₅	1003	2003	925	75	172,9	9,5
	t ₉₀	990	1990	928	72	166,8	15,5

Tab. 12 Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu po 28 dnech záměsi VT

Čas dle rozvrhu	Zkoušený vzorek	Max. zatěžovací síla	Pevnost v tlaku po 28 dnech	Průměrná pevnost v tlaku po 28 dnech
-	-	[kN]	[MPa]	[MPa]
t ₅	A	891	39,6	40,0
	B	902	40,1	
	C	907	40,3	
t ₄₅	A	1002	44,5	43,6
	B	1013	45,0	
	C	932	41,4	
t ₉₀	A	1049	46,6	47,2
	B	1108	49,2	
	C	1030	45,8	

5.5.4. Pokus BS

Tab. 13 Výsledky měření teploty a zkoušek čerstvého betonu při pokusu BS

Čas dle rozvrhu	Teplota vzduchu	Teplota betonu	Objemová hmotnost	Sednutí kužele
-	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[mm]
t ₅	22	14	2226	160
t ₄₅	-	-	-	-
t ₉₀	23	12,5	2250	140

Tab. 14 Úbytek záměsové vody z čerstvého betonu při pokusu BS. Množství odpařené vody v čase t_i je stanoveno jako rozdíl obsahů vody v časech t_i a t₅.

Způsob vysušení	Čas dle rozvrhu	Hm. nádoby	Hm. nádoby + vzorek	Hm. vzorku po vysušení	Obsah vody ve vzorku	Obsah vody v m ³	Množství odpařené vody
-	-	[g]	[g]	[g]	[g]	[kg]	[kg]
Nad hořákem	t ₅	4039	9039	4565	435	193,7	0,0
	t ₄₅	-	-	-	-	-	-
	t ₉₀	4047	9047	4567	433	194,9	-1,2
V sušárně	t ₅	1003	2003	916	84	187,0	0,0
	t ₄₅	-	-	-	-	-	-
	t ₉₀	696	1696	917	83	186,8	0,2

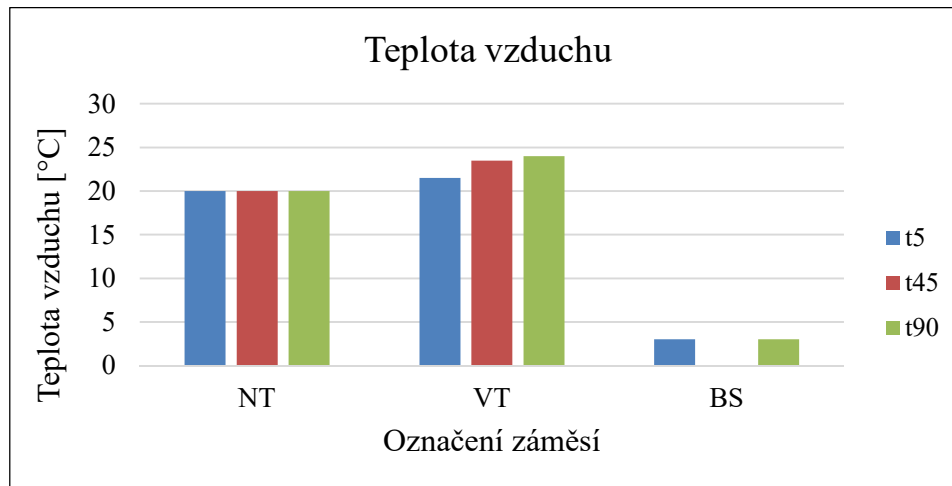
Tab. 15 Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu po 28 dnech při pokusu BS

Čas dle rozvrhu	Zkoušený vzorek	Max. zatěžovací síla	Pevnost v tlaku po 28 dnech	Průměrná pevnost v tlaku po 28 dnech
-	-	[kN]	[MPa]	[MPa]
t ₅	A	664	29,5	29,4
	B	643	28,6	
	C	675	30	
t ₄₅	A	-	-	-
	B	-	-	
	C	-	-	
t ₉₀	A	755	33,6	33,4
	B	750	33,2	
	C	750	33,3	

5.6. Porovnání výsledků a diskuze

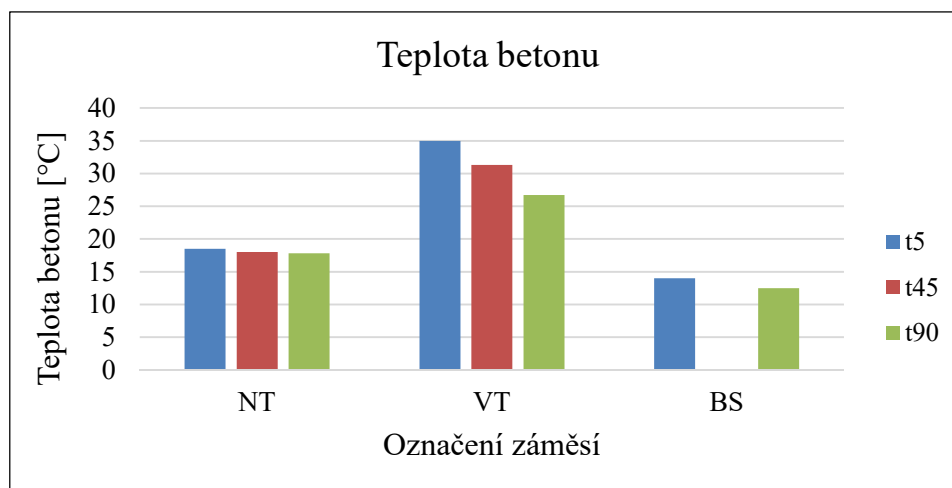
Výsledky uvedené v předcházející kapitole pro jednotlivé záměsi budou v této části vzájemně porovnány.

5.6.1. Teploty vzduchu a betonu

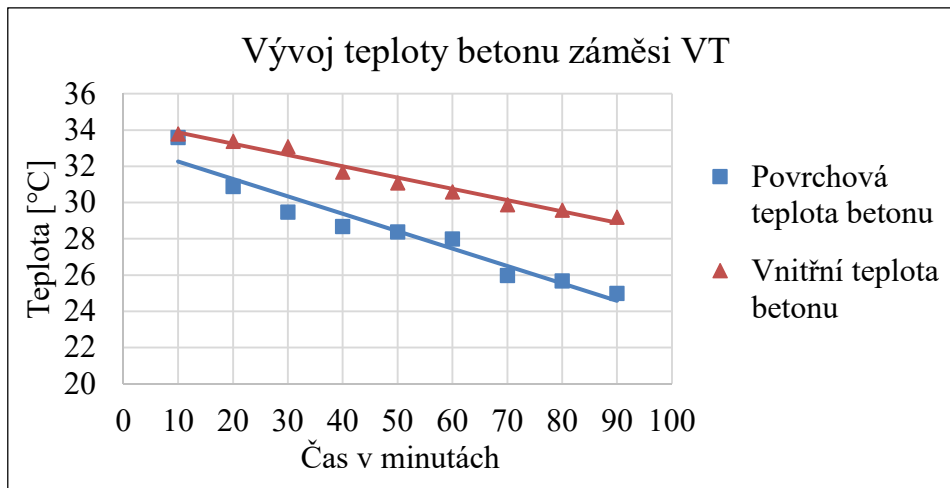


Obr. 49 Graf teploty okolního prostředí před provedením zkoušek čerstvého betonu jednotlivých záměsí v závislosti na čase měření

Uvedené teploty se vztahují k prostředí, ve kterém se betonová směs vyskytovala před konáním zkoušek čerstvého betonu, tedy jaké okolní podmínky, v tomto případě teplota, byly pro odpařování vody z betonové směsi. Záměsi NT a VT se celou dobu vyskytovaly v laboratoři, zatímco betonová směs u pokusu BS měla pro odpařování vody venkovní podmínky, zkoušky se ale konaly v laboratoři. Pro následné zrání betonu měly všechny vzorky tří záměsí stejné podmínky, pevnost betonu po 28 dnech by tedy neměla být ovlivněna okolním prostředím, pouze množstvím odpařené vody v průběhu zpracovávání betonu.



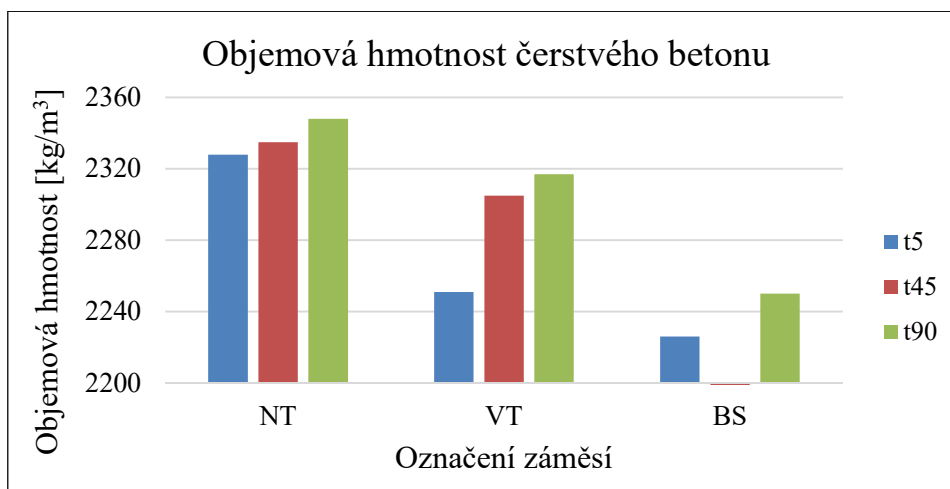
Obr. 50 Graf teploty betonu jednotlivých záměsí v závislosti na čase měření



Obr. 51 Graf vývoje povrchové a vnitřní teploty betonu záměsi VT v závislosti na čase

Jak již bylo řečeno v popisu zkoušek, pro záměs VT bylo provedeno podrobnější měření teploty betonu, a to jak u povrchu laserovým teploměrem, tak uvnitř směsi vpičovým teploměrem. Z toho, že vnitřní teplota klesá pomaleji než teplota povrchová, lze usuzovat na správnost provedení zkoušky. Měření ale bylo provedeno pouze pro zajímavost a hodnoty nejsou předmětem dalšího zkoumání.

5.6.2. Objemová hmotnost čerstvého betonu

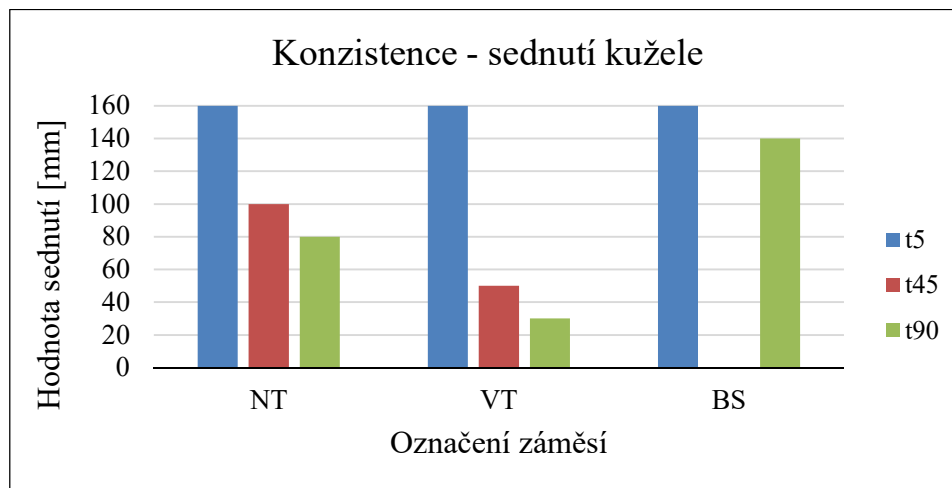


Obr. 52 Graf zobrazující objemovou hmotnost čerstvého betonu jednotlivých záměsí v závislosti na čase měření

Jak se dalo předpokládat, objemová hmotnost čerstvého betonu u všech záměsí v čase roste. To je způsobeno úbytkem hmotnosti vody, jejíž hustota je cca 1000 kg/m^3 . Ve směsi pak tedy zůstává větší podíl tuhých složek s vyšší objemovou hmotností. Dále graf potvrzuje celkové množství vody v jednotlivých záměsích. Pro záměs NT bylo použito menší množství záměsové vody než u záměsi VT, proto je její objemová hmotnost vyšší. Toto tvrzení by neplatilo u pokusu BS, kde bylo množství záměsové vody nej-

menší a přesto je objemová hmotnost nejnižší, dříve již ale bylo zmíněno, že kamenivo použité do betonové směsi pokusu BS obsahovalo více vody vzhledem k jeho místu uložení ve venkovním prostředí. V poslední řadě je zajímavý nárůst objemové hmotnosti v čase, zatímco u záměsi NT se dá považovat za lineární, záměs VT zaznamenala v prvních 45 minutách velký skok, který bude úzce korelovat s konzistencí.

5.6.3. Konzistence



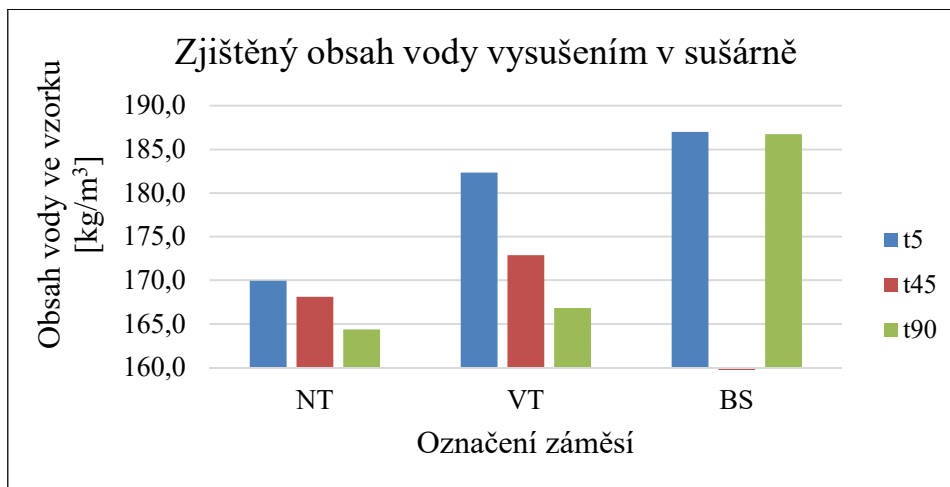
Obr. 53 Graf zobrazující sednutí kužele jednotlivých záměsí v závislosti na čase měření

Z předchozích dvou grafů je patrné, jaký efekt má teplota betonu na vývoj objemové hmotnosti čerstvého betonu a konzistence s ní spojené. Největší pokles je u obou případů v prvních 45 minutách. Zatímco hodnota sednutí kužele záměsi NT klesla o 60 mm, u záměsi VT téměř o dvojnásobek – 110 mm. Z konzistence S4 se náhle stane S2 na hranici s S1 a pracnost při ukládání betonové směsi do bednění se může stát velmi náročnou. To pak může vést dělníky na stavbě k přidání nežádoucí vody a tím ke snížení pevnosti a trvanlivosti ztvrdlého betonu. Nejnižší pokles zaznamenal pokus BS, kde se při nízkých teplotách změnila hodnota sednutí o 20 mm.

5.6.4. Množství vody odpařené z čerstvého betonu

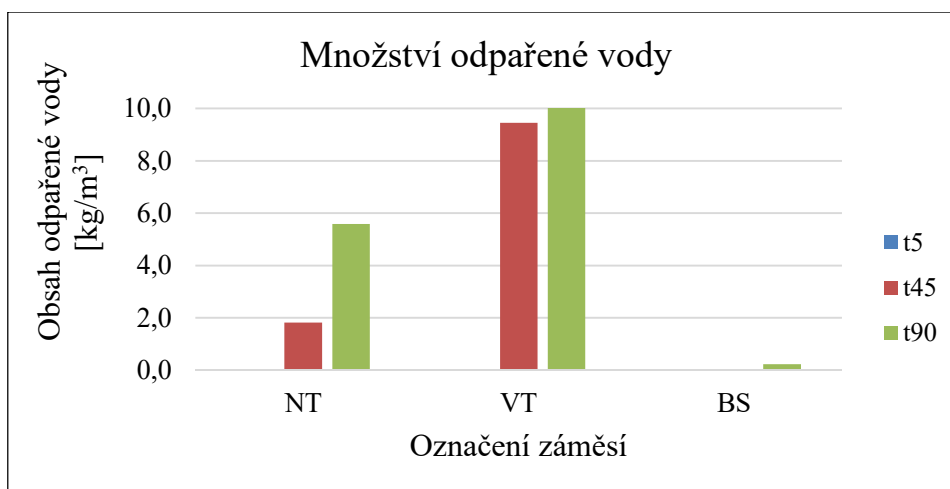
Při pohledu do tabulek prezentovaných výsledků měření úbytku záměsové vody odpařováním lze vidět, že metoda odpařování vody nad hořákem nepřinesla žádné relevantní hodnoty, se kterými by se dalo pracovat. Ve všech třech případech množství vody v záměsi s časem stoupá, to je z fyzikálního hlediska, pokud do betonové směsi nebyla přidána další voda (což v našem případě nebyla), nemožné. Tak výrazná nepřesnost mohla být způsobena technologicky náročným postupem metody, kde je obtížné docílit rovnoměrného odpařování vody ze vzorku a při tom neztratit žádný materiál při míchání

vzorku. Z těchto důvodů nebudou získané výsledky touto metodou dále rozebírány a rovnou přejdeme k hodnotám získaným pomocí metody odpařování vody v sušárně.



Obr. 54 Graf zobrazující obsah vody v jednotlivých záměsích v závislosti na čase měření získaný metodou vysušení vzorku v sušárně

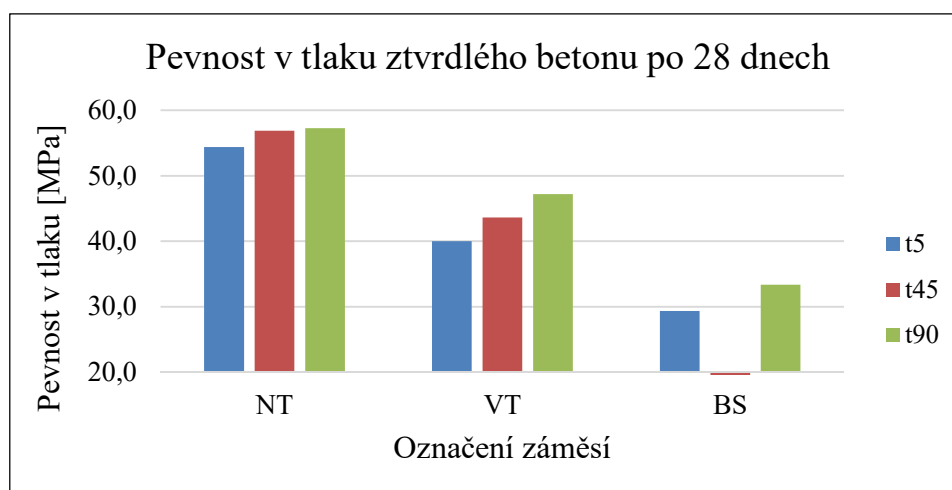
Porovnáme-li obsah vody zjištěný vysušením v čase t_5 s reálnou dávkou záměsové vody, můžeme potvrdit hypotézu z kapitoly 5.5.1. Rozdíl dávky záměsové vody (viz Tab. 4) a zjištěného obsahu vody v čase t_5 pro záměs NT je $184,4 - 169,9 = 14,5 \text{ kg/m}^3$, pro záměs VT $193,3 - 182,3 = 11 \text{ kg/m}^3$ a pro pokus BS $180 - 187 = (-7) \text{ kg/m}^3$ (voda v záměsi přibyla). Jak již bylo řečeno dříve, pro záměsi NT a VT bylo opominuto změření vlhkosti kameniva, není tedy možné tyto hodnoty porovnat s předpokládaným celkovým obsahem vody. Na druhou stranu u pokusu BS s naměřeným přibytkem vody můžeme souhlasit, neboť přibližně odpovídá vlhkosti kameniva, která byla změřena před namícháním dávky betonu ($8,3 \text{ kg/m}^3$). Menší rozdíl mohl vzniknout již odpařením určitého množství vody, ale z větší části se bude jednat o odchylku v měření.



Obr. 55 Graf zobrazující množství odpařené vody z jednotlivých záměsí v závislosti na čase měření

Z grafu na Obr. 55 vidíme, že v prvních 45 minutách se ze záměsi NT vypařilo $1,8 \text{ kg/m}^3$ a později pak ještě $3,8 \text{ kg/m}^3$, celkový úbytek vody během 90 minut je $5,6 \text{ kg/m}^3$. U záměsi VT byl úbytek vody odparem $9,5 \text{ kg/m}^3$ a později ještě $6,1 \text{ kg/m}^3$, celkově tedy $15,6 \text{ kg/m}^3$. U pokusu BS se během dopravy na stavbu odpařilo pouze $0,2 \text{ kg/m}^3$. Vyšší úbytek vody v prvních 45 minutách záměsi VT koresponduje s pravidly odpařování (viz kapitola 3), protože se odpařilo při vyšších teplotách betonu více vody než později, kdy teplota betonu postupně klesala. Nekonstantní odpařování u záměsi NT mohlo být způsobeno např. ponecháním otevřeného bubnu míchačky po delší dobu anebo intenzivnějším promícháváním směsi mezi zkouškami. Malý úbytek vody u pokusu BS se dal také předpokládat, jelikož nízká teplota betonu i prostředí a relativně malý otvor pro únik páry z bubnu autodomíchávače nejsou nejideálnější podmínky pro úbytek vody.

5.6.5. Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu



Obr. 56 Graf zobrazující zprůměrované hodnoty pevností v tlaku ztvrdlého betonu po 28 dnech jednotlivých záměsí v závislosti na čase měření

Z grafu na Obr. 56 lze vidět, že počáteční hypotéza o stoupaní pevnosti v tlaku důsledkem odpařující se vody a snižujícího se vodního součinitele se potvrdila. Nyní je otázka, jak silná je korelace mezi množstvím odpařené vody a výslednou pevností po 28 dnech. Nejvyšší nárůst pevnosti ($7,2 \text{ MPa}$) zaznamenala záměs VT, kde se také v daném čase odpařilo nejvíce vody ($15,6 \text{ kg/m}^3$), zatímco u záměsi NT se odpařilo pouze $5,6 \text{ kg/m}^3$ a pevnost v tlaku stoupla o $2,9 \text{ MPa}$. Mezi těmito dvěma případy se dá jistá úměra najít. Rozdíl v množství odpařené vody mezi záměsemi je 10 kg/m^3 , rozdíl nárůstů pevností mezi záměsemi je $4,3 \text{ MPa}$, což v zásadě odpovídá pravidlům o změně pevnosti v důsledku změny dávky vody (viz příklad v kapitole 4.2). Tento fenomén už se ale

nedá prokázat u pokusu BS, kde množství odpařené vody bylo pouze $0,2 \text{ kg/m}^3$, ale pevnost stoupla o 4 MPa.

5.7. Shrnutí experimentu

Cílem experimentu bylo zjistit úbytek záměsové vody v čerstvém betonu při dopravě betonu na stavbu. Za tímto účelem byla vyrobena referenční dvojice záměsí o různých podmínkách pro odpařování vody, v našem případě hlavně o rozdílné teplotě betonové směsi. V druhé fázi experimentu byl proveden praktický pokus betonárna-stavba.

Záměsi byly testovány v čase 5, 45 a 90 minut zkouškami pro čerstvý beton, konkrétně se měřila konzistence metodou sednutí kužele, objemová hmotnost a obsah vody metodou vysušení vzorku nad hořákem nebo v sušárně, ze kterého se pak získal úbytek záměsové vody odparem. Zároveň byla vždy v čase měření vyrobena tři zkušební tělesa pro zkoušku pevnosti ztvrdlého betonu v tlaku po 28 dnech.

Ze získaných a porovnaných hodnot je možné udělat několik tezí:

- Pro zjištění obsahu vody čerstvého betonu se metoda vysušení vzorku v sušárně ukázala být jako spolehlivější. Metoda vysušení vzorku nad hořákem nepřinesla žádné použitelné hodnoty pro vyhodnocování.
- Se zanedbáním ostatních vlivů se potvrdilo, že teplota betonové směsi má přímý vliv na rychlost odpařování vody z betonové směsi.
- S úbytkem vody se zvyšuje objemová hmotnost čerstvého betonu, která koreluje se ztrátou konzistence a zpracovatelností.
- V poslední řadě, úbytek vody snižuje vodní součinitel betonové směsi a tím se zvyšuje pevnost ztvrdlého betonu v tlaku po 28 dnech. Souvislost těchto dvou jevů je zřetelná u porovnávání záměsí NT a VT, pokus BS vykazuje hodnoty, které toto tvrzení nepodporují.

Je nutné dodat, že ačkoliv experiment přinesl použitelné hodnoty k vyhodnocení, musíme brát na zřetel, že okrajové podmínky experimentu byly výrazně zjednodušeny a problematika úbytku vody čerstvého betonu je mnohem komplikovanější. Nebylo počítáno s relativní vlhkostí vzduchu nebo s intenzitou výměny vzduchu nad povrchem betonové směsi, kde probíhalo odpařování. I tyto okolnosti přispívají k rychlosti odpařo-

vání a výslednému úbytku vody z betonové směsi. Zároveň by bylo vhodné vyrobit větší množství záměsí a provést více měření k získání stabilnějších výsledků.

6. Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo poskytnout rozšířené znalosti v oblasti odpařování vody z čerstvého betonu, a to zejména ve fázi dopravy dávky betonu na stavbu.

Za tímto účelem byla v první části shrnuta problematika vodního součinitele a jeho závislost na pevnosti ztvrdlého betonu, která s odpařováním vody úzce souvisí. Byly představeny hlavní složky betonové směsi a způsoby, kterými ovlivňují celkový (popř. účinný) obsah vody v betonu a hodnotu vodního součinitele. Dále byly uvedeny faktory ovlivňující intenzitu odpařování vody z čerstvého betonu a jejich efekt.

Pro zjištění konkrétních hodnot úbytku vody v čerstvém betonu odpařováním během dopravy na stavbu byl proveden experiment, který přinesl následující výsledky. Referenční dvojice záměsí provedená v laboratoři vykazala celkový úbytek vody během 90 minut za normální teploty betonu (okolo 20 °C) 5,6 kg/m³ a za zvýšené teploty betonu (okolo 32 °C) 15,6 kg/m³. Tím se potvrdil značný vliv teploty čerstvého betonu na rychlost odpařování vody z betonu. Odpařené množství vody bylo v obou případech poměrně významné, neboť experiment probíhal za pokojové teploty (20 – 24 °C) a s umožněním odvodu vodní páry z prostředí nad povrchem betonu.

Během praktického pokusu se za zimního počasí při nízkých teplotách odpařilo z dávky betonu v autodomíchávači během dopravy na stavbu pouze 0,2 kg/m³ vody. Tato hodnota by teoreticky mohla sloužit jako orientační množství vody, které je možné na stavbě přidat do již připravené dávky betonu v autodomíchávači, aniž by byly ovlivněny vlastnosti ztvrdlého betonu, zejména pevnost a trvanlivost. Stanovené množství je prakticky zanedbatelné. Při porovnání s výsledky referenčních záměsí zkoušených v laboratoři lze předpokládat, že při provedení experimentu v letním období by došlo k většímu odparu vody. Autor práce se však obává, že odpar vody během dopravy na stavbu by i tak byl velmi malý, neboť při umístění čerstvého betonu v autodomíchávači dochází jen k velmi omezenému odvodu vodních par z prostoru míchacího bubnu.

Výsledky práce naznačují, že odpar vody z autodomíchávače během dopravy na stavbu je jev, kterým se v praxi nemá cenu zabývat. K definitivnímu potvrzení tohoto závěru by bylo nutné zrealizovat rozsáhlejší experiment stejného principu, jako zde u pokusu betonárna-stavba, a aplikovat širší škálu okolních podmínek pro odpařování.

Výsledky tohoto experimentu neposkytly oporu pro hypotézu, že odpar vody během dopravy čerstvého betonu z betonárny na stavbu umožňuje přidávat na stavbě vodu do betonu. Naopak, měla by platit stále stejná pravidla, a to přísný zákaz jakéhokoliv zásahu do betonové směsi bez souhlasu technologa.

7. Literatura

- [1] Z čeho je beton?. *EBETON* [online]. Svaz výrobců betonu ČR, b.r. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/encyklopedie/z-ceho-je-beton>
- [2] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [3] LYSE, I. Tests on consistency and strength of concrete having constant water content. In: *Proceedings A.S.T.M.* [online]. Vol. 32 (1932), s. 629, Reprint No. 32 (32-7). Fritz Laboratory Reports, b.r. [cit. 2018-05-02].
- [4] *ČSN EN 1097-5: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [5] *ČSN EN 197-1: Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [6] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [7] VESELÝ, Vladimír. Jak (ne)pracovat s betonem: Téma 4 - Tuhnutí betonu, konzistence. *BETON: technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Beton TKS, s.r.o., 2017, (42017), 36-37.
- [8] COUFAL, Robert a Jan VÍTEK. Teplota čerstvého betonu a možnosti jejího snížení. *BETON: technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Beton TKS, s.r.o., 2018, (22018), 46-48.
- [9] *ČSN EN 1008: Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.

-
- [10] ČSN EN 206+A1: *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [11] VINKLER, Marek. Voda v betonu. *BETON: technologie, konstrukce, sanace*. Beton TKS, s.r.o., 2018, (22018), 49-53.
- [12] NEVILLE, Adam. *Properties of concrete*. 5th ed. New York: Pearson, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7.
- [13] ABRAMS, Duff. Design of Concrete Mixtures. In: *Bulletin 1* [online]. Chicago: Structural materials research laboratory, 1924, s. 4 [cit. 2018-05-06].
- [14] ILLSTON, J. a P. DOMONE. *Construction materials: their nature and behaviour*. 3rd ed. New York: Taylor & Francis, 2001. ISBN 0-419-25860-4.
- [15] ČSN EN 450-1: *Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [16] *Příručka technologa: BETON*. 1. vydání. Českomoravský beton, a.s., 2013.
- [17] Popílek není odpad, nýbrž produkt. *Průmyslová ekologie* [online]. 2016 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.prumyslovaekologie.cz/Dokument/102758/popilek-neni-odpad-nybrz-produkt.aspx>
- [18] Lecture 12 - 14: Evaporation. In: *University of Asia Pacific: Department of Civil Engineering* [online]. b.r. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://uap-bd.edu/ce/Handouts/CE-363/Lec.12-14.pdf>
- [19] HOVER, Kenneth. Evaporation of Water from Concrete Surfaces. In: *American Concrete Institute* [online]. 2006 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.concrete.org/publications>
- [20] KÜCHLIN, Dagmar a Otmar HERSEL. *Betontechnische Daten* [online]. HeidelbergCement, 2017 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.de/de/betontechnische-daten>
-

-
- [21] *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací: Kapitola 18 - Betonové konstrukce a mosty*. Čtvrté znění. Praha: Ministerstvo dopravy ČR Odbor pozemních komunikací, 2016.
- [22] BERHANE, Zawde. Evaporation of Water from Fresh Mortar and Concrete at Different Environmental Conditions. In: *American Concrete Intitute* [online]. 1984 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.concrete.org/publications>
- [23] *ČSN EN 1097-6: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [24] *ČSN EN 12350-2: Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [25] *ČSN EN 12350-6: Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [26] *ČSN 73 1314: Zkušební metody pro stanovení vodního součinitele čerstvého betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [27] *ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [28] *ČSN EN 12390-1: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: Úřad pro technickou normalizace, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [29] *ČSN EN 12350-1: Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [30] *ČSN EN 12390-2: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [31] Mapy Google. *Google* [online]. 2018 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://www.google.com/maps>
-

-
- [32] Servis: Kamenivo a písky. *LB MINERALS, s.r.o.* [online]. 2018 [cit. 2018-04-21].
Dostupné z: <http://www.lb-minerals.cz/cz/servis/servis/kamenivo-a-pisky#c>
- [33] Provoz Holý Vrch. *Lomy Mořina* [online]. 2018 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z:
http://www.lomy-morina.cz/pr_holyvrch.html
- [34] Betonárna Brno-Černovice v TBG Metrostav. In: *TRANSPORTBETON* [online].
Beroun: © Českomoravský beton, a.s, 2018 [cit. 2018-03-24]. Dostupné z:
<http://www.transportbeton.cz/tbg-betonmix-a-s/betonarna-brno-cernovice.html>