



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM VLASTNOSTÍ BETONŮ V EXTRÉMNÍCH KLIMATICKÝCH PODMÍNKÁCH

STUDY OF CONCRETE PROPERTIES IN EXTREME CLIMATIC CONDITIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tereza Stará

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ADAM HUBÁČEK, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Tereza Stará
Název	Studium vlastností betonů v extrémních klimatických podmínkách
Vedoucí práce	Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- Časopis Beton TKS
- ČSN EN 206+A2 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- ČSN P 73 2404 - Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace
- Sborníky z českých a mezinárodních konferencí
- ČSN EN 13670 Provádění betonových konstrukcí
- Technické kvalitativní podmínky MD ČR pro stavby pozemních komunikací: Kapitola 18 TKP - beton pro konstrukce- Časopis Stavebnictví
- Internetové zdroje, např. databáze SCOPUS

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem bakalářské práce bude shrnutí poznatků týkajících se použití betonů v extrémních klimatických podmínkách a možnostmi zvyšování trvanlivosti tohoto druhu betonů. Velké množství betonových konstrukcí je vystaveno během své životnosti působení velmi vysokých teplot (nad 50°C), velmi nízkých teplot (nižších než -25°C), případně působení vysoké salinity z mořské vody.

Základní body bakalářské práce budou následující:

- Popis a shrnutí dosavadních znalostí o betonech exploatovaných v extrémních klimatických podmínkách,
- popis požadovaných vlastností vstupních surovin pro použití v betonech vystavených těmto podmínkách
- vliv velmi vysokých teplot, velmi nízkých teplot, střídání těchto teplot, případně vysoké salinity anebo vysoké vlhkosti prostředí na vlastnosti betonů vystavených působení těchto podmínek,
- možnosti zvýšení trvanlivosti betonů vystavených působení těchto klimatických vlivů. Část bakalářské práce bude zaměřena také na praktické aplikace týkající se odolnosti betonů vůči působení popsaných extrémních klimatických vlivů. Budou sledovány parametry betonu (zpracovatelnost čerstvého betonu, objemová hmotnost, pevnost betonu v tlaku, nasákavost, trvanlivost a případně teplotní slučitelnost betonu) vystaveného působení velmi vysokých teplot, velmi nízkých teplot, případně vysoké vlhkosti, zejména s ohledem na potenciální snížení jejich životnosti. Bude sledován nejen vliv složení betonu, ale také samotné chování betonu při působení extrémních klimatických podmínek.

Rozsah práce cca 50 stran

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá studiem betonů, které jsou během životnosti vystaveny extrémním klimatickým podmínkám. Mnoho betonových staveb po celém světě je vystaveno během životnosti různým klimatickým podmínkám, jako jsou například vysoké teploty, nebo naopak nízké teploty. Tyto podmínky ovlivňují vlastnosti betonu jak v čerstvém stavu, tak i ztvrdlém stavu a mají vliv na jeho trvanlivost. Práce shrnuje dosavadní poznatky o chování betonu v těchto podmínkách, popisuje vhodné vstupní suroviny, které lze pro tyto prostředí využít. Dále jsou v práci popsány možnosti zlepšení trvanlivosti a odolnosti betonu vůči těmto klimatickým podmínkám. V experimentální části jsou sledovány vybrané parametry trvanlivosti betonu, během jeho vystavení klimatickému namáhání.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, extrémní podmínky, vysoké teploty, nízké teploty, střídání teplot, čerstvý beton, ztvrdlý beton, trvanlivost

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the study of concretes that are exposed to extreme climatic conditions during their service life. Many concrete structures around the world are exposed to various climatic conditions during their service life, such as high temperatures or, conversely, low temperatures. These conditions affect the properties of concrete both in its fresh and hardened state and have an impact on its durability. This thesis summarises the existing knowledge of the behaviour of concrete in these conditions, and describes suitable input materials that can be used for these environments. Furthermore, the thesis describes the possibilities of improving the durability and resistance of concrete to these climatic conditions. In the experimental part, selected durability parameters of concrete are monitored during its exposure to climatic stresses.

KEYWORDS

Concrete, extreme climatic conditions, high temperatures, low temperatures, changing temperature, fresh concrete, hardened concrete, durability

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Tereza Stará *Studium vlastností betonů v extrémních klimatických podmínkách*. Brno, 2022. 74s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27.05.2022

Tereza Stará

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Studium vlastností betonů v extrémních klimatických podmínkách* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 05. 2022

Tereza Stará
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Adamu Hubáčkovi, Ph.D. za pomoc, rady a připomínky při psaní této práce. Poděkování patří také pracovníkům ústavu THD, za ochotu a pomoc při zkoušení vzorků. Stejně tak děkuji své rodině.

Obsah

ÚVOD	11
CÍL PRÁCE	11
TEORETICKÁ ČÁST	12
1 BETON	12
2 BETONY EXPLOATOVANÉ V EXTRÉMNÍCH KLIMATICKÝCH PODMÍNKÁCH	12
3 VSTUPNÍ SUROVINY	14
3.1 Cement	14
3.2 Voda	18
3.3 Kamenivo	19
3.4 Přísady	21
3.5 Příměsi	23
4 DRUHY KLIMATICKÝCH PROSTŘEDÍ PŮSOBÍCÍCH NA BETON A BETONOVÉ KONSTRUKCE	26
4.1 Vysoké teploty	26
4.2 Velmi nízké teploty	30
4.3 Střídání vysoké teploty a velmi nízké teploty	31
4.4 Salinita	32
5 MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ TRVANLIVOSTI	33
5.1 Ošetřování při betonáži a zrání	33
5.2 Vstupní suroviny - příměsi	39
5.3 Vlákna	40
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	41
6 METODIKA EXPERIMENTU A PROVÁDĚNÉ ZKOUŠKY	41
6.1 Použité vstupní suroviny	42
6.2 Návrh betonových směsí	44
6.3 Zkoušky čerstvého betonu	45
6.4 Zkoušky ztvrdlého betonu	47
7 VÝSLEDKY ZKOUŠEK	56
7.1 Zkoušky čerstvého betonu	56
7.2 Zkoušky ztvrdlého betonu	56
7.3 Porovnání výsledků	66
ZÁVĚR	68
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	70

ÚVOD

V dnešní době je většina staveb po celém světě stavěna z betonu, nebo je využit alespoň na jejich dílčí části. Beton se stal jedním z nejvíce používaných materiálů ve stavebnictví po celém světě. Stalo se tak díky jeho, v podstatě jednoduchému složení, ale přitom široké škále využití. Ve světě snad nenajdeme zemi, která by nevyužívala beton jako stavební materiál.

Beton má velice dobré vlastnosti, co se týče pevnosti v tlaku. Největším úskalím však u betonových konstrukcí bývá trvanlivost, a to především z toho důvodu že, beton je kompozit složený z více materiálů. Tyto jednotlivé vstupní složky a jejich charakteristické vlastnosti, ovlivňují pevnost a trvanlivost výsledného betonu.

Mnoho betonových staveb je během své životnosti vystaveno extrémním klimatickým podmínkám, ať už se jedná o vysoké teploty, nebo naopak nízké teploty. Nejhorší kombinace nastává, pokud je konstrukce vystavena střídání různých klimatických podmínek. Tyto klimatické podmínky mají vliv na chování betonu. Ve většině případů dochází k porušení povrchu betonu, ale může také docházet ke změnám v jeho vnitřní struktuře. Tyto změny výrazně ovlivňují jeho chování během životnosti a mají vliv na jeho trvanlivost.

Bakalářská práce se tedy zabývá dosavadním shrnutím informací o betonech, jež jsou vystaveny takovýmto klimatickým podmínkám, vstupními surovinami, které je vhodné použít pro návrh receptury. Dále jsou v práci uvedeny možnosti pro zvýšení trvanlivosti. V experimentální části je práce zaměřena na sledování vybraných parametrů trvanlivosti při vystavení zkušebních těles klimatickému zatěžování.

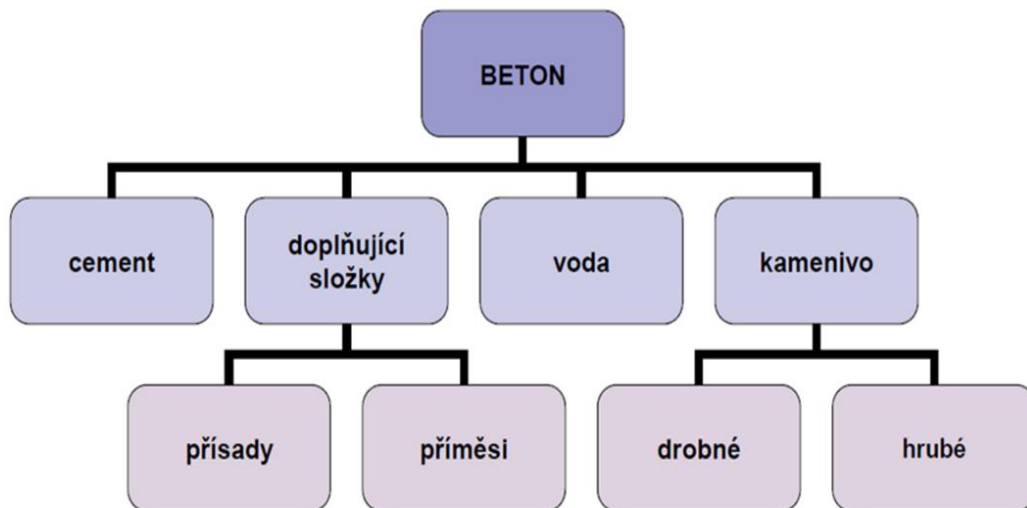
CÍL PRÁCE

Cílem teoretické části této bakalářské práce bude shrnutí dosavadních poznatků, které se týkají betonů, jež jsou vystaveny extrémním klimatickým podmínkám a možnostmi jakými lze dosáhnout zvýšení jejich trvanlivosti. V experimentální části bude sledován vliv jednotlivých druhů klimatických namáhání na vlastnosti betonu. Bude sledován především vliv vysoké a nízké teploty, ale také střídání těchto teplot a působení salinity. Následně budou posouzeny vybrané parametry a trvanlivost betonu.

TEORETICKÁ ČÁST

1 BETON

Beton vzniká smícháním cementu, či jiných, nejčastěji hydraulických pojiv s plnivem a vodou za vzniku tvárné a plastické hmoty, která zaplní definovaný prostor a tvar (například bednění). Po zatvrdnutí vytvářejí kompaktní a pevný celek. Velkou a podstatnou roli hrají v dnešních betonech také přísady, nejčastěji se jedná o superplastifikační přísady, což jsou chemické látky, které jsou schopny různým způsobem ovlivňovat vlastnosti betonů jak v čerstvém, tak v ztvrdlém stavu.



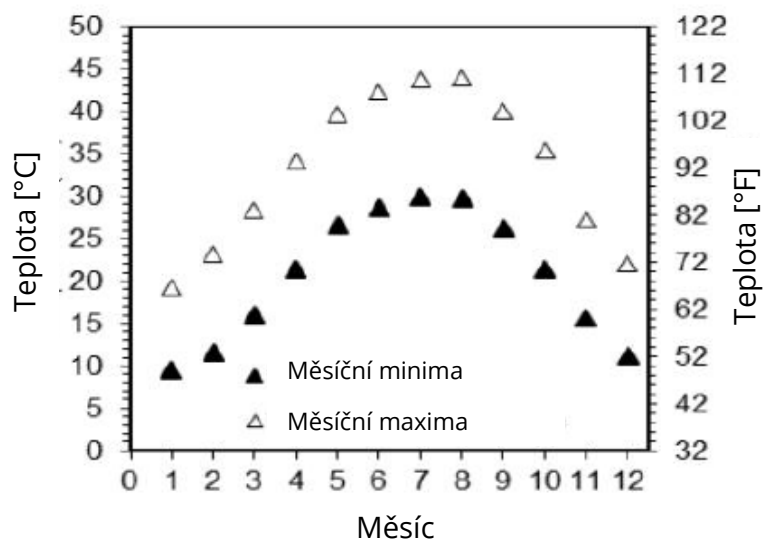
Obr. 1 - Schéma složení betonu

2 BETONY EXPLOATOVANÉ V EXTRÉMNÍCH KLIMATICKÝCH PODMÍNKÁCH

Beton je jedním z široce používaných stavebních materiálů pro mnoho konstrukcí ve světě, které jsou vystaveny neustálým změnám teploty a vlhkosti. Výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti betonu jsou mnohem složitější než u většiny materiálů. A to z důvodu, že beton není homogenní materiál. Beton se skládá z více materiálů a musejí se brát v úvahu fyzikální a mechanické vlastnosti jednotlivých vstupních složek, které do betonu byly navrhnuty. Dalšími faktory, které ovlivňují výsledné vlastnosti jsou klimatické podmínky již při ukládání, následném zrání a tvrdnutí betonu. Za extrémní klimatické podmínky jsou považovány vysoké

teploty, které přesahují 50 °C, nebo naopak velmi nízké teploty nižších než -25 °C. Mnoho těchto klimatických změn je doprovázeno například suchým a silným větrem, nebo naopak vysokou vlhkostí. [12], [13]

Pokud se podíváme na země jako jsou například Saúdská Arábie, Spojené arabské emiráty, Omán, Izrael tak tyto země jsou známé tím, že se vyznačují extrémně horkým a suchým počasím, za minimálního množství dešťových srážek po celý rok. Betonové stavby jsou zde, především v létě, neustále vystavovány teplotám vyšším než 50 °C s přímým slunečním zářením, doprovázené suchým a silným větrem a nízkou relativní vlhkostí okolního vzduchu. Na Obr. 2 jsou uvedena průměrná měsíční teplotní minima a maxima, která byla naměřena v Saudské Arábii. [13]



Obr. 2 – Průměrné měsíční teploty ve stínu v Saudské Arábii [13]

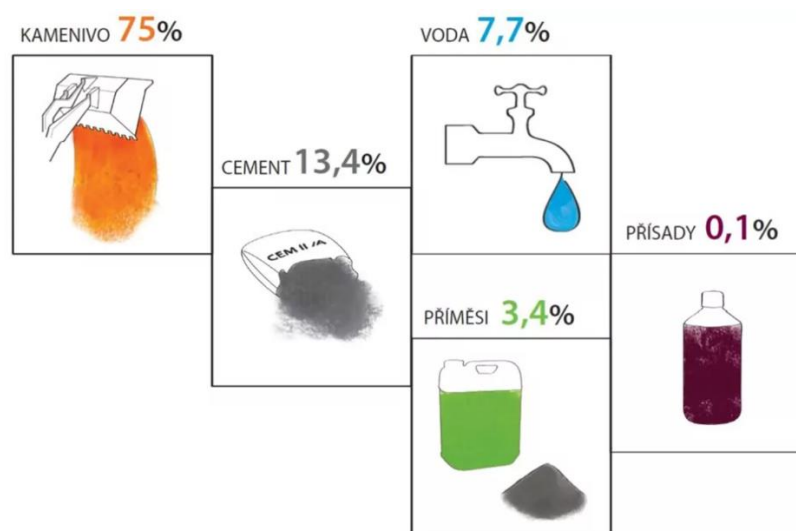
Naopak severské státy, jako jsou například Finsko a Island, nebo Kanada, jsou země, které se vyznačují převážně velice mrazivým počasím. V těchto zemích může teplota v zimním období klesnout až do extrémních -45 °C. Podnebí je zde známé i častými dešťovými, nebo sněhovými srážkami, opět s doprovodem silného větru. Betonové stavby jsou v těchto lokalitách vystaveny silnému mrazu, vysoké vlhkosti a následnému vysychání. [12]

Jsou však i země u kterých je počasí velice nestálé a například denní teploty se pohybují v průměru okolo 30 °C, ale v noci zde teploty mohou klesat až pod bod mrazu. V takovém prostředí jsou betonové stavby vysoce namáhány. Ve struktuře betonu může docházet k objemovým změnám. Tyto objemové změny mají za následek snížení trvanlivosti. Stavby jsou přes den vystavovány vysokým teplotám

s přímým slunečním zářením a v noci dochází k ochlazování, někdy i zamrzání. S příchodem rána opět přichází prudké oteplování. Stavba je tedy cyklicky namáhána střídáním teplot.

3 VSTUPNÍ SUROVINY

Chování a vlastnosti betonů při extrémních podmínkách, jsou značně ovlivněny materiálovými vlastnostmi jednotlivých vstupních složek, jako jsou například druh cementu, chemické a mineralogické složení kameniva, nebo typ použité přísady a příměsi. Tyto vlastnosti jednotlivých složek po smíchání ovlivní výsledné chování a vlastnosti betonu. Na Obr. 3 je znázorněno přibližné procentuální zastoupení jednotlivých vstupních složek v betonu. V následujících kapitolách, jsou rozepsány jednotlivé suroviny a jejich vhodné použití pro různá klimatická prostředí.



Obr. 3 - Složky betonu [36]

3.1 Cement

Cement je základní materiál pro výrobu betonu. Řadí se mezi hydraulická pojiva. Jedná se tedy o jemně rozemletý anorganický materiál, který po přidání a následném promíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne pomocí hydraulické reakce na vzduchu i pod vodou. [5]

Cementy vznikají výpalem vápenců, jílu a dalších látek korigujících složení suroviny při teplotách 1400-1500 °C. Tímto procesem vznikne slínek, který se ochladí a následně se nechá odležet a pomlít. Ke slínku se často přidávají další složky, které

se nazývají přísady a příměsi, mezi které patří sádrovec, struska nebo popílek. Tímto přídavkem vznikají směsné cementy. Z mineralogického hlediska jsou cementy složeny z křemičitanů, hlinitanů a železohlinitanů vápenatých. Účinné složky cementu jsou tvořeny hydraulickými oxidy. Těmito oxidy jsou CaO, SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃. Zastoupení těchto oxidů ve složení, ovlivňuje vlastnosti cementů. [1], [2], [4]

Z chemického hlediska se cement skládá ze čtyř základních minerálů, kterými jsou trikalciumpsilikát 3CaO.SiO₂ takzvaný alit, dikalciumpsilikát 2CaO.SiO₂ takzvaný belit, tetrakalciumaluminátferit 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ takzvaný celit a jako poslední trikalciumaluminát 3CaO.Al₂O₃. [29]

Cementy rozdělujeme do pěti základních tříd:

- CEM I – Portlandský cement
- CEM II – Portlandský cement směsný
- CEM III – Vysokopeční cement
- CEM IV – Pucolánový cement
- CEM V – Směsný cement

Normalizovaná pevnost cementu v tlaku je udávána v MPa a je měřena po 28 dnech, přičemž jsou zařazeny do pevnostních tříd v rozsahu 32,5; 42,5 a 52,5 MPa. Cementy s normálním nárůstem pevnosti označujeme písmenem N, cementy s vysokým počátečním nárůstem pevnosti označujeme písmenem R a cementy s nízkou počáteční pevností značená písmenem L. Třída L se používá pouze pro vysokopeční cementy CEM III. [30]

3.1.1 CEM I – Portlandský cement

Portlandský cement patří k nejvíce využívaným cementům v betonářském průmyslu. Nejvíce je využíván portlandský cement pevnostní třídy 42,5.

Pokud se podíváme na chemické složení portlandského cementu, je zřejmé že největší zastoupení zde má oxid vápenatý (CaO). U šedých cementů se procentuální zastoupení CaO pohybuje od 60 až do 65 % u bílého až 70 %. Obsah oxidu křemičitého (SiO₂) se pohybuje mezi 20 a 24 %. Obsah Al₂O₃ a Fe₂O₃ je variabilnější. Procentuální zastoupení Al₂O₃ a Fe₂O₃ nám určuje, jak bude cement tmavý a jaký bude vývin hydratačního tepla. Se zvyšujícím se obsahem těchto oxidů je hydratační teplo nižší a barva cementu tmavší. [29]

Charakteristickými vlastnostmi tohoto cementu jsou rychlý nárůst pevnosti a tím i vysoká počáteční pevnost. U tohoto typu cementu však dochází k rychlému vývinu hydratačního tepla. Toto teplo je zapříčiněno převážným zastoupením alitu (C_3S) ve slínku. [29]

Tento typ cementu je tedy vhodný použít při betonáži konstrukce, která probíhá v zimním období, nebo na místech kde jsou nízké teploty běžné.

3.1.2 CEM II - Portlandský cement směsný

Portlandský cement směsný je tvořen minimálně ze dvou složek. Kromě slínku je přidávána další složka. Nejčastěji se jako druhá složka přidává struska, vápenec nebo popílek. Použitím těchto přídatných složek, je umožňováno vnést do cementu výhodné charakteristické vlastnosti těchto látek a tím zvýšit hodnotu cementu v betonu.

Při vhodné kombinaci hlavních složek, lze u portlandských směsných cementů dosáhnout a přispět ke zvýšení materiálové stability a odolnosti, jako je například působení karbonatace, chloridů nebo mrazuvzdornost. Jako nejefektivnější kombinace k cementu se ukázala kombinace vápence a granulované vysokopecní strusky. Na Obr. 4 je tabulka s přehledem portlandských směsných cementů dle ČSN EN 197-1. [31]

	Označení	Slínek [%]	Doplňující složky [%]	
Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	Struska (S)
	CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	
Portlandský cement s křemičitým úletem	CEMII/A-D	90 - 94	6 - 10	Křemičitý úlet (D)
Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80 - 94	6 - 20	Pucolán přírodní (P)
	CEM II/B-P	65 - 79	21 - 35	
	CEM II/A-Q	80 - 94	6 - 20	Kalcinovaný (Q)
	CEM II/B-Q	65 - 79	21 - 35	
Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	80 - 94	6 - 20	Popílky křemičité (V)
	CEM II/B-V	65 - 79	21 - 35	
	CEM II/A-W	80 - 94	6 - 20	Popílky vápenaté (W)
	CEM II/B-W	65 - 79	21 - 35	
Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T	80 - 94	6 - 20	Kalcinovaná břidlice (T)
	CEM II/B-T	65 - 79	21 - 35	
Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	80 - 94	6 - 20	Vápenec (L) TOC $\leq 0,2$
	CEM II/B-L	65 - 79	21 - 35	
	CEM II/A-LL	80 - 94	6 - 20	Vápenec (LL) TOC $\leq 0,5$
	CEM II/B-LL	65 - 79	21 - 35	
Portlandský směsný cement	CEM II/A-M	80 - 94	6 - 20	Soustava složek
	CEM II/B-M	65 - 79	21 - 35	

Obr. 4 - Směsné portlandské cementy dle ČSN EN 197-1 [30]

- Portlandský struskový cement

Základem portlandského struskového cementu je slínek, vysokopecní struska a sádrovec.

Přidáním vysokopecní strusky do cementu se zlepší reologické vlastnosti, ale zpomalíme proces hydratace a tím i vývin hydratačního tepla. Oproti obyčejnému portlandskému cementu má pomalejší vývoj pevností a nižší počáteční pevnosti. Portlandské struskové cementy jsou také velice citlivé na kolísání teplot a musejí se v prvních sedmi dnech udržovat neustále vlhké, jinak dochází ke smršťování a trhlinám. Tento typ cementu je vhodný pro použití při betonáži v létě, nebo v zemích kde jsou běžně vysoké teploty. [30]

- Portlandský cement s křemičitým úletem

Portlandský cement s křemičitým úletem se vyrábí semletím portlandského slínku, křemičitého úletu a případně některých dalších látek.

Přidání křemičitého úletu do cementu, příznivě ovlivní trvanlivost betonu a také zabraňuje jeho karbonataci. Křemičitý úlet v cementu má také vliv na zvýšení pevnosti v tahu. [47]

- Portlandský pucolánový cement

Portlandský pucolánový cement se vyrábí semletím portlandského slínku, pucolánů a případně některých dalších látek.

Přidáním pucolánu, což je jemný popel, zajišťujeme odolnost vůči agresivním odpadním, uhličitánovým a slaným vodám. [47]

- Portlandský popílkový cement

Portlandský pucolánový cement se vyrábí semletím portlandského slínku, popílku a doplňujícími složkami a přísadami.

Přidáním popílku do cementu zajistíme dobrou zpracovatelnost, plastičnost a vodonepropustnost. Tento typ cementu u betonu zvýší jeho hutnost a je tedy vhodný pro použití při stavbách vodních děl. [47]

- Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí

Portlandský pucolánový cement se vyrábí semletím portlandského slínku, kalcinované břidlice a případně některých dalších látek.

Přidáním kalcinované břidlice k cementu zajistíme odolnost vůči chemickým vlivům. [47]

- Portlandský cement s vápencem

Portlandský cement s vápencem je vyráběn semletím portlandského slínku a vápence se síranem vápenatým a dalšími doplňujícími složkami či přísadami.

Přidáním vápence do cementu zlepšíme zpracovatelnost a čerpatelnost čerstvého betonu. Podílí se také na stabilizaci barvy betonu. Cement vykazuje nízké hydratační teplo, ale má nízké konečné pevnosti. [47]

- Portlandský směsný cement

Portlandský směsný cement se vyrábí semletím portlandského slínku, granulované vysokopecní strusky, vápence, síranu vápenatého a případně některých dalších látek. [47]

3.1.3 CEM III – Vysokopecní cement

Obsahuje velmi významný podíl vysokopecní strusky. Struska zajišťuje odolnost proti agresivním prostředím. Náběh pevností je u tohoto cementu pozvolný a přírůstek hydratačního tepla je minimální.

Tento druh cementu je vhodný pro konstrukce, které jsou namáhány agresivními látkami, nebo pro konstrukce odolné vůči vysokým teplotám, které vznikají při požáru. Je také vhodný pro využití při betonáži, která probíhá v parném létě. [47]

3.2 Voda

Voda je důležitou složkou pro zpracovatelnost a reologii čerstvé betonové směsi. V čerstvém betonu voda musí plnit dvě základní funkce, hydratační a reologickou. Funkce hydratační, zajišťuje že se voda podílí na hydrataci cementu, což má za následek tuhnutí a tvrdnutí. Funkce reologická zajišťuje, že se voda podílí na tvorbě konzistence čerstvého betonu tak, jak je dána dle požadavků.

Vodu můžeme dále rozdělit z technologického hlediska na vodu záměsovou a ošetřovací. Voda záměsová je dávkována přímo do míchačky při výrobě. Množství záměsové vody je ovlivněno hydratačním procesem betonu, ale i jeho požadavkem na zpracovatelnost. Pro zhydratování cementu se uvádí 25–30 % hmotnosti vody z celkového množství cementu. Pokud je do betonu přidáno málo záměsové vody, nedojde k celkové hydrataci cementu a beton ztrácí požadované pevnosti. Naopak pokud je do betonu přidáno větší množství záměsové vody, než je potřeba, v betonu

se začne tvořit nadměrné množství pórů, které je způsobeno odpařováním, a opět dochází ke snižování výsledných pevností betonu. Voda ošetřovací, je používána až na ztvrdlý beton v podobě kropení nebo mlžení, abychom beton udrželi ve vlhkém stavu a mohl dále probíhat proces hydratace. [1], [4], [6]

Požadavky na vodu jsou takové, že voda by měla být neutrální a neměla by obsahovat zvýšené množství škodlivých látek jako jsou chloridy, sírany, cukry nebo huminové látky, které vznikají převážně rozkladem rostlinných zbytků. Jediná voda, která se do betonu smí použít bez jakéhokoliv předchozího zkoušení je voda pitná. Jako alternativu za vodu pitnou, můžeme použít vodu užitkovou, podzemní a povrchovou, tyto vody však musí být předem otestovány na obsah škodlivých látek. Dále se smí a je čím dál více využívána voda recyklovaná. Tato voda vzniká na betonárně z proplachování autodomíchávačů, čištění bubnů nebo čerpadel. Před použitím však musí být proveden chemický rozbor, jelikož vody nesmí obsahovat vyšší podíl cementového kalu, provzdušňovacích látek, či olejů. Recyklovaná voda, se používá do betonové směsi pouze v určitém poměru, nikdy jako náhrada veškerého množství vody. [6], [7]

3.3 Kamenivo

Kamenivo je anorganický zrnitý materiál, přírodního nebo umělého původu, který je určen pro stavební účely. Ve stavebnictví se kamenivo používá jako plnivo, které ve vhodné kombinaci s pojivem slouží k přípravě betonové směsi. Kamenivo zaujímá až 80 % celkového objemu betonu. Jeho hlavní funkcí je vytvoření pevné a tlaku odolávající kostry. Kamenivo do betonu se může používat jak drcené, tak i těžené. Těžené kamenivo je vhodnější než drcené, z důvodu menší mezerovitosti, lepšího tvaru a křivky zrnitosti. Návrh kameniva do betonové směsi se obvykle skládá ze tří frakcí, kterými jsou písek a jemné a hrubé kamenivo. Pro přípravu betonů se nejčastěji používá maximální zrno kameniva 32 mm. [1], [2], [3], [4]

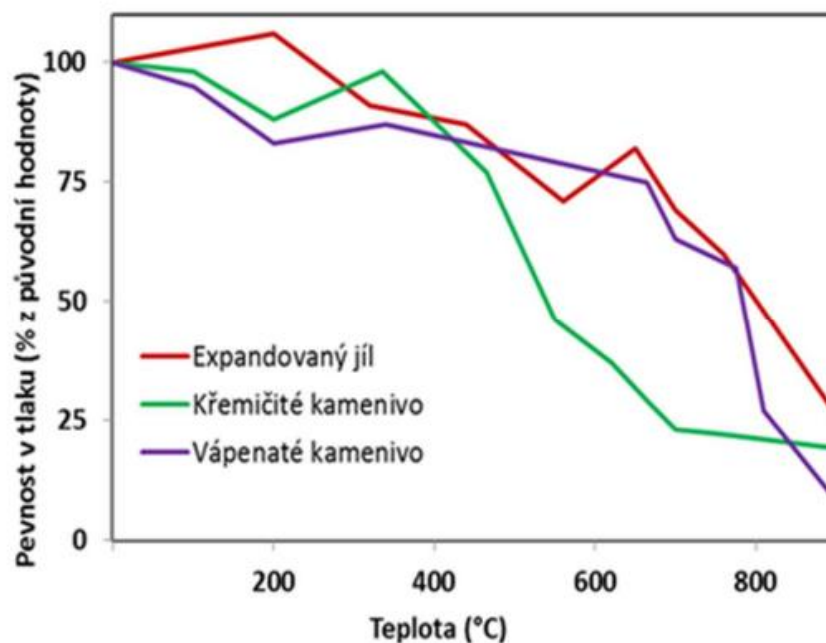
Kamenivo používané pro výrobu betonů, musí být bez organických a ostatních nečistot, aby mělo dobrou soudržnost s cementovým tmelem. Mezi nevhodná kameniva do betonu se řadí kameniva, která měknou ve vlhkém prostředí, nebo obsahují větší množství síranů. Kameniva, která jsou zdrojem zdravotních závad způsobované odpařováním nebo vylouhováním, jako jsou horniny vykazující radioaktivitu. Pro dosažení kvalitního betonu, by tedy mělo být použito kamenivo

různé frakce s vysokou pevností, odolností proti mrazu, trvanlivostí a co nejmenší nasákavostí. [1], [2], [3]

3.3.1 Kamenivo při působení vysokých teplot

Jak již bylo zmíněno kamenivo zaujímá zhruba 80 % objemu v betonu, proto je výběr vhodného kameniva velice důležitý. A to z toho důvodu, že výrazně ovlivní chování a odolnost betonu vůči vysokým teplotám. Každé kamenivo se při působení vysokých teplot chová rozdílně. Toto rozdílné chování je doprovázeno chemicko-fyzikálními změnami. K popisu chování jednotlivých druhů kameniv a jejich chování při vystavení zvýšeným teplotám se používá termín „tepelná stabilita kameniva“. Teplotně stabilní kameniva se vyznačují chemickou a fyzikální stabilitou, při působení vysokých teplot. Při výběru kameniva pro prostředí, kde je předpokládáno působení vysokých teplot, je tedy vhodné zvolit kamenivo s nízkým koeficientem teplotní roztažnosti a zanedbatelným zbytkovým přetvořením po ochlazení. [27],[40]

Teplotní roztažnost kameniva je dána dle jeho mineralogického složení. Dalším faktorem, který se musí zohlednit jsou metamorfnní přeměny ve struktuře kameniva. Na Obr. 5 je graf, znázorňující změnu pevnosti v tlaku, při působení vysokých teplot. [27]



Obr. 5 -Vliv druhu kameniva na snížení pevnosti v tlaku způsobené vysoké teploty [41]

3.3.2 Kamenivo při působení nízkých teplot

Při výběru kameniva pro prostředí, kde je předpokládáno působení nízkých teplot, je tedy vhodné zvolit kamenivo s vysokou pevností v tlaku, nebo pevností v tahu. Tyto vlastnosti nám mohou napovědět, jak se kamenivo bude při zmrazování chovat. Pro přesné určení je však potřeba znát podrobnější charakteristiku struktury kameniva jako je velikost zrn a mineralogické složení. Při působení mrazu může u kameniva docházet ke zvětrávání. Velikost zrn, ze kterých je kamenivo složeno, může být jeden z hlavních faktorů, které ovlivní, zda u něho dojde k postupnému úbytku, nebo zda popraská. Svou roli má také zastoupení jílových minerálů či karbonátů v základu horniny, přítomnost živců důležitou roli nehraje. Jíly reagují na zvýšení obsahu vody jinak než křemen a jejich zrna se vzhledem k velikosti snadněji redistribuují nebo vyplavují. V mnoha případech jsou za působení mrazu aktivovány hlavní horninové diskontinuity, jako jsou již existující praskliny ve struktuře. Jindy se kamenivo může zdát na pohled mrazem nepoškozeno, ale jeho struktura je poškozena natolik, že k jeho ztrátě pevnosti stačí nepatrné působení vnějšího vlivu. [46]

3.4 Přísady

Přísadami do betonu se rozumí chemické látky, které do betonu přidáváme za účelem zlepšení jeho reologických vlastností v čerstvém betonu, které následně mají vliv na vlastnosti ztvrdlého betonu. Přísady se do betonu přidávají v malých dávkách. Tyto dávky se udávají procentuálně z množství cementu. Přísady jsou především kapalné látky, a tak při míchání dochází k dokonalému rozmísení ve směsi. Přísady především reagují s cementem a jejich účinnost je závislá na druhu použitého cementu, jeho měrném povrchu a koncentraci přísady, která se odvíjí od jeho množství. [8], [9], [10]

3.4.1 Plastifikační přísady

Plastifikační přísady jsou látky redukující množství záměsové vody, tím dochází ke snížení vodního součinitele při zachování stejné konzistence čerstvé betonové směsi. Snížením vodního součinitele, se zmenšuje riziko segregace, či krvácení

betonu a zvyšuje se výsledná kvalita, trvanlivost a pevnost betonu v tlaku. Redukcí vody také omezíme dotvarování a smršťování betonu. [10]

3.4.2 Superplastifikační přísady

Mezi nejpoužívanější přísady se v dnešní době řadí superplastifikační přísady, které svým chemickým složením mají vliv na reologické vlastnosti betonové směsi stejně jako plastifikační přísady. Tyto přísady jsou však mnohem účinnější. Použitím superplastifikační přísady do betonové směsi docílíme snížení potřebného množství záměsové vody až o 30 %. [10]

3.4.3 Provzdušňovací přísady

Provzdušňovací přísady jsou látky vytvářející v betonové struktuře, uzavřenou síť vzduchových mikropórů. V betonu je voda vedena pomocí sítí kapilár a při změně skupenství z kapalného na pevné zvětšuje svůj objem o cca 9 %. Tyto záměrně vytvořené mikropóry, mají za následek rozrušování sítí kapilár. Tento proces má výrazný vliv na zlepšení trvanlivosti a zlepšuje chování betonu proti účinkům mrazu a rozmrazování. [10]

3.4.4 Retardační přísady

Retardační přísady, taktéž přísady zpomalující tuhnutí, jsou látky, které prodlužují zpracovatelnost betonové směsi, tedy přechod z plastického stavu do stavu tuhého. Tyto látky používáme především v letních měsících, nebo v zemích kde jsou denní teploty tak vysoké, že při přepravě betonové směsi by začal beton tuhnout již v autodomíchávači. [10]

3.4.5 Urychlovací přísady

Urychlovací přísady, jsou látky, které mají za účel zkracovat dobu, při které čerstvý beton přechází do stavu tuhého. Tyto látky se využívají nejčastěji v místech, kde potřebujeme dosáhnout vysokých počátečních pevností. Urychlovače používáme nejčastěji v zimě nebo například v severních zemích z důvodu nízkých venkovních teplot, při kterých by došlo k zastavení hydratace cementu. Přidáním urychlovací přísady také dochází ke zkrácení doby, která je potřebná pro odbednění. [4], [10]

3.5 Příměsi

Příměsi jsou ve většině případů anorganické látky, které do betonu přidáváme za účelem zlepšení jeho vlastností jak v čerstvém, tak zatvrdlém stavu. Tyto látky se vyznačují především svou velikostí částic, které jsou menší než 0,125 mm a velkým měrným povrchem. V některých případech se jedná o odpady, které jsou ve stavebnictví zpracovávány. S přidáním příměsí do betonu roste množství záměsové vody a tím i množství cementového tmele, proto se musí příměsi započítávat do obsahu jemných částic a bereme je v úvahu při výpočtu vodního součinitele. [11]

Dle ČSN EN 206-1 rozdělujeme příměsi na dva typy, a to Inertní a latentně hydraulické.

3.5.1 Typ I – inertní příměsi

Jsou to příměsi, které svým chemickým a mineralogickým složením netuhnou a netvrdnou pod vodou ani pomocí budiče. Tyto příměsi se tedy nepodílí na tvorbě pevné matrice. Do betonu se přidávají za účelem zlepšení reologických vlastností, nebo pro dosažení hutnější struktury, případně probarvení betonu. Nejčastěji do této kategorie spadá kamenná moučka a barevné pigmenty. [5], [11]

3.5.2 Typ II – latentně hydraulické

Jsou příměsi, které svým složením aktivně přispívají ke tvorbě a pevnosti cementové matrice. U těchto látek dochází k aktivaci pomocí budičů. Mezi tyto příměsi patří například vysokopecní jemně mletá struska, mikrosilika, vysokopecní popílek, mikromletý vápenec nebo i jemně mletý cihlářský střepek. [5], [11]

Příměsi II typu se dělí na:

- **Pucolány**

Obsah amorfního SiO_2 více než 47 %, Pro následné tuhnutí potřebují budič, a to reakci s portlanditem, nacházející se v cementu. Hydratace cementu a pucolánu vytváří C-S-H gel.[44]

- **Latentně hydraulické**

Mohou se shlukovat a částečně nabývat pevnosti při kontaktu s vodou samovolně, ale nejčastěji však musí být aktivovány účinkem budičů. Dle povahy budiče dělíme na alkalické ($\text{pH} > 7$) a síranové. K síranovému buzení se nejčastěji

používá sádrovec nebo anhydrit. K zásaditému (alkalickému) buzení postačí portlandský cement nebo vápno [44]

3.5.2.1 Vysokopecní struska

Vysokopecní struska vzniká při výrobě surového železa roztavením vápence a dalších látek na povrchu železné rudy s cílem vázat na sebe složky, které způsobují znečištění a tím i jakost vyráběného železa. Prudkým ochlazením struskové taveniny dochází k jejímu zatuhnutí. Tímto ochlazením vzniká skelná fáze, čímž jsou u strusky zajištěny její latentně hydraulické vlastnosti. Tento proces, takzvaná granulace strusky, je možno provést dvěma způsoby. V prvním případě je roztavená struska vpouštěna do vodní nádrže, kde dochází k rozptýlení do částic velikosti zrn, které jsou podobné hrubému písku. V druhém případě je roztavená struska přímo zkrápěna vodou při vypouštění z pece. Tímto způsobem vzniklý produkt se následně semílá na specifický měrný povrch. [42]

Základní chemickým složením strusky je oxid vápenatý, oxid křemičitý, oxid hlinitý, oxid manganitý a v malém zastoupení je zde i oxid železitý, sulfid vápenatý a sulfid manganatý. [38]

Struska se řadí mezi látky, které vykazují především latentně hydraulické vlastnosti. Tato vlastnost znamená že struska po přidání vody sama o sobě netuhne a netvrdne. K aktivaci hydraulických vlastností je zapotřebí přidat budič neboli aktivátor. [43]

3.5.2.2 Elektrárenský popílek

Elektrárenský popílek je tuhý zbytek, který se získává elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním z kouřových plynů, vznikajících při spalování v uhelných elektrárnách. Pro spalování se nejčastěji využívá uhlí černé, avšak může být využito i uhlí hnědé, nebo také lignit a antracit. Právě od použitého druhu uhlí, jeho jakosti a podílu anorganických složek se následně odvíjí nejen množství vzniklého tuhého zbytku, ale zároveň i jeho složení a kvalita.[42]

Popílký se řadí mezi pucolány, dle teploty spalování se dají rozdělit na vysokoteplotní a fluidní:

- Vysokoteplotní popílek

Také nazýván jako létavý popílek, je produktem tradičního spalování, které probíhá při teplotách 1200–1700 °C. Pokud je palivem černé uhlí nebo antracit, vzniká popílek křemičitý. Křemičité popílký jsou bohaté na aktivní SiO_2 a Al_2O_3 , zatímco obsah CaO ve sklovině je nízký (2-3 %). Tvar zrn je převážně kulovitý a velikostí se podobá zrnům cementu. Vápenaté popílký se vyznačují vyšším obsahem CaO (až 20 %). Touto hydratací může vznikat dostatečné množství hydroxidu vápenatého k probuzení hydraulických vlastností bez nutnosti dalšího přídavku Ca(OH)_2 jako budiče, popřípadě cementu jako tomu je v případě křemičitých popílků.[42]

- Fluidní popílek

Fluidní, někdy také nazýván ložový popílek, vzniká spalováním jemně rozemletého uhlí se sorbentem při teplotách 800-900 °C, za vzniku tuhých minerálních zbytků, jejichž složení a vlastnosti se zásadně liší od tuhých vedlejších produktů z klasického spalování. [42]

Zásadním rozdílem mezi těmito dvěma popílký je zejména v množství přítomného anhydritu (bezvodný síran vápenatý) a měkce páleného volného vápna jakožto zbytku nezreagovaného vápence. Ve fluidním (ložovém) popílký je zastoupen v mnohem větší míře než ve vysokoteplotním. Fluidní popílký jsou tedy z hlediska zvýšeného obsahu SO^{3-} do betonu nevhodné a využívají se popílký vysokoteplotní. [43],[44]

3.5.2.3 Křemičitý úlet a mikrosilika

Křemičitý úlet je vedlejším produktem vznikající při výrobě křemíku, ferrosilica a dalších slitin křemíku. Křemík a slitiny křemíku se vyrábějí v obloukové elektrické peci, kde je křemen redukován za přítomnosti paliva. Během redukce vzniká plynný SiO_2 a uniká k horní části pece, kde dochází k ochlazení, následné kondenzaci a oxiduje se ve formě velmi jemných částic SiO_2 . Tyto částice mohou obsahovat velmi malé procento nečistot, jako jsou například částice paliv. Ty jsou zachycovány v odlučovačích a filtrech. Částice křemičitého úletu jsou velmi malé a mají téměř

dokonalý kulovitý tvar. Jejich průměr je menší než 1 μm , což je asi 100krát méně než průměrné zrno cementu. [43]

Křemičitý úlet se řadí mezi pucolány. Jako budič potřebují portlandit, který je obsažen v cementu. Hydratací cementu a pucolánu vzniká C-S-H gel. Z chemického hlediska jsou křemičité úlety tvořeny zejména silikou – SiO_2 , která tvoří minimálně 90 %. Z tohoto důvodu je někdy označována jako mikrosilika.[43],[44]

4 DRUHY KLIMATICKÝCH PROSTŘEDÍ PŮSOBÍCÍCH NA BETON A BETONOVÉ KONSTRUKCE

4.1 Vysoké teploty

Změny vlastností betonových konstrukcí, které jsou vystaveny vysokým teplotám se odvíjejí od základních vlastností. Mezi které patří mechanické, fyzikální a teplotní vlastnosti.

Při působení velmi vysokých teplot a slunečního záření na betonové konstrukce dochází k přehřívání ploch, které jsou vystaveny slunečním paprskům. Osluněné plochy se během tohoto procesu rozehřívají, zbylé části jsou ve stínu a jsou vystaveny mnohem nižším teplotám. Oslunění a zastínění jednotlivých částí konstrukce se během dne neustále mění a tím dochází ke změně nerovnoměrného napětí v betonu. Betonová konstrukce pracuje a snaží se mezi sebou tyto nerovnoměrné napětí vyrovnávat. Tímto procesem může docházet k popraskání struktury betonové konstrukce. Tyto praskliny však nejsou ohrožující z hlediska statického, ale jsou většinou považovány za vady estetické. [26]

Při působení vysokých teplot a slunečního záření může také docházet k vysušování povrchu betonu. Tento proces vede k tomu, že beton může ztrácet, nebo měnit svou původní barvu. Tento jev je například nejvíce pozorovatelný u architektonických betonů, které jsou často probarveny pigmenty. Dalším z jevů, ke kterým může na povrchu betonové konstrukce docházet, při působení vysokých teplot je vyplavování vápenatých složek z betonu. Tento jev je nazýván jako výkvět. Výkvěty na betonu jsou z převážné části tvořeny uhličitánem vápenatým, ten vzniká přeměnou hydroxidu vápenatého. Ten je jedním z produktů během hydratace cementu a za určitých okolností může být rozpuštěn v pórové kapalině a následně transportován na povrch betonu. Zde se působením CO_2 přemění na CaCO_3 . Výkvěty na svislých stěnách způsobují bílé mapky, které opět porušují estetický vzhled

konstrukce. Tyto bílé mapky často po čase zmizí samy působením dešťových srážek, nebo pro okamžité odstranění může být povrch chemicky očištěn. [48]

Jak již bylo zmíněno při vysokých teplotách dochází k vysušování povrchu a tím pádem dochází také k odpařování vody. Nejprve dochází ke ztrátě kapilární vody, a to vede ke snížení soudržnosti vnitřních sil v důsledku expanze vodní páry. Při teplotách nad 80 °C dochází k dehydrataci ettringitu a při teplotách od 150 °C do 170 °C k rozkladu sádrovce ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), který vede k dehydrataci C-S-H gelů a následně se z betonu odpařuje fyzikálně vázaná voda. Chování betonu nad tyto teploty se řadí mezi požární odolnost betonu. [27]

4.1.1 Požární odolnost

Požární odolnost je charakterizována jako schopnost konstrukce, nebo její části odolávat účinkům požáru při zachování nosnosti a izolačních schopností.

Pokud je beton vystaven ohni, dochází u něho k postupnému zhoršování kvality. Při hoření dochází ke zhroucení struktury cementového tmelu a tím i ke ztrátě nosné kapacity betonu. Bezpečnost, nebo trvanlivost betonových konstrukcí se odvíjí od pevnosti betonu po dobu trvání žáru, anebo jak se změní jeho pevnosti žářem a následným ochlazením (hašení požáru). Pro posouzení jsou směrodatné teploty od 300 °C do 1000 °C, někdy i teploty do 1300 °C a doba po kterou na konstrukci působí. Nejdříve u betonu dochází ke zmenšování pevností v důsledku zvyšování teploty, při které se cementový tmel i kamenná kostra betonu mění. Změny důsledkem žáru budou různé dle použitých vstupních složek ve směsi, výše žáru a doby trvání. [49]

Při vystavení betonu zvýšeným teplotám dochází k odpařování vody, dehydrataci C-S-H gelu a rozpadu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a dalších minerálů. Společně s těmito změnami dochází ke změnám v kamenivu. Tyto změny mají za následek rapidní pokles pevností a modulu pružnosti. Při překročení teploty 500 °C bývá pokles pevnosti až 60 % a beton je považován za porušený. Podrobnější chování betonu vůči zvýšeným teplotám je popsáno v Tab. 1. [27]

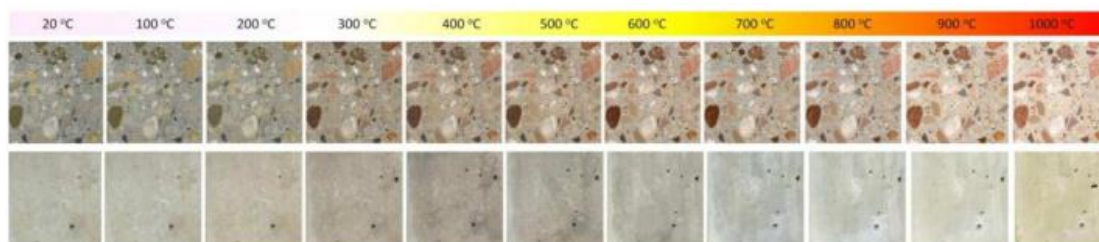
Tab. 1 - Přehled změn v mikrostruktuře betonu při zahřívání [27]

Rozsah teplot [°C]	Změny v mikrostruktuře betonu
20–200	Dochází ke ztrátě kapilární vody a snížení soudržnosti sil v důsledku expanze vlhkosti 80 °C - 150 °C dehydratace ettringitu 150 °C - 170 °C rozklad Sádrovce CaSO ₄ Počátek dehydratace CSH gelů Ztráta fyzikálně vázané vody
300–400	Praskání křemičitého kameniva (zhruba 350 °C) Kritická teplota pro vodu (374 °C) - již není možná přítomnost volné vody
400–500	Rozklad portlanditu – Ca(OH) ₂ → CaO + H ₂ O
500–600	Přeměna křemene z fáze β na α (573 °C) v kamenivu a písku
600–800	Druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba β-C2S.
800–1000	840 °C – rozklad dolomitického vápence 930 °C–960 °C - rozklad kalcitu - CaCO ₃ → CaO + CO ₂
1000–1200	Tvorba minerálu Wollastonitu β (CaO-SiO ₂) 1050 °C – tavení čediče
1300	Celkový rozklad betonu

Vybrané změny vlastností betonu při působení požáru:

- Změna barvy

Betony, které obsahují kamenivo s křemenem, se při vystavení teplotám od 300 °C až 600 °C zbarví do červena, při teplotách mezi 600 °C až 900 °C do šedo-bíla a po překročení teploty 900 °C opět do šedé barvy. Tento efekt je nejvíce ovlivněn dehydratací spolu se změnami, které nastávají u kameniva. U kameniva obsahující vápenec dochází při zahřívání ke změně barvy na bělavou. Barevné změny se mohou posuzovat pouze na povrchu betonu, nebo také ve struktuře s odhaleným kamenivem. [27], [50]

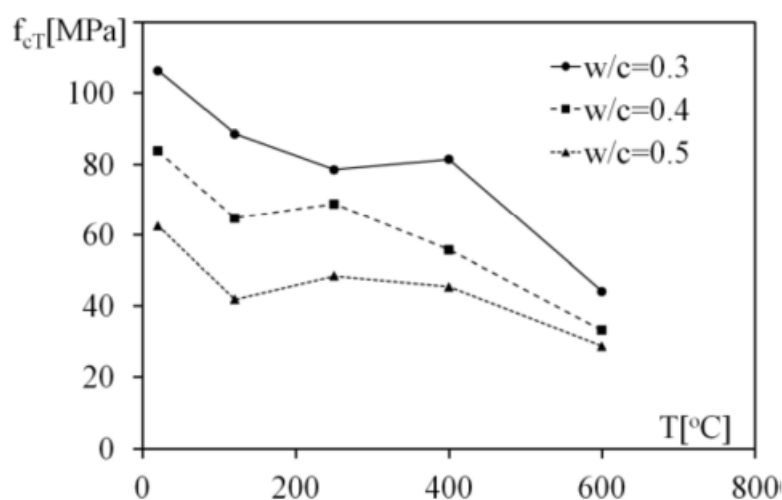


Obr. 6 – Barevné změny betonu při zvyšující se teplotě [27]

- Změna pevnosti v tlaku

Pokud je beton vystaven vysoké teplotě je jeho pevnost v tlaku vysoce ovlivněna počáteční pevností, vodním součinitelem, mírou zhutnění, rychlostí zahřívání a chlazení, druhem použitého pojiva a kameniva. Na Obr. 7 je uveden vliv vodního součinitele na změny pevnosti v průběhu zvyšující se teploty. Během zahřívání betonu na teplotu dosahující 120 °C pozorujeme první výrazné změny pevnosti v důsledku odpařování volné a části fyzikálně vázané vody. Pevnost se sníží zhruba o 30 %. Při následném zvyšování teploty zhruba do 250 °C je částečné zvýšení pevnosti ovlivněno hydratací dosud nehydratovaných zrn cementu. Poté dochází opět k poklesu. V intervalu 400-500 °C dochází k uvolnění chemicky vázané vody, vzniklá pára vyvozuje tlak a způsobuje zmenšování pevností díky uvolňování vazeb. Při teplotě nad 500 °C dochází k rapidnímu snížení pevnosti zhruba o 60 %.

[51]



Obr. 7 - Změny pevnosti v tlaku se zvyšující se teplotou závislé na vodním součiniteli [40]

- Odprýskávání

Jedná se o nejčastější problém, který nastává při vystavení betonu vysokým teplotám. Tento jev se označuje jako spalling neboli odlupování (odprýskávání) betonu. Odprýskávání souvisí s obsahem vlhkosti v betonu. V těchto případech dochází k odloupení části betonu, jako je například krycí vrstva výztuže.

Nejvíce nebezpečnou variantou odprýskávání je takzvané explozivní odprýskávání, ke kterému dochází při požáru. Explozivní odprýskávání je založeno na přeměně vody uvnitř betonu na páru, která zvětšuje svůj objem a vyvozuje tím tlak na vnitřní strukturu betonu. Pokud je pórový systém dostatečně hustý a beton

propustný, tak vzniklá pára se pomocí těchto pórů rozepíná uvnitř a část uniká k povrchu. Při nízké pórovitosti vzniklá pára nemá dostatek prostoru a začne na beton vyvozovat tahové a tlakové napětí. Tato napětí vyvozují uvnitř struktury tak velký tlak, který překračuje mechanické vlastnosti a dochází k explozivnímu odstřelu kusů betonu. [51]

4.2 Velmi nízké teploty

Při působení velmi nízkých teplot na beton může dojít ke dvěma druhům porušení. Zaprvé může dojít k účinkům, které vedou k povrchovému poškození. V druhém případě může docházet k porušení vnitřní struktury betonu.

K těmto poruchám dochází především díky působení vody, která je ve struktuře betonu, nebo pohlcena z okolní vlhkosti prostředí. Při působení nízkých teplot dochází k přeměně vody z kapalného stavu na stav pevné fáze, kterou nazýváme led a dochází tak k objemovým změnám.

4.2.1 Povrchové poškození

K povrchovému poškození dochází, pokud na konstrukci působí dva kritické faktory. Jedná se o střídání extrémního mrazu s částečným rozmrazováním a zadruhé jde o přítomnost chemických rozmrazovacích látek. [22]

Při porušení povrchové vrstvy betonu, dochází k odlučování jemných částic na povrchu betonu, který nazýváme odpadem. Odpad odloučený z povrchu betonu vyjadřujeme hmotnostně. Pokud u betonu sledujeme povrchové poškození, neznamená to, že by u něho muselo také docházet k vnitřnímu poškození. [22], [23]

Povrchové poškození nemá žádný větší vliv na statiku, či trvanlivost betonové konstrukce, ovlivňuje spíše estetickou stránku.

4.2.2 Porušení vnitřní struktury

K porušení vnitřní struktury dochází, při zamrznutí vody uvnitř betonu. Při zamrznání dochází k degradaci, snižují se mechanické vlastnosti betonu. Tyto procesy vedou k výraznému snížení trvanlivosti betonu. [24]

Pochopení chování vody ve ztvrdlém betonu je důležitým faktorem pro pochopení, jak se beton chová při vystavení nízkým teplotám, kdy dochází k zmrazování.

Vodu může rozdělit do dvou základních skupin, jedná se o vodu chemicky vázanou a vodu obsaženou v pórech. Voda, která je v betonové struktuře chemicky vázaná v cementovém tmelu, se nikdy nemůže proměnit na led. Ovšem voda nacházející se v pórech, se může dále rozdělit na gelovou a kapilární. Tímto způsobem můžeme rozdělit i mikropóry v cementovém tmelu. Velikost kapilárních pórů se pohybuje v rozmezí od 0,1 μm do 10 μm . Póry gelové mají velikost od 1 nm do 10 nm. Jak již název předpovídá, gelová voda se nachází v gelových pórech a kapilární v kapilárních pórech. Gelové póry jsou vázány pomocí Van der Waalsových sil pevné fáze, tento jev je zapříčiněn jejich velikostí. Je tedy dáno, že chemicky vázaná voda s vodou gelovou jsou spjaty s objemovou hmotností, kdežto kapilární voda je závislá na pórovitosti cementového tmele. [25]

Teplota, při které dojde k přeměně vody na led, je závislá na velikosti pórů. Voda obsažená v gelových pórech se může přeměnit na led, pouze za působení velmi nízkých teplot, které klesají až pod $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, přitom voda obsažená v kapilárních pórech se přemění na led při mnohem menších teplotách. Na degradaci a porušování betonové struktury má vliv vzniklý led. Oproti vodě je objem ledu větší asi o 9 % a tato přeměna vede k působení tlaku uvnitř struktury. [20], [23]

Během ochlazování betonových konstrukcí dochází v kapilárních pórech ke tvorbě ledu. Ten zvětšuje svůj objem a stlačuje zbylou kapalnou fázi. Pokud je rychlost ochlazování vysoká, začne působit hydraulický tlak a ten má za příčinu vznik trhlin. [20]

4.3 Střídání vysoké teploty a velmi nízké teploty

V momentě, kdy je betonová konstrukce namáhána střídavými teplotními výkyvy, jedná se o případ, kdy je konstrukce nejvíce namáhána a hrozí zde největší poškození ve struktuře betonu. Tato poškození mají vliv na mechanické vlastnosti a ty se následně podepisují na její životnosti a trvanlivosti.

Při působení vysokých teplot je konstrukce vystavována nadměrnému teplu, to je podpořeno slunečním zářením a dochází k přehřívání konstrukce. Povrch konstrukce je vysušován a dochází tak k odpařování vody ze struktury betonu. Na beton tedy působí tlak, který je vyvozen v důsledku expanze vodní páry. Tato expanze vede ke snížení soudržnosti vnitřních sil. Následně u konstrukce dochází k prudkému ochlazení. Na beton začne působit nízká teplota a beton se snaží tyto

rozdílné teploty na povrchu vyrovnávat. Konstrukce se stále snaží dosáhnout rovnováhy s okolním prostředím a se snižující se teplotou chladne. Struktura betonu opět začne pohlcovat vlhkost z okolního prostředí. Tato voda se při určitém dosažené teploty, začne přeměňovat na led, tím začne zvětšovat svůj objem. Při zvětšování objemu opět dochází k tomu, že na vnitřní strukturu betonu působí silný tlak. Střídání těchto tlaků vede ke vzniku trhlin jak ve struktuře betonu, tak na povrchu.

Trhliny vzniklé střídáním těchto extrémních výkyvů teplot, mohou mít za následek snížení pevnosti a trvanlivosti betonu. Do vzniklých trhlin se během střídání teplotních rozdílů dostává volná voda, která do trhliny zateče. Při působení vysoké teploty na beton, není tato voda nijak škodlivá a dochází k jejímu odpařování. Kdežto u působení nízké teploty, voda zatečená v prasklině opět mění svůj objem na led a dochází k takové expanzi, která má za příčinu roztrhání betonu. Pokud je v betonu umístěna výztuž, dochází kvůli těmto trhlinám ke korozi výztuže z důvodu narušení její krycí vrstvy.

4.4 Salinita

Vysoká salinita působí především na betonové konstrukce, které jsou vystaveny v blízkosti mořské vody, nebo jsou jejich části přímo v moři zabudovány. Další možností vniku chloridů do betonu může nastat v zimním období, kdy se používají rozmrazovací soli. Betonové stavby jsou v tomto prostředí vystaveny silnému působení solí (chloridů). Chloridy v betonu vyvolávají korozi ocelové výztuže a stojí za nejčastějšími předčasnými poruchami železobetoné konstrukce. [52]

Alkalita betonu podporuje tvorbu pasivní ochranné oxidové vrstvy, schopné zabránit korozi ocelových armatur zabudovaných v betonu a zaručuje přiměřenou životnost železobetonových konstrukcí. Při působení chloridů na konstrukci dochází k takzvané depasivaci výztuže. K depasivaci dochází v momentě, když chloridy dosáhnou kritické koncentrace na rozhraní cementová matrice a výztuže, což znamená že v tento okamžik klesá pH betonu pod 9 a dochází k rozpadu ochranné vrstvy oxidů železa mezi ocelí a betonem. K výztuži má volný přístup voda a kyslík, tomto okamžiku začíná docházet ke korozi výztuže. Chloridy mohou pronikat dovnitř cementové matrice z vnějších zdrojů kapilárním sáním nebo difúzí. V některých

případech však mohou být v betonu obsaženy již předtím, a to prostřednictvím kontaminovaného kameniva, příměsí nebo vody. [53]

Je dobře známo, že koroze vyvolaná chloridy je jedním z nejnebezpečnějších a nejběžnějších jevů u železobetonových konstrukcí. Proto při návrhu betonových konstrukcí do prostředí s vysokou salinitou hraje důležitou roli složení směsi a dostatečná vrstva krytí výztuže, aby bylo dosaženo zpomalení procesu difúze chloridů uvnitř cementové matrice a oddálit tak proces koroze výztuže. [53]

5 MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ TRVANLIVOSTI

V dnešní době je mnoho způsobů, jak u betonů zvýšit jejich trvanlivost, jedná se především o různé druhy přísad a příměsí. Studie však ukázaly, že největší vliv na trvanlivost a odolnost betonové konstrukce mají vstupní suroviny, tedy jejich kvalita. Následně, jakým způsobem byla betonáž prováděna a za jakých podmínek tato betonáž probíhala a jaký byl následný postup ošetřování při zrání. Na jednotlivé možnosti zvýšení trvanlivosti se podíváme podrobněji.

5.1 Ošetřování při betonáži a zrání

Ošetřování betonu při jeho betonáži se prokázalo jako jedna z nejdůležitějších vlastností, které mají výsledný vliv na trvanlivost betonové konstrukce. Při ukládání betonu do bednění dochází k tuhnutí a tvrdnutí, které vede k následnému zrání betonu. Při zrání betonu dochází k vývoji a tvorbě struktury betonové matrice. Tato matrice má vliv na výsledné pevnosti a vlastnosti betonu. Pokud dojde k porušení již v prvotních počátcích zrání, konstrukce ztrácí své požadované vlastnosti a výrazně ztrácí také na své trvanlivosti.

Vlastnost, která nejvíce ovlivňuje průběh betonáže je počasí. Při betonáži nastává komplikace, pokud jsou venku příliš vysoké teploty nebo naopak, pokud jsou venku nízké teploty. V těchto případech se doporučuje betonáž ponechat na jiný den. Jsou však země, kde by posunutí betonáže nebylo efektivní z toho důvodu, že se zde venkovní teploty pohybují stále ve stejném teplotním rozmezí. Za těchto okolností je tedy doporučeno využívat speciální způsoby již při výrobě čerstvého betonu, ale i při následném zrání betonu.

5.1.1 Velmi nízké teploty

Zimou se při betonáži myslí teploty nižší než 5 °C, už za těchto podmínek dochází ke zpomalování procesu hydratace a při 0 °C se tento proces zcela zastaví. Z hlediska klimatických podmínek rozlišujeme počasí, kde jsou mrazy velmi silné a období mrazů dlouhé. Zde dosahují teplot nižších než -10 °C. V tomto případě je nutno vedle aktivní ochrany provádět také intenzivní pasivní ochranu. V druhém případě se jedná o počasí s mírnými a krátce trvajícím mrazy, které se pohybují do -10 °C. V tomto případě postačí pouze aktivní metody ochrany a zajistit, aby u betonu nedocházelo ke ztrátám hydratačního tepla. [28]

- Aktivní ochrana

Principem aktivní ochrany je zajistit dostatečnou teplotu čerstvého betonu přidáním tepla. Zvýšení teploty betonu lze dosáhnout vnějšími vlivy, vhodně zvoleným složením betonu nebo předeříváním čerstvého betonu před uložením do bednění. [34]

Jednou z možností, která lze využít, je zakrýt beton po uložení do bednění plachtou do které je vháněn teplý vzduch. Horkovzdušné vytápění může být nahrazeno nebo doplněno elektroohřevem. Elektroohřev je uvažován jako nejlepší způsob ohřevu v porovnání s ostatními způsoby. Tímto způsobem jsme schopni provádět betonáž i při teplotách nižších než - 25 °C. Princip tohoto ohřívání je velice jednoduchý. Do betonu jsou naistalovány vodiče, které jsou napojeny na elektrický obvod a přeměnou elektrické energie na tepelnou beton zahřívají. [34],[35]

Mezi další možnosti patří předeřívání jednotlivých vstupních surovin. Do čerstvého betonu se přidává buď teplá voda nebo ohřáté kamenivo. Nejvýhodnější surovinou pro ohřev je kamenivo z hlediska výhodné tepelné stability. Kamenivo má sice oproti vodě menší měrné teplo, ale za to má skoro třikrát větší hustotu a jeho procentuální zastoupení ve směsi je mnohem vyšší, než kolik zaujímá voda. V Tab. 2 je porovnání, o kolik je nutné jednotlivé složky zchladit, aby byla výsledná teplota vyrobené směsi o 1 °C nižší. [38]

Tab. 2 - Porovnání vlivu jednotlivých složek na výslednou teplotu čerstvého betonu

Ohříváné médium	Potřebná vstupní teplota k ohřátí čerstvého betonu o 1 °C
Kamenivo	o 5 °C
Záměsová voda	o 10 °C

Dále je možné použít cementy, které mají vyšší třídu pevnosti a rychlý náběh pevností, takzvané Rkové cementy, nebo zvýšit množství cementu ve směsi. Mimo to lze použít i urychlovače tvrdnutí, díky kterým se zrychlí produkce hydratačního tepla. Dále se doporučuje použít superplastifikační přísady a snížit vodní součinitel. Poslední možnou variantou aktivní ochrany je předeřívání betonu v míchačce nebo zásobníku. To nejčastěji probíhá pomocí páry. Teplota ohřátého čerstvého betonu se pohybuje mezi 40 až 60 °C a vliv kondenzátu páry je potřeba započítat při návrhu složení betonu. [34]

- Pasivní ochrana

Při pasivní ochraně se čerstvě uložený beton pouze izoluje od okolních vnějších vlivů a nepřivádí se mu žádné další teplo. Teplo vzniká pouze vlastní hydratací. Nejčastěji se jedná o tepelnou izolaci bednění. Pokud je bednění opatřeno tepelnou izolací, snižuje se rychlost ochlazování čerstvého betonu a v betonu dochází k vývinu hydratačního tepla. Nejčastěji je na zaizolování bednění využíván expandovaný polystyren. Expandovaný polystyren je zvolen kvůli své dostupnosti, jednoduché manipulaci a tvarové variabilitě. [34]

Shrnutí doporučení při provádění betonáže za nízkých teplot:

- Zvýšit množství cementu a použít cement s vysokým nárustem hydratačního tepla a vyšší pevnostní třídy, jako například CEM I 52,5 R
- Použít přísady urychlující tvrdnutí betonu
- Dodržet teplotu čerstvého betonu v době dodávky na stavbu při nejméně 10 °C
- Snížit množství vody a použít superplastifikační přísady
- Opatřit bednění tepelnou izolací

5.1.2 Velmi vysoké teploty

Při vyšších teplotách dochází v čerstvém betonu k urychlení tuhnutí a tvrdnutí betonu. Tímto procesem dochází také k rychlejšímu odpařování vody z betonu, a to

může mít za příčinu nedostatečnou hydrataci, která vede ke vzniku trhlin v betonu. Doba zpracovatelnosti betonu se výrazně zkracuje. [28]

Teplota betonu při ukládání směsi do bednění nesmí překročit hranici 27 °C. Mezi nejjednodušší varianty v těchto podmínkách pro snížení teploty čerstvého betonu a následného hydratačního tepla je ponechat betonáž na brzké ranní hodiny, nebo naopak provádět betonáž v noci, kdy teploty nedosahují tak vysokých teplot. Další doporučením je používat cementy s nízkým hydratačním teplem, mezi tyto cementy patří CEM II a CEM III. Tyto opatření však nejsou mnohdy dostačující a musí se přejít na aktivní chlazení. Chladit lze jednak jednotlivé složky (kamenivo, záměsovou vodu, cement) zvlášť, nebo čerstvý beton jako celek. [28]

- Chlazení jednotlivých vstupních surovin

Jak již bylo zmíněno chladit lze jednak jednotlivé složky zvlášť, nebo jako celek (čerstvý beton). Bylo zjištěno, že pokud ochlazujeme jednotlivé složky v betonu zvlášť, tak nejvíce výslednou teplotu čerstvého betonu ovlivní kamenivo. V Tab. 3 je porovnání, o kolik je nutné jednotlivé složky zchladit, aby byla výsledná teplota vyrobené směsi o 1 °C nižší. Tento fakt je podpořen i tím, že kamenivo má největší procentuální zastoupení v betonové směsi. Chlazení kameniva je tedy nejefektivnější způsob, pokud neochlazujeme již výsledný čerstvý beton. [32],[33]

Tab. 3 - Porovnání vlivu jednotlivých složek na výslednou teplotu čerstvého betonu [32]

Chlazené médium	Potřebná vstupní teplota k ochlazení čerstvého betonu o 1 °C
Kamenivo	o 2 °C
Záměsová voda	o 4 °C
Cement	o 10 °C

Další z možností chlazení je přimíchávat záměsovou vodu do čerstvého betonu v podobě ledové tříště. Tento způsob je však velice náročný z toho důvodu, že led má jiný objem než voda v kapalném stavu. Ledovou tříšť tedy nemůžeme do betonu dávkovat ve stejném množství jako vodu. Receptura musí být tedy navržena s ohledem na tuto objemovou změnu.

- Chlazení čerstvého betonu

V dnešní době se však vyvíjí stále nové možnosti, jak beton efektivně za horkého počasí ochlazovat. Proto se přišlo s metodou ochlazování betonu pomocí kapalného dusíku. Bylo prokázáno, že chlazení tímto způsobem snižuje jak teplotu

čerstvého betonu, tak současně snižuje i následný vývin hydratačního tepla, přičemž výrazně neovlivní konzistenci a obsah vzduchu v čerstvém betonu.

Kapalný dusík je inertní kapalina, bez barvy, zápachu a chuti. Při běžných podmínkách dusík dosahuje teploty - 196 °C. Vyrábí se stlačováním a chlazením vzduchu, který obsahuje 78 % dusíku. Doprava na místo je nenáročná, dusík se přepravuje v cisternách v kryogenních zásobnících. Výhodou kapalného dusíku je, že ochladí daný materiál a uvolní se zpět samovolně do atmosféry. V porovnání s technologií chlazení betonové směsi pomocí ledové drti, není dávkování kapalného dusíku kapacitně omezeno. Největší výhodou technologie chlazení čerstvého betonu kapalným dusíkem je, že nijak zásadně neovlivňuje konzistenci. [33]

Chlazení kapalným dusíkem, probíhá zásadně těsně po zamíchání čerstvého betonu. K cisterně s kapalným dusíkem se přistaví autodomíchávač. K plnicímu trychtýři se upevní zařízení, které začne do betonové směsi čerpat kapalný dusík. Chlazení probíhá cyklicky, aby došlo k rovnoměrnému ochlazení celé směsi. Po každém zchlazovacím cyklu následuje krátká pauza, při které je směs řádně promíchána. Tedy zchlazení jednoho autodomíchávače trvá okolo 10 minut. [33]

Shrnutí doporučení při provádění betonáže za vysokých teplot:

- Posunout betonáž na ranní hodiny, nebo naopak noc, kdy teploty nedosahují takových hodnot jako přes den
- Do čerstvého betonu přimíchávat studené kamenivo a vodu
- V některých případech je možné dávkovat vodu v podobě ledu (tříště), toto dávkování je však velmi náročné
- Omezit působení přímých slunečních paprsků na vstupní suroviny a strojní zařízení
- Využívat cementy s nízkým hydratačním teplem, jako jsou CEM II a CEM III
- Chlazení ČB pomocí kapalného dusíku

5.1.3 Zrání a ošetřování betonu

Při ošetřování ve fázi zrání betonu je cílem dosáhnout co největší pevnosti betonu, která je zapříčiněna hydratací cementu, a nenarušit tvorbu cementového kamene. V tomto stádiu je nutno omezit nežádoucí tlakové a tahové napětí vznikající ve struktuře, pokud dojde k rychlému vysušení povrchu, nebo naopak k zamrznutí.

Kvalita může být zhoršena také pokud dojde k předčasnému odbednění. Ošetřování by proto mělo začít co možná nejdříve po uložení a zhutnění betonu. [28]

Při ošetřování musí být u betonu udržovaná dostatečná vlhkost, která je potřebná, aby proběhla hydratace cementu. Ta má vliv na vývin pevností v ranném stádiu betonu. Nesmí dojít k vysušení povrchu. Vysušení povrchu snižuje výslednou pevnost, má za příčinu smršťovací trhlinky, ale také vznikají deformace, které vedou ke snížení trvanlivosti betonu. Povrch betonové konstrukce by se tedy měl udržovat vlhký, nebo se alespoň musí zamezit odpařování vody. [28]

Nejvíce dostupnou a také nejlevnější variantou, jak betonu dodávat potřebnou vlhkost, je betonový povrch skrápět pravidelně vodou. Skrápění by mělo být v pravidelných časových intervalech. Při skrápění nebo vlhčení musí teplota vody odpovídat alespoň teplotě povrchu betonu. Příliš studená voda vyvolá teplotní šok a v betonu mohou vzniknout trhliny. Pro skrápění je tedy vhodné využít vodu na slunci ohřátou. Při tomto způsobu si musíme ovšem dát pozor, aby vody na povrchu nebylo příliš mnoho. Stojící množství vody by měl za následek odplavování jemných částic a cementového tmele z povrchu. [39]

Jako další možnost je použít folie, vlhké textilie (rohože) nebo na povrch nastříkat parotěsné látky. Pokud beton zakryjeme folií, nedochází k tak rychlému odpařování vody z čerstvého betonu, a navíc folie zadržuje vlhkost uvnitř. Vlhké textilie naopak umožňují betonu odebírat vlhkost postupně a voda není v přímém styku s povrchem, tedy nedochází k odplavování jemných částic. Textilie a rohože pro ochranu povrchu betonu musí mít dostatečnou tloušťku a texturu, zajišťující dobrou absorpci vody. Doporučuje se plošná hmotnost nejméně 600 g/m². Textilie musí být udržovány ve vlhkém stavu po celou dobu ošetřování. V dnešní době jsou však nejvíce využívány stříkané parotěsné látky. Tyto látky se pomocí trysek rovnoměrně nastříkají na povrch čerstvého betonu. Tyto parotěsné látky zabraňují odpařování vody z povrchu betonu a zároveň beton chrání před účinky UV záření. Tyto látky se následně po čase samovolně rozpadnou a nijak neovlivní výsledný vzhled a kvalitu ztvrdlého betonu.

Další důležitou ochranu betonu při jeho zrání je omezit působení silného větru v prvních dnech zrání. Při působení silného větru, dochází v konstrukci opět k rychlému a nerovnoměrnému vysušování, což může mít za následek vznik prasklinek ve struktuře, nebo smršťování betonu. Konstrukce je před větrem

chráněna bedněním po dobu, dokud nedosáhne pevností zajišťující tvarovou stabilitu konstrukce. Pokud jsou venku vysoké teploty, konstrukce se doporučuje ponechat delší dobu v bednění. A to z důvodu že konstrukci nevysušuje pouze vítr, ale i sluneční záření které tento proces ještě více urychluje. Po odbednění je opět možné použít na svislý povrch stěn nástřík, který zabraňuje těmto nežádoucím účinkům.

Shrnutí doporučení při zrání:

- Povrch pravidelně skrápět vodou v krátkých intervalech
- Povrch zakrýt folií nebo vlhkými tkaninami
- Ponechat beton v bednění po delší dobu (především za horkého počasí)
- Nastříkat na povrch parotěsnou látku (emulze na bázi parafinů)

5.2 Vstupní suroviny - příměsi

Mezi další možnosti, jak přispět k tomu, aby betonové konstrukce odolávaly různým klimatickým podmínkám, nebo jejich střídání je do betonu přidat příměs. Příměsi jsou jemné práškové látky, které do betonu přidáváme za účelem zlepšení jeho vlastností jak v čerstvém, tak zatvrdlém stavu. Nejčastěji se jedná o odpad, při výrobě prvotních surovin. Jednotlivé druhy příměsí mají své charakteristické vlastnosti a použitím těchto přídatných složek, je umožňováno vnést do betonu potřebné vlastnosti pro zvýšení jeho trvanlivosti.

5.2.1 Vysokopecní struska

Struska má pozitivní vliv na tvorbu pórů v cementovém kameni, obzvláště na distribuci gelových pórů. Gelové póry se vyznačují tím, že v nich nezamrzá voda, protože je vystavena velkému tlaku. Použitím strusky do betonu tedy zlepšujeme odolnost proti mrazu a tím celkovou trvanlivost. [43]

5.2.2 Popílek

Přidáním vysokoteplotního popílku do betonu, zajistíme lepší zpracovatelnost čerstvého betonu a její reologii, zároveň se zlepší hutnost betonu. S rostoucí dávkou křemičitých složek v popílku také dochází ke snížení vývinu hydratačního tepla. Popílek ve spojení s portlandským cementem vede ke zlepšení odolnosti vůči agresivním prostředím. [44]

5.2.3 Křemičitý úlet a mikrosilika

Přidáním mikrosiliky do čerstvého betonu zajistíme odměšování záměsové vody, bleeding a docílíme lepší zpracovatelnosti. Ve ztvrdlém betonu zvyšuje odolnost proti tvorbě trhlin, vnikání vody, ale také zvyšuje odolnost vůči agresivnímu prostředí. [44]

5.3 Vlákna

Jemná polymerní, či přírodní vlákna se do betonu nepřidávají za účelem zlepšení konstrukčních vlastností, jako jsou pevnost v tahu, nebo tlaku z důvodu nízkého modulu pružnosti (PP vlákna = 3,5-10 GPa, celulósová = 7-8,5 GPa). Do betonu se používají z důvodu snížení tvorby trhlin plastickým smršťováním při hydrataci, samoošetřování, nebo zvýšení odolnosti vůči vysokým teplotám a abrazi.[45]

5.3.1 Polypropylénová vlákna

Jsou vlákna délky od 6-18 mm a průměru 10-65 μm a pevností 300 MPa. Přidáním těchto vláken do čerstvého betonu omezíme smršťování v ranných fázích tuhnutí a tvrdnutí. Ve ztvrdlém betonu nám tyto vlákna zajistí zvýšenou odolnost vůči vysokým teplotám a jejich změnám. Polypropylénová vlákna se začínají tavit při teplotě 160 °C a zamezují tak explozivnímu odprýskávání, ke kterému dochází, pokud je beton nasycen vodou a je vystaven vysoké teplotě, jako je například požár. [27]

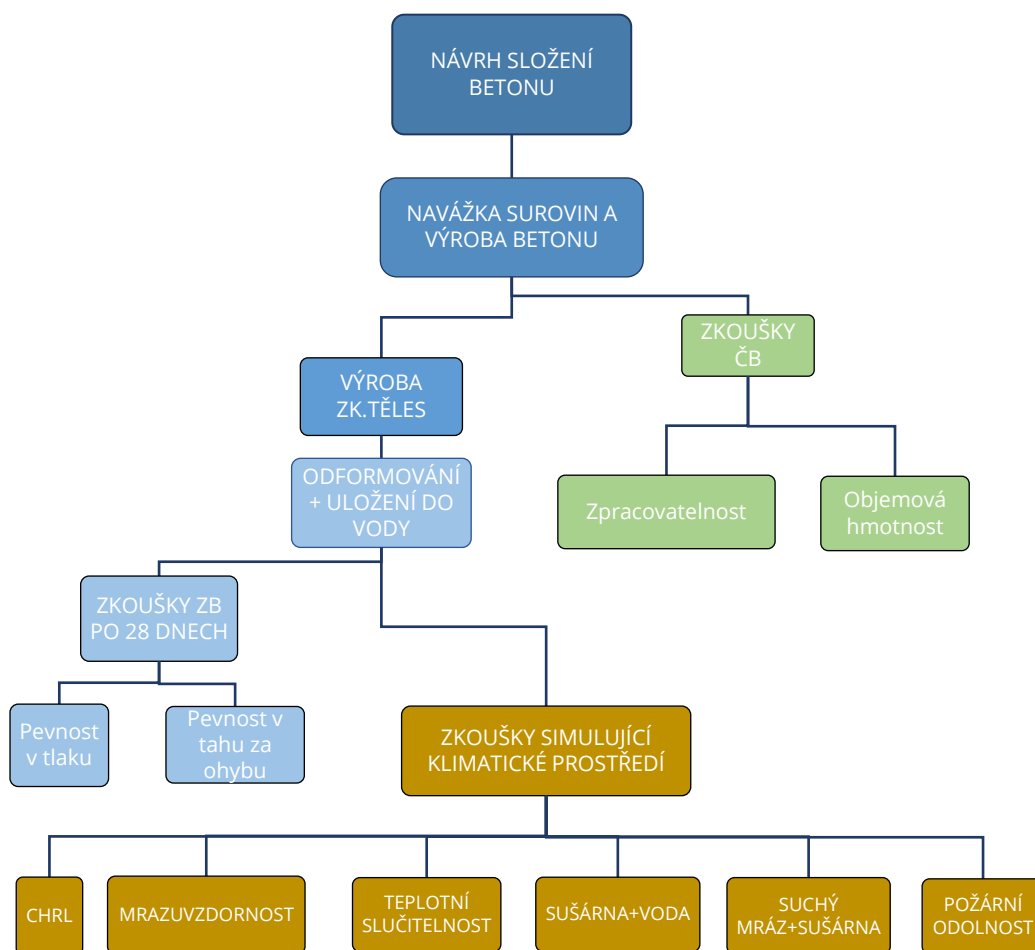
5.3.2 Celulósová vlákna

Použitím celulósových vláken do betonu zajistíme samoošetřovací funkci betonu, během jeho zrání. Vlákna v čerstvém betonu na sebe naváží určité množství vody, která je postupně v průběhu hydratace uvolňována dle potřeby. Tyto vlákna opět zajišťují zlepšení odolnosti vůči vysokým teplotám. [45]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části bakalářské práce bylo sledování a posouzení účinků různých druhů klimatických podmínek, které byly nasimulovány v laboratorních podmínkách, na kvalitu a chování tří různých betonových směsí. Během provádění byly sledovány vlastnosti čerstvého betonu a následně ztvrdlého betonu, jako jsou například zpracovatelnost, objemová hmotnost, pevnost v tlaku a případné další parametry trvanlivosti. Postupy provádění zkoušek a výsledky provedených zkoušek, jsou popsány v následující kapitole.

6 METODIKA EXPERIMENTU A PROVÁDĚNÉ ZKOUŠKY



Obr. 8 – Schéma metodiky experimentální části

Pro experimentální část byly navrženy a namíchány tři receptury s požadavkem zpracovatelnosti S4. Měření byla provedena na betonech, které obsahovaly jako pojivo CEM I 42,5 R v různém množství. Vyrobena zkušební tělesa byla uložena do různých prostředí, která simulovala působení jednotlivých klimatických prostředí. Na betonech byly následně provedeny zkoušky na posouzení sledovaných vlastností betonu.

Postup výroby a zkoušení betonů:

- 1) Návrh složení betonu
- 2) Příprava a navážka vstupních surovin a Výroba betonové směsi v horizontální míchačce s nuceným oběhem
- 3) Provedení zkoušek čerstvého betonu:
- 4) Výroba zkušebních těles, pro každou záměs bylo vyrobeno 15 krychlí o hraně 100 mm a 6 trámčů rozměru 100x100x400 mm
- 5) Odformování a uložení zkušebních těles do vodního prostředí pro dozrání
- 6) Provedení zkoušek zatvrdlého betonu
- 7) Rozdělení a uložení jednotlivých těles do simulovaných klimatických prostředí
- 8) Po uplynutí cyklování provedení zkoušek ztvrdlého betonu

6.1 Použité vstupní suroviny

6.1.1 Cement

V recepturách byl pro přípravu použit cement CEM I 42,5 R Mokrý. Parametry cementu jsou zobrazeny v Tab. 4 .

Tab. 4- Technické parametry CEM I 42,5 R Mokrý

Druh Cementu	Pevnost v tlaku [MPa]		Pevnost v tahu za ohybu [MPa]		Normální konzistence [%]	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]	Objemová stálost [mm]
	Po 2 dnech	Po 28 dnech	Po 2 dnech	Po 28 dnech				
CEM 42,5 R	30,3	59,5	6,2	9,0	27,2	211	276	0,7

6.1.2 Kamenivo

Pro výrobu všech záměsí bylo použito kamenivo složené ze tří frakcí kameniva:

- 1) DTK 0-4 mm, Žabčice – frakce vodou praná
- 2) HTK 4-8 mm, Žabčice – frakce vodou praná
- 3) HDK 8-16 mm, Olbramovice



Obr. 9 - Drcené kamenivo 8/16 Olbramovice [37]

6.1.3 Voda

Voda do záměsí byla použita z vodovodního řádu

6.1.4 Přísady

- **Plastifikační přísada**

Do všech tří navržených receptur byla použita plastifikační přísada **Sika Viscocrete - 1035 CZ**. Je to vysoce účinný superplastifikátor na bázi polykarboxylátů. Napomáhá požadované konzistenci betonu i při nízkém vodním součiniteli. Zvyšuje soudržnost, hutnost, také snižuje nasákavost a napomáhá dosažení vyšších pevností. Zvyšuje odolnost betonu vůči karbonataci a neobsahuje chloridy.

- **Provzdušňovací přísada**

Provzdušňovací přísada byla použita pouze u třetí záměsí. Byla zde použita **Sika LPS A-94/25**. Tato provzdušňovací přísada je vhodná pro betony s požadavkem na vysokou odolnost vůči působení mrazu. Použitím přísady dochází v čerstvé betonu k tvorbě vzduchových mikropórů, které betonu poskytují vlastnosti jako je jeho lepší zpracovatelnost, snížení kapilární nasákavosti, kvůli redukci kapilárních pórů, ale hlavně zvýšení odolnosti vůči mrazu a rozmrazovacím solím.

6.2 Návrh betonových směsí

Byl proveden návrh receptur pro tři různé betonové směsi. První receptura byla navržena s nejnižší pevností C16/20 pro prostředí X0, tato receptura byla považována za referenční. Druhá receptura byla navržena na pevnost C30/37 a prostředí XC4. Třetí receptura byla opět navržena na třídu pevnosti C30/37 ovšem pro třídu prostředí XF4. Složení jednotlivých receptur je popsáno níže.

1. RECEPTURA

Požadavky: C16/20 X0, S4

Tab. 5 - Složení betonu 1

Vstupní složky			1 m ³
Cement CEM I 42,5 R Mokrá		[kg]	300
Kamenivo	DTK 4-8 mm Žabčice	[kg]	1050
	HTK 4-8 Žabčice	[kg]	385
	HDK 8-16 mm Olbramovice	[kg]	478
Voda		[l]	175
Plastifikační přísada sika viscocrete-1035 CZ		0,8 % z m _c	-
		[l]	2,40
Vodní součinitel		[-]	0,58

2. RECEPTURA

Požadavky: C30/37 XC4, S4

Tab. 6- Složení betonu 2

Vstupní složky			1 m ³
Cement CEM I 42,5 R Mokrá		[kg]	360
Kamenivo	DTK 4-8 mm Žabčice	[kg]	933
	HTK 4-8 Žabčice	[kg]	373
	HDK 8-16 mm Olbramovice	[kg]	560
Voda		[l]	170
Plastifikační přísada sika viscocrete-1035 CZ		0,8 % z m _c	-
		[l]	2,88
Vodní součinitel		[-]	0,47

3. RECEPTURA

Požadavky: C30/37 XF4, provzdušněny, S4

Tab. 7 - Složení betonu 3

Vstupní složky		1 m ³
Cement CEM I 42,5 R Mokrý		[kg] 380
Kamenivo	DTK 4-8 mm Žabčice	[kg] 924
	HTK 4-8 Žabčice	[kg] 370
	HDK 8-16 mm Olbramovice	[kg] 554
Voda		[l] 160
Plastifikační přísada sika visocrete-1035 CZ	0,6 % z m _c	-
	[l]	2,28
Provzdušňovací přísada Sika LPS A-94/25	0,07 % z m _c	-
	[l]	0,27
Vodní součinitel		[-] 0,42

6.3 Zkoušky čerstvého betonu

V následujících kapitolách budou představeny a vysvětleny zkoušky, které byly v rámci bakalářské práce provedeny na čerstvém betonu.

6.3.1 Zkouška sednutí kužele

Zkouška byla provedena dle ČSN EN 12350-2, Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Jedná se o zkoušku ukazující schopnost čerstvého betonu samovolně sedat a udávající jeho konzistenci.

Zkušebními pomůckami pro provedení zkoušky je Abramsův kužel, násypka, propichovací tyč a podkladní kovová deska. Abramsův kužel, je forma tvaru dutého komolého kužele. Kužel je vyrobený z kovu nereagujícího s cementovou kaší o tloušťce stěny 1,5 mm a výšky 300 ± 2 mm. Propichovací tyč musí být rovná a hladká z oceli o kruhovém průřezu, který má průměr 16 ± 1 mm a délce 600 ± 5 mm. Oba konce tyče jsou zaobleny.

Zkouška se provádí tak, že se kužel postaví na podkladní desku a zafixuje se. Následuje plnění formy ve třech vrstvách čerstvým betonem. Každá vrstva je hutněna propichovací tyčí 25 vpichy. Od druhé vrstvy by vpichy měli projít do

kontaktu s předchozí vrstvou, aby došlo ke spojení těchto vrstev. Po naplnění se odejme násypka a horní okraj je pomocí lžice zarovnan. Následně se uvolní fixace a kužel je plynule zvedán svislým tahem po dobu 2 až 5 sekund. Po zvednutí formy, dochází k sedání kužele a po ustálení je změřena výška od nejvyššího bodu sednutí oproti výšce kužele.

Výsledná hodnota je zaokrouhlena na nejbližších 10 mm a následně je zařazena do třídy stupně sednutí. [14]

Tab. 8 - Stupně sednutí a jejich hodnoty dle ČSN EN 12350-2

Stupeň sednutí	Sednutí [mm]
S1	10 - 40
S2	50 - 90
S3	100 - 150
S4	160 - 210
S5	> 210



Obr. 10 – Zkouška sednutí kužele

6.3.2 Objemová hmotnost

Zkouška byla provedena dle ČSN EN 12350-6, Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost.

Objemová hmotnost čerstvého betonu je měření závislé na hmotnosti čerstvého betonu, vůči objemu formy, v níž je zkušební těleso vytvářeno.

Zařízením pro zkoušení je taková nádoba, která má minimální objem 5 l a musí být dostatečně pevná a utěsněná. Tato forma by také měla mít rozměr minimálně čtyřikrát větší, než je největší zrno kameniva v betonové směsi. Nádoba musí být vyrobena z materiálu, který nereaguje s cementovou kaší.

Zkouška se provádí tak, že se nejdříve zváží prázdná forma (m_1) na laboratorní váze s přesností 0,01 kg. Následně je forma, alespoň ve dvou vrstvách naplněna čerstvou betonovou směsí a zhutněna na vibračním stole. Následně je vrchní vrstva zarovnána a nádoba je očištěna od přebytečné betonové směsi. Plná forma se zváží (m_2) opět na laboratorních vahách s přesností 0,01 kg.

Výsledná objemová hmotnost se poté vypočítá dle vzorce:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [kg/m^3]$$

D ... Objemová hmotnost [kg/m^3]

m_2 ... hmotnost plné nádoby [kg]

m_1 ... hmotnost prázdné nádoby [kg]

V ... Objem nádoby [m^3]

Výsledná hodnota objemové hmotnosti se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m^3 .

[15]

6.4 Zkoušky ztvrdlého betonu

V následujících kapitolách budou představeny a vysvětleny zkoušky, které byly v rámci bakalářské práce provedeny na ztvrdlém betonu. Tyto zkoušky budou rozděleny do dvou částí. První část popisuje zkoušky, které jsou uvedeny v české normě pro beton. Druhá část popisuje zkoušky, které se od normových zkoušek odvíjí, ale primárně nejsou využity na posouzení trvanlivosti betonu. Jedná se například o zkoušky, které se provádí pro tmely a cementové malty. Pro tuto bakalářskou práci byly tyto zkoušky vhodně modifikovány, tak aby se daly provést pro posouzení trvanlivosti betonu.

6.4.1 Normové zkoušky

6.4.1.1 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Zkouška prováděna dle ČSN EN 12390-7, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu, je měření závislé na hmotnosti zkušební tělesa v ztvrdlém stavu, vůči jeho objemu.

Zkouška se provádí tak, že se těleso po odformování změří pomocí posuvného měřítka a následně se zváží na laboratorních vahách.

Výsledná objemová hmotnost se vypočítá dle vzorce:

$$D = \frac{m}{V} \quad [kg/m^3]$$

D ... Objemová hmotnost [kg/m³]

m ... hmotnost plné nádoby [kg]

V ... Objem nádoby [m³]

Výsledná hodnota objemové hmotnosti se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m³.

[16]

6.4.1.2 Pevnost v tlaku

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

Je to závislost vnější síly, která působí na zkušební těleso vůči jeho zatěžované ploše až do meze, kdy dojde k jeho porušení.

Pro tuto zkoušku je využíván zkušební lis, který musí splňovat požadavky dle EN 12390-4. Zkouška se provádí tak, že před umístěním zkušební tělesa se očistí styčné plochy lisu od nečistot, následně je zkušební těleso umístěno doprostřed tlačené plochy lisu s přesností 1 % dle velikosti zkoušené krychle. Krychle je zatěžována kolmo na směr hutnění, rovnoměrně konstantní rychlostí, která činí 0,6 ± 2 MPa/s, až do doby, dokud nedojde k porušení.

Výsledná pevnost v tlaku se vypočítá dle vzorce:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad [MPa]$$

f_c ... Pevnost v tlaku [MPa]

F ... Síla vyvozená na lisu [N]

A ... tlačaná plocha, je to plocha kolmo ke směru hutnění, při výrobě zk. tělesa [mm²]

Výsledná hodnota pevnosti v tlaku se zaokrouhlí na 0,1 MPa. [17]

6.4.1.3 Pevnost v tahu za ohybu

Zkouška prováděna dle ČSN EN 12390-5, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.

Je to závislost, při které jsou hranolová zkušební tělesa vystaveny ohybovému momentu od zatížení přenášejícího se prostřednictvím horních a spodních zatěžovacích válečků.

Zkouška se provádí tak, že zkušební těleso se umístí do zkušebního lisu kolmo na směr hutnění s čistým rozpětím mezi válečky 300 mm. Všechny zatěžovací i podpěrné válečky, musí ležet rovnoměrně na ploše zkušebního tělesa. Následně je těleso zatěžováno konstantní rychlostí bez nárazu, až do doby, dokud nedojde k porušení, v tomto případě přelomení zkušebního tělesa.

Výsledná pevnost v tahu za ohybu, se vypočítá dle vzorce:

$$f_{cf} = \frac{3 * F * l}{2 * d_1 * d_2^2} \quad [MPa]$$

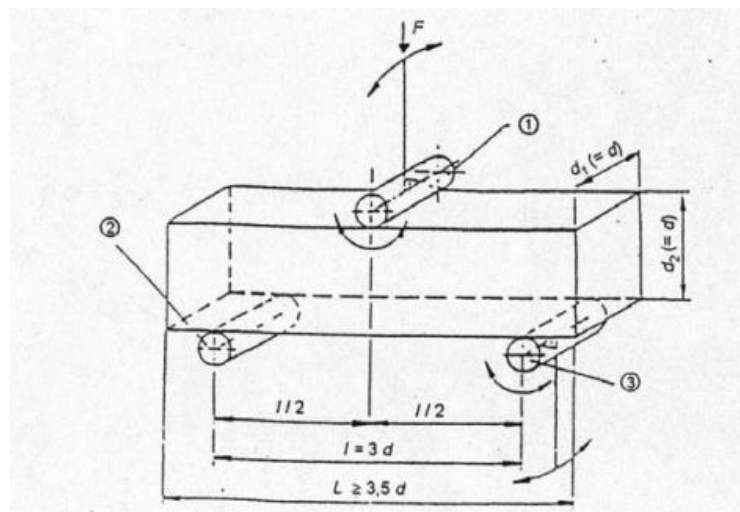
f_{cf} ... Pevnost v tahu za ohybu [MPa]

F ... Síla vyvozená na lisu [N]

l ... vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

d_1 a d_2 ... rozměry příčného řezu [mm]

Výsledná hodnota pevnosti v tahu za ohybu se zaokrouhlí na 0,1 MPa. [18]



Obr. 11 – Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa [18]

6.4.1.4 Stanovení odolnosti povrchu cementového tmele proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

Zkouška stanovení odolnosti povrchu cementového tmele proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám byla provedena metodou A. Metoda A je metoda automatického cyklování I.

Při této metodě se zkouší krychle o hraně 150 mm, v našem případě byly použity krychle o hraně 100 mm. Betonové krychle jsou vloženy do misky, kam se následně nalije 3 % roztok NaCl, tak aby hladina roztoku dosahovala výšky 5 mm nad ponořenou plochu tělesa. Zkušební cyklování probíhá střídavým zmrazováním a rozmrazováním. Cyklus je složen tak, že nejprve dochází ke zchlazení zkušební plochy na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, tato teplota se udržuje po dobu 15 minut, poté následuje ohřev zkušební plochy na teplotu $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, tato teplota je opět udržována po dobu 15 minut. [19], [20]

Vzorky jsou po každých 25 cyklech s miskou vyjmuty a pomocí stříčky se vodou splaví uvolněné částice ze zkušební plochy do misky. Odpad ze zkušební krychle je následně vysušen při teplotě $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zváží se hmotnost odpadu s přesností 0,1 g. Výsledkem zkoušky je množství odpadu v g/m^2 . Kritérium mrazuvzdornosti je zpravidla nastaven na $1000\text{ g}/\text{m}^2$. [19], [20]

6.4.1.5 Stanovení mrazuvzdornosti

Stanovení mrazuvzdornosti betonu se provádí dle ČSN 73 1322. Jedná se o zkoušku, při které dochází ke střídavému zmrazování a rozmrazování vodou nasycených betonových trámců.

Při této zkoušce se zkouší betonové trámce, které dosáhly stáří 28 dnů. Tyto trámce jsou před začátkem zkoušky uloženy nejméně 25 dní ve vlhkém prostředí a 3 dny ponořeny ve vodní lázni. Zmrazování a rozmrazování zkušebních vzorků probíhá ve zmrazovacích cyklech v rozmezí $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jeden zmrazovací cyklus je složen ze 4 hodin zmrazování a 2 hodin, kdy dochází k rozmrazování. [21]

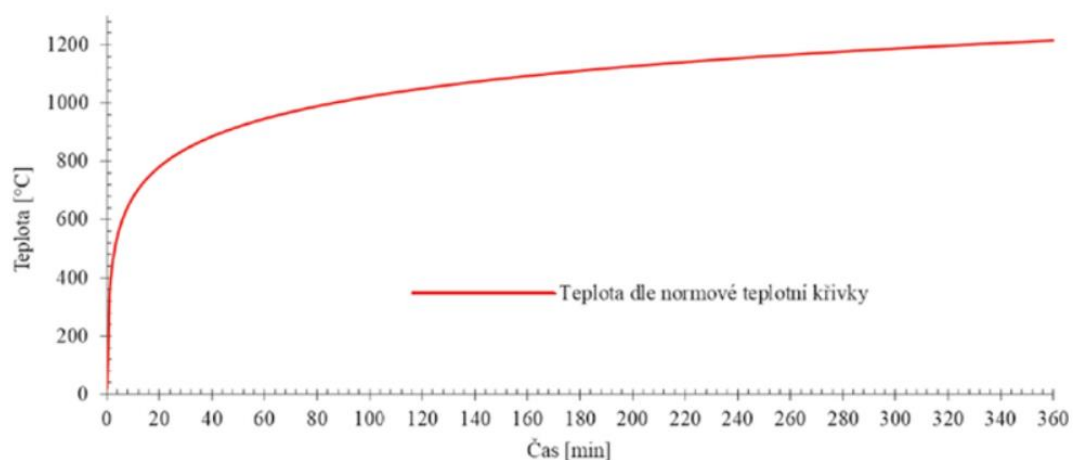
Po ukončení cyklování jsou zkušební trámce povrchově osušeny a stanoví se rozměry, hmotnost a objemová hmotnost. Následně jsou zkušební trámce zkoušeny na pevnost v tahu za ohybu a na pevnost v tlaku. Výsledkem zkoušky je stanovení hmotnostního úbytku zkušebních těles a následně se provede zkouška pevnosti za

ohybu zmrazovaných těles. Součinitel mrazuvzdornosti je dán jako poměr pevností zmrazovaných těles k pevnosti těles referenčních. Beton je vyhodnocen jako nemrazuvzdorný, v případě, že tento poměr je menší než 75 %. [21]

6.4.1.6 Požární odolnost

Zkouška požární odolnosti materiálu byla provedena dle ČSN EN 1363-1.

Zkouška byla uskutečněna na zkušebním zařízení, které umožňuje teplotní zatěžování podle normové teplotní křivky s maximální teplotou výpalu 1000 °C. Na Obr. 12 je znázorněna normová teplotní křivka, podle které výpal probíhá. [54]



Obr. 12 -Graf průběhu normové teplotní křivky

Zkoušení spočívá v teplotním zatěžování vzorku s pravidelným snímáním teplot. V průběhu zkoušky je měřena teplota ve zkušební komoře. Po provedení zkoušky se sledují mezní stavy. Norma udává 7 mezních stavů. Pro tuto bakalářskou práci byla posouzena pouze celistvost. Celistvost je doba uběhlého času v minutách, po kterou zkušební prvek zachovává svůj tvar a nedochází u něho ke tvorbě trhlin ve struktuře.

Zkouška byla provedena na zkušebních krychlích o hraně 100 mm. Mezi sledované parametry byla zahrnuta celistvost a následně byla provedena zkouška pevnosti v tlaku.

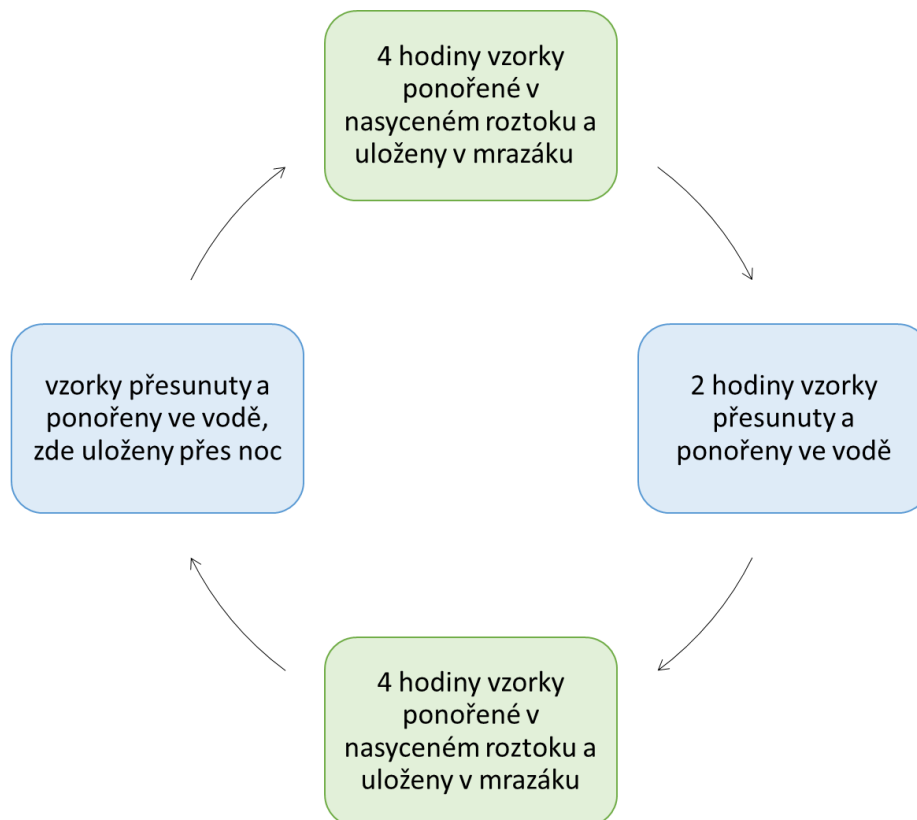
6.4.2 Vlastní zkoušky – Modifikované zkoušky klimatické simulace

6.4.2.1 Teplotní slučitelnost

Tato zkouška vychází z normy pro tmely, omítky a správkové hmoty ČSN EN 13687-1. U této zkoušky bylo cílem nasimulovat prostředí při kterém jsou betonové konstrukce vystaveny prostředí kde je především chladné počasí s vysokou vlhkostí dochází zde ale i k vysoké salinitě například z mořské vody.

Pro simulaci chladného počasí a působení salinity, byla zkušební tělesa uložena v plastové kádě a zalita nasyceným roztokem NaCl a uložena do mrazícího boxu, který byl nastavný na teplotu -24 °C. Pro simulaci pouze vlhkosti byla zkušební tělesa umístěna do kádě s čistou vodou.

Cyklování bylo vymyšleno tak, aby každý den proběhly 2 cykly zmrazování se salinitou a působení vlhkosti. Vyrobene zkušební těleso krychle o hraně 100 mm se nejdříve na 4 hodiny uložilo do plastové kádě a bylo zalito nasyceným roztokem NaCl a poté vloženo do mrazícího boxu, po uplynutí této doby, bylo zkušební těleso přesunuto do kádě s vodou. Zde bylo uloženo po dobu 2 hodin. Takto proběhl první cyklus. Druhý cyklus probíhal obdobným způsobem s tím rozdílem, že zkušební těleso bylo ve vodě uloženo do druhého dne. Způsob cyklování je vysvětlen na Obr. 13.



Obr. 13 – Průběh při cyklování za 1 den Teplotní slučitelnosti

V průběhu zkoušky, bylo u zkušebních těles sledováno, zda nedochází k vnějším mechanickým poškozením, jako jsou například odlupování, či popraskání struktury, nebo vzniku trhlin. Po ukončení cyklování byla na zkušebním tělese provedena zkouška pevnosti v tlaku a stanovení odloučených částic z povrchu betonových vzorků, které zůstaly v nasyceném roztoku.

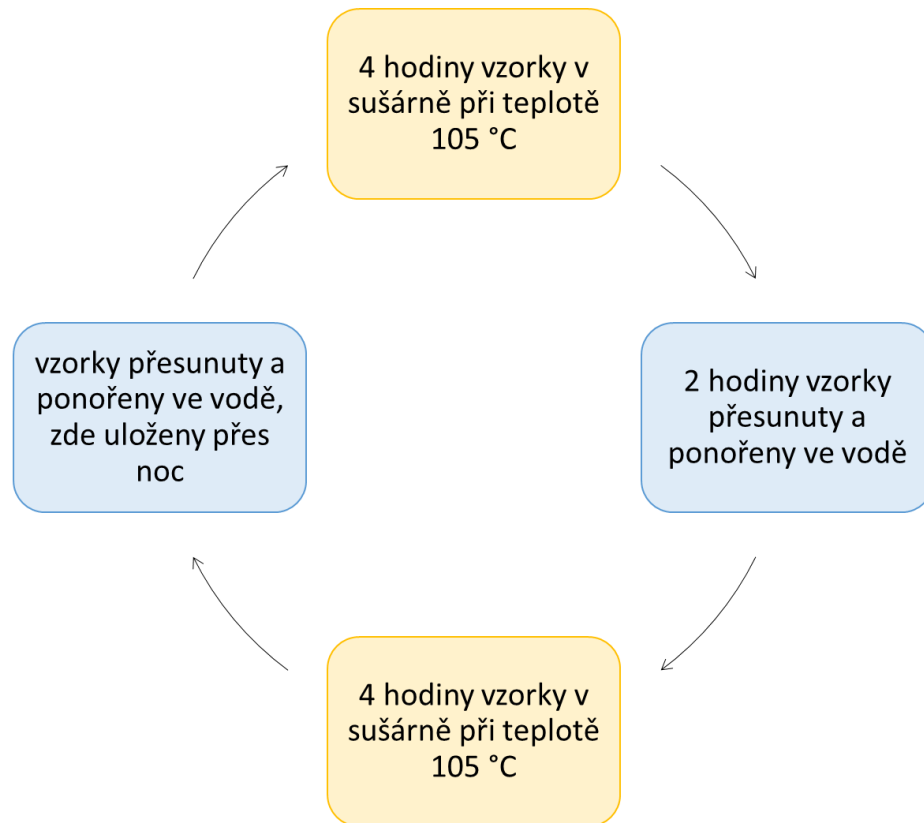
6.4.2.2 Sušárna + voda

U této zkoušky bylo cílem nasimulovat prostředí kde jsou betonové konstrukce v průběhu po výstavbě vystaveny vysokým teplotám a vlhkosti, ale zároveň jsou vysušovány. Toto vysušování je zapříčiněno silným větrem.

Pro simulaci působení tepla, ale zároveň suchého vzduchu byla zvolena sušárna. V sušárně byl nastavena konstantní teplota po celou dobu průběhu zkoušení. Teplota v sušárně činila 105 °C. Pro simulaci působení a pohlcování okolní vlhkosti, bylo zkušební těleso vždy po určitou dobu uloženo v kádi s vodou.

Cyklování bylo vymyšleno tak, aby každý den proběhly 2 cykly sušení a působení vlhkosti. Vyrobené zkušební těleso krychle o hraně 100 mm se nejdříve na 4 hodiny uložilo do sušárny, po uplynutí této doby, bylo zkušební těleso

přesunuto do kádě s vodou po dobu 2 hodin. Takto proběhl první cyklus. Druhý cyklus probíhal obdobným způsobem s tím rozdílem, že zkušební těleso bylo ve vodě uloženo do druhého dne. Způsob cyklování je vysvětlen na Obr. 14.



Obr. 14 - Průběh cyklování za 1 den Sušárna + voda

V průběhu zkoušky, bylo u zkušebních těles sledováno, zda nedochází k vnějším mechanickým poškozením, jako jsou například odlupování, či popraskání struktury, nebo vzniku trhlin. Po ukončení cyklování byla na zkušebním tělese provedena zkouška pevnosti v tlaku.

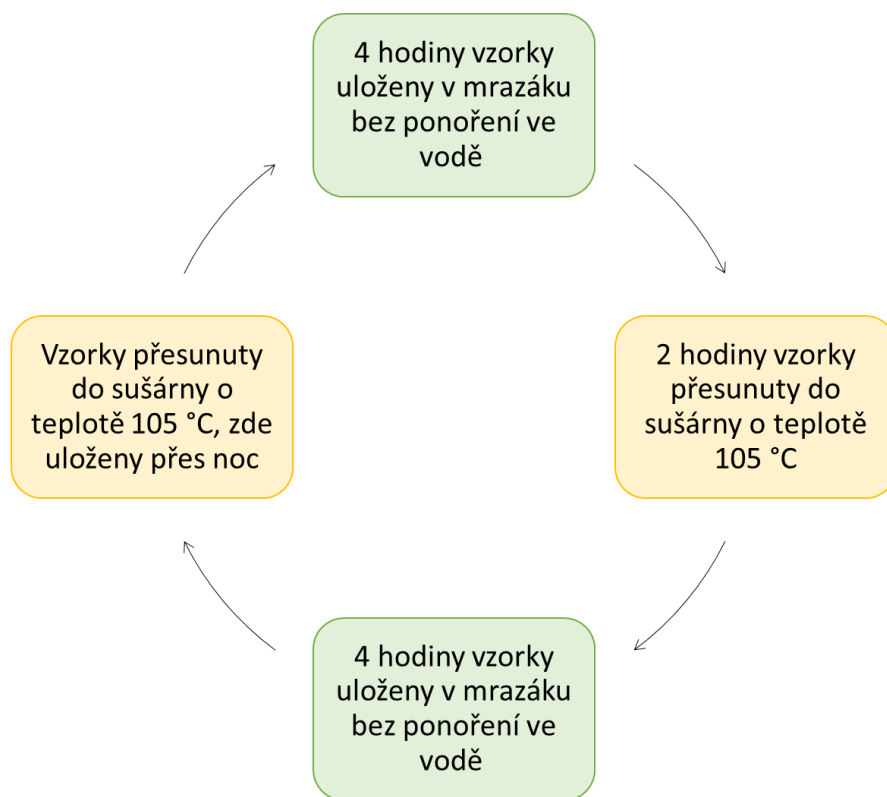
6.4.2.3 Suchý mráz + sušárna

U této zkoušky bylo cílem nasimulovat klimatické prostředí při kterém jsou betonové konstrukce vystaveny střídavému působení mrazu a působení tepla, nebo sucha. K těmto jevům dochází například u konstrukcí, které jsou postaveny v zemích kde přes den jsou zde vysoké teploty doprovázeny silnými proudy větru. V noci zde naopak teploty klesají klidně i hluboko pod mrazu.

Pro simulaci chladného průběhu byl zvolen mrazící box. Vzorky byly uloženy do plastové krabice a uloženy do boxu ve kterém byla nastavena teplota -24 °C.

Naopak na působení tepla a sucha, byla zvolena sušárna. V sušárně byl nastavena konstantní teplota po celou dobu průběhu zkoušení. Teplota v sušárně činila 105 °C.

Cyklování bylo vymyšleno tak, aby každý den proběhly 2 cykly působení mrazu a sušení. Vyrobené zkušební těleso krychle o hraně 100 mm se nejdříve na 4 hodiny uložilo do mrazícího boxu, zde na ně působil suchý mráz. Po uplynutí 4 hodin, bylo zkušební těleso přesunuto do sušárny, kde bylo ponecháno po dobu 2 hodin. Takto proběhl první cyklus dne. Druhý cyklus probíhal obdobným způsobem s tím rozdílem, že zkušební těleso bylo v sušárně uloženo do druhého dne. Způsob cyklování je vysvětlen na Obr. 15.



Obr. 15 – Průběh cyklování za 1 den Suchý mráz + sušárna

V průběhu zkoušky, bylo u zkušebních těles sledováno, zda nedochází k vnějším mechanickým poškozením, jako jsou například odlupování, či popraskání struktury, nebo vzniku trhlin. Po ukončení cyklování bylo na zkušebním tělese provedena zkouška pevnosti v tlaku.

7 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

7.1 Zkoušky čerstvého betonu

Tab. 9 – ČB obsah vzduchu, sednutí kužele, objemová hmotnost

Receptura	Obsah vzduchu [%]	Sednutí kužele [mm]	Objemová hmotnost ČB [kg/m ³]
1	-	190	2350
2	-	190	2400
3	7,2	210	2280

7.2 Zkoušky ztvrdlého betonu

7.2.1 Zkoušky po 28 dnech

Tab. 10 – Objemová hmotnost, Pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech

Receptura	Objemová hmotnost ZB [kg/m ³]	pevnost v tlaku f_c [MPa]		Pevnost v tahu za ohybu f_{cf} [MPa]
		KRYCHLE	ZLOMKY TRÁMCE	
1	2310	31,4	34,4	4,7
2	2360	59,0	61,5	8,3
3	2250	46,7	47,7	6,7

7.2.2 Zkouška mrazuvzdornosti

Tab. 11 – Pevnosti před a po zmrazování, stanovení mrazuvzdornosti

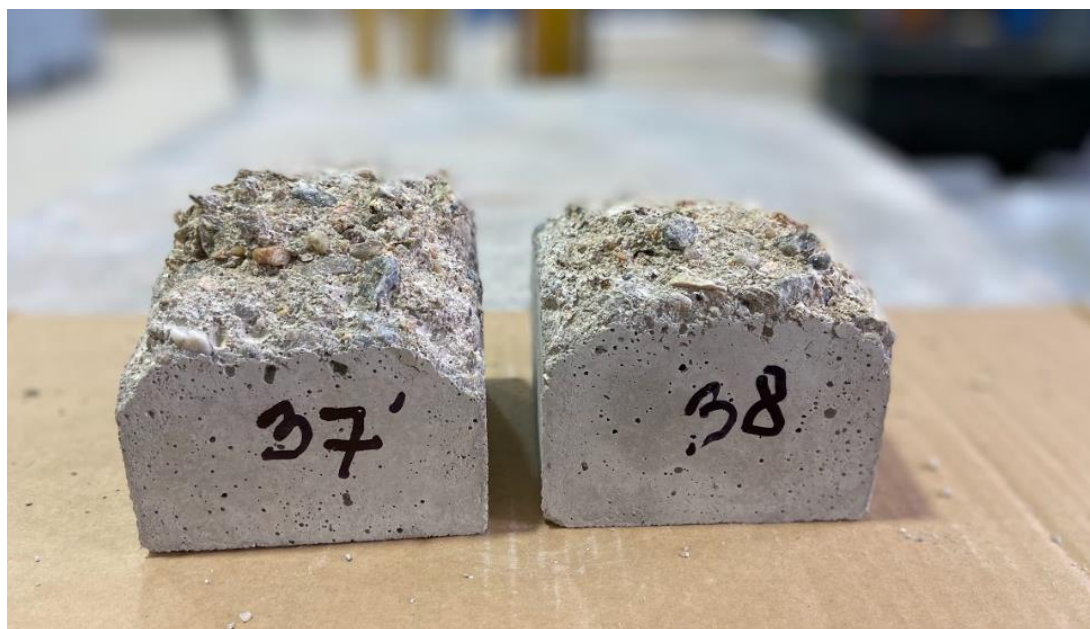
receptura	Před zmrazováním		Po zmrazování (100 cyklů)		Součinitel mrazuvzdornosti - pevnost v tahu za ohybu [-]	
	Průměr pevnost f_{cf} [MPa]	Průměr pevnost f_c [MPa]	Průměr pevnost f_{cf} [MPa]	Průměr pevnost f_c [MPa]		
1	4,7	34,4	1,4	22,0	0,30	NEVYHOVÍ
2	8,3	61,5	1,6	45,6	0,19	NEVYHOVÍ
3	6,7	47,7	6,6	44,7	0,99	VYHOVÍ

7.2.3 Stanovení odolnosti povrchu cementového tmele proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

Tab. 12 – Hodnoty po provedení zkoušky CHRL

Receptura	Označení vzorku	Odpad po cyklech [g/m ²]						Stupeň porušení po 100 cyklech
		25	50	75	100	125	150	
1	37	1421,0	3096,8	Rozpad ***	Rozpad ***	-	-	5 - rozpadlý
	38	2246,2	4608,7	Rozpad ***	Rozpad ***	-	-	
2	28	834,9	2901,6	Rozpad ***	Rozpad ***	-	-	5 - rozpadlý
	29	610,9	1721,6	Rozpad ***	Rozpad ***	-	-	
3	57	90,1	364,5	679,0	1019,3	1316,2	1574,8	4 - silně narušený
	58	163,0	386,0	677,9	1043,9	1357,5	1578,0	

*** Zkušební vzorky byly podrobeny 100 zmrazovacím cyklům, při hodnotách výrazně převyšující odpady 3000 g/m² byly výsledky zkoušek vyhodnoceny jako rozpad vzorku.



Obr. 16 – Zkušební vzorky po zkoušce CHRL – RECEPTURA 1



Obr. 17 - Zkušební vzorky po zkoušce CHRL – RECEPTURA 2



Obr. 18 - Zkušební vzorky po zkoušce CHRL – RECEPTURA 3

Zkušební tělesa byla podrobena zkoušce stanovení odolnosti povrchu cementového tmele proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám dle metody A. U všech zkušebních těles bylo plánováno provést 150 cyklů, ovšem u receptury 1 a 2 došlo k nadměrnému odpadu, jež přesahoval výrazně hodnotu 3000 g/m^2 , již u 50 cyklů. U těchto vzorků se dále pokračovala do 100 cyklů a následně byla zkouška ukončena a vzorky vyhodnoceny jako rozpadlé. Receptura 3 nepřekročila hodnotu 3000 g/m^2 ani po 150 cyklech a vzorek byl vyhodnocen jako silně narušený.

7.2.4 Požární odolnost

Tab. 13 - Vyhodnocení parametrů trvanlivosti požární odolnosti

Receptura	Vlhkost před výpalem [%]	Pevnost f_c po 28 dnech [MPa]	Pevnost f_c po požární odolnosti [MPa]	koeficient požární odolnosti [-]	Vizuální posouzení
1	0,6	34,4	7,8	0,23	Povrchové trhliny Odlupování povrchu Změna barvy
2	1,0	61,5	18,5	0,30	Povrchové trhliny Změna barvy Vysušená struktura
3	1,0	47,7	12,3	0,26	Povrchové trhliny Změna barvy Vysušená struktura



Obr. 19 - Zkušební vzorky po výpalu



Obr. 20 - Zkušební kostky po pevnosti v tlaku, vnitřní struktura



Obr. 21 – Detail porušení (RECEPTURA 1 vlevo a RECEPTURA 2 vpravo)



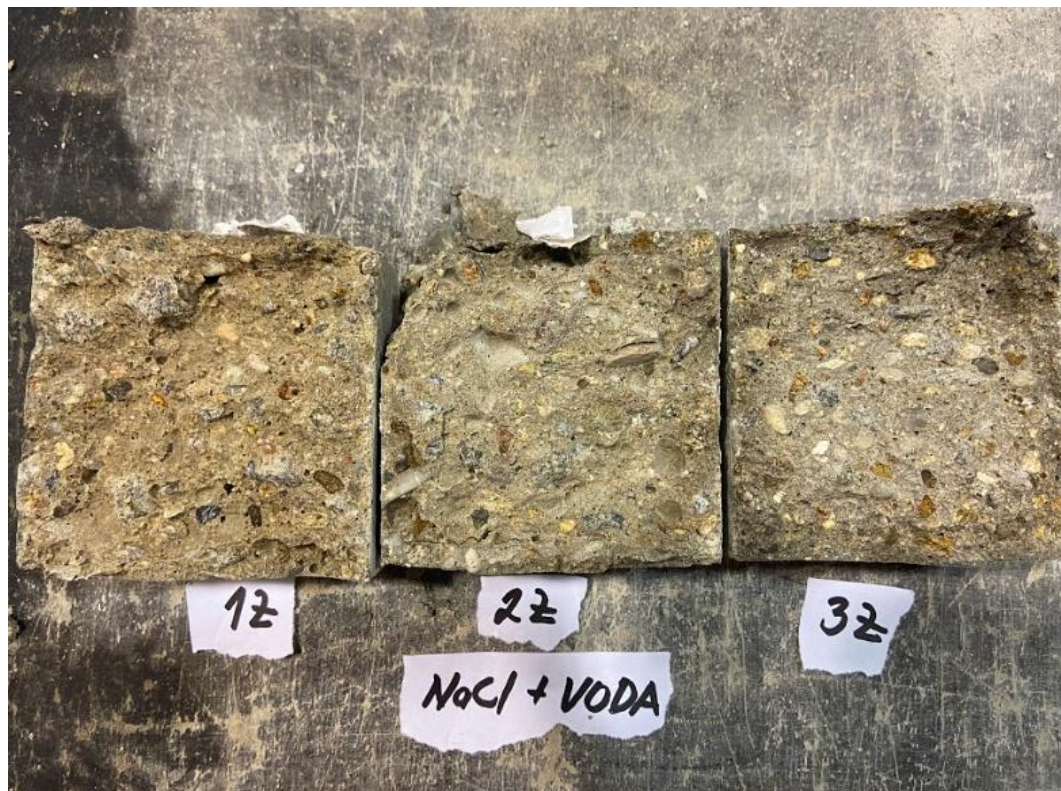
Obr. 22 - Detail porušení RECEPTURY 3

Zkušební tělesa byla podrobena zkoušce dle pálicí křivky do teploty 1000 °C. U všech zkušebních vzorků došlo ke vzniku trhlin, ale nedošlo k rozpadu. U receptury 1 začalo docházet také k odlupování větších částí betonu. Následně byla na zkušebních vzorcích provedena zkouška pevnosti v tlaku, kde je zřejmé že působením vysoké teploty došlo ve všech případech ke snížení pevnosti v tlaku oproti pevnostem referenčním o více jak 70 %.

7.2.5 Teplotní slučitelnost

Tab. 14 – Vyhodnocení parametrů trvanlivosti teplotní slučitelnosti

Receptura	Pevnost f_c po 28 dnech [MPa]	Pevnost f_c po 50 cyklech [MPa]	koeficient cyklování [-]	Vizuální posouzení
1	34,4	37,3	1,08	Bez povrchových trhlin Změna barvy vnitřní struktury
2	61,5	66,1	1,07	Bez povrchových trhlin Změna barvy vnitřní struktury
3	47,7	57	1,19	Bez povrchových trhlin Změna barvy vnitřní struktury



Obr. 23 – Struktura betonu po 50 cyklech teplotní slučitelnosti



Obr. 24 – Zkušební vzorky po cyklování teplotní slučitelnosti



Obr. 25 – Detail povrchu zkušebního tělesa po cyklování teplotní slučitelnosti RECEPTURA 3

U zkušebních těles, které byly vystaveny teplotní slučitelnosti nedošlo ani u jedné z receptur ke vzniku trhlin na povrchu. Na povrchu bylo možné pozorovat pouze bílé mapky, kdy se mohlo jednat o výkvěty. Na vzorcích jsou zřejmé barevné odlišnosti jak na povrchu, tak uvnitř struktury. U všech tří receptur došlo po 50 cyklech ke zvýšení pevnosti v tlaku. Toto zvýšení je pravděpodobně způsobeno tím, že zkušební tělesa byla uložena ve vlhkém prostředí a docházelo tak k dodatečné hydrataci cementu a tvorbě nových krystalů. Pro dosažení relevantních výsledků o účinku agresivního prostředí nasyceného roztoku NaCl na beton by bylo vhodné provést více zatěžovacích cyklů, a to alespoň 100 oproti původním 50.

7.2.6 Sušárna + voda

Tab. 15 - Vyhodnocení parametrů trvanlivosti cyklování sušárna+voda

Receptura	Pevnost f_c po 28 dnech [MPa]	Pevnost f_c po 50 cyklech [MPa]	koeficient cyklování [-]	Vizuální posouzení
1	34,4	29,1	0,85	Bez povrchových trhlin Změna barvy vnitřní struktury Vnější změna barvy
2	61,5	58,8	0,96	Bez povrchových trhlin Změna barvy vnitřní struktury Vnější změna barvy
3	47,7	52,3	1,10	Bez povrchových trhlin Změna barvy vnitřní struktury Vnější změna barvy



Obr. 26 - Struktura betonu po 50 cyklech sušárny + vody



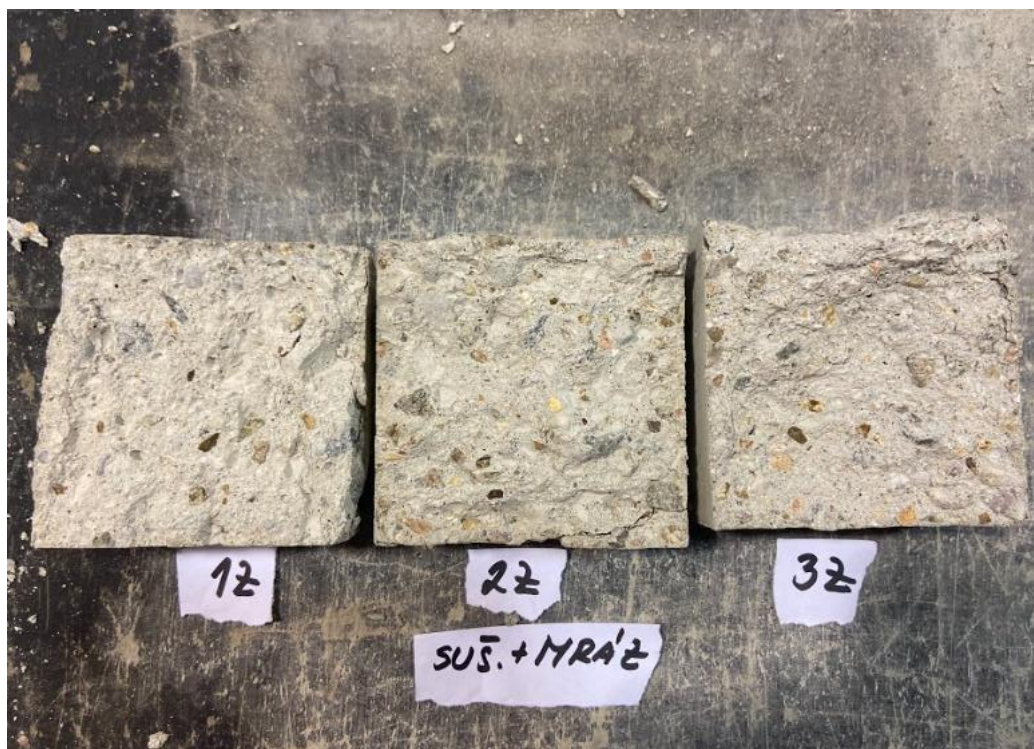
Obr. 27 - Detail povrchu zkušebního tělesa po cyklování sušárna+voda RECEPTURA 1

U zkušebních těles, které byly vystaveny cyklování sušárny+vody nedošlo ani u jedné z receptur k poškození či vzniku trhlin na povrchu. Na tělesech jsou zřejmé barevné odlišnosti jak na povrchu, tak uvnitř struktury. U receptury 1 a 2 došlo vlivem tohoto klimatického namáhání ke snížení pevnosti v tlaku, jak bylo očekáváno v důsledku objemových změn vody uvnitř struktury. V případě receptury 3 naopak došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku. V tomto případě mohlo opět dojít k dodatečné hydrataci cementu a vzniku nových krystalů.

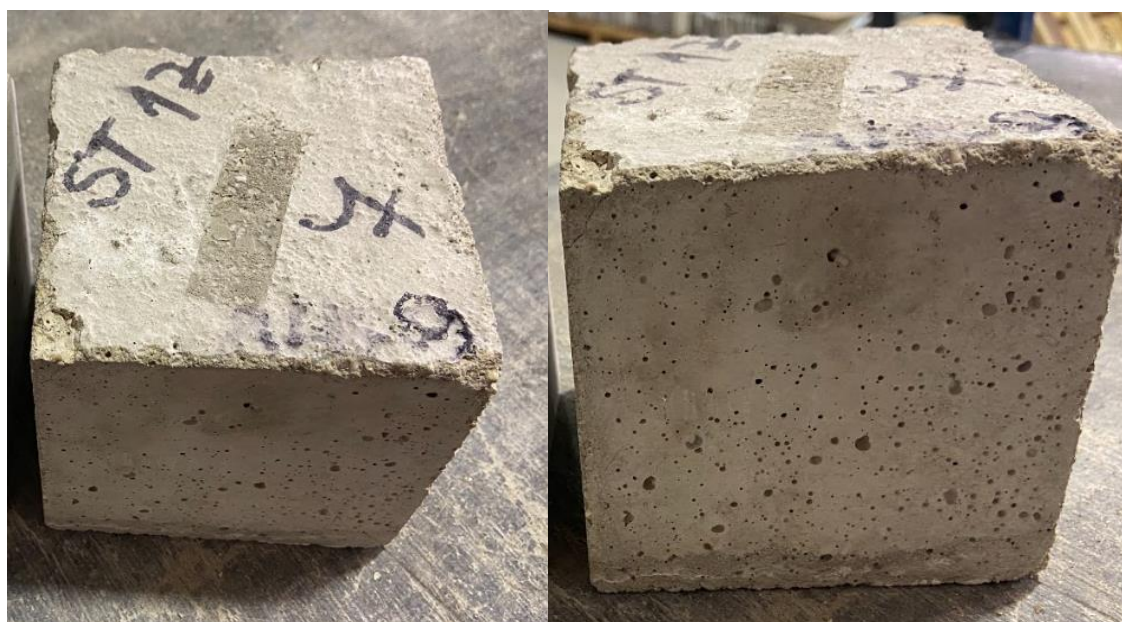
7.2.7 Suchý mráz + sušárna

Tab. 16 - Vyhodnocení parametrů trvanlivosti cyklování suchý mráz+sušárna

Receptura	Pevnost f_c po 28 dnech [MPa]	Pevnost f_c po 50 cyklech [MPa]	koeficient cyklování [-]	Vizuální posouzení
1	34,4	36,5	1,06	Bez povrchových trhlin Změna barvy vnitřní struktury Vnější změna barvy
2	61,5	73,1	1,19	Bez povrchových trhlin Změna barvy vnitřní struktury Vnější změna barvy
3	47,7	57,7	1,21	Bez povrchových trhlin Změna barvy vnitřní struktury Vnější změna barvy



Obr. 28 - Struktura betonu po 50 cyklech sušárny + suchý mráz



Obr. 29 - Detail povrchu zkušebního tělesa po cyklování suchý mráz+sušárna RECEPTURA 1



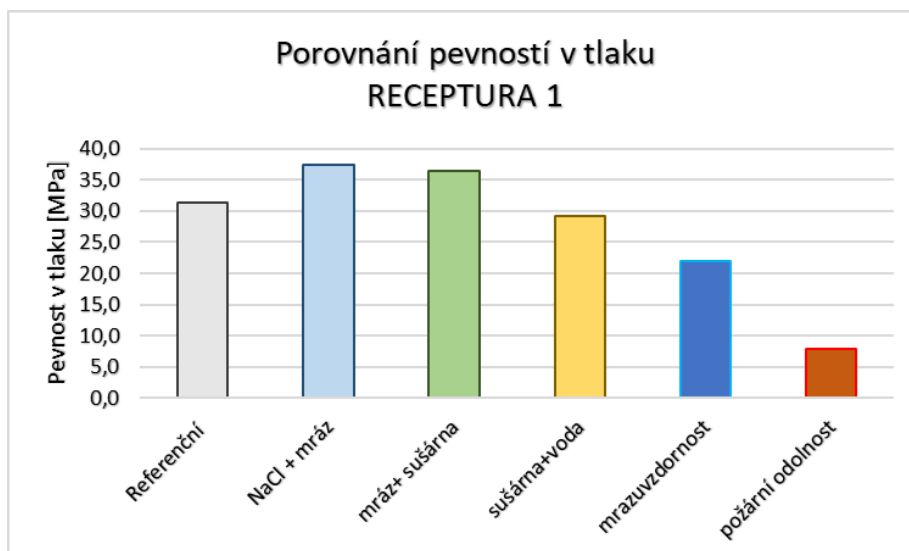
Obr. 30 - Detail povrchu zkušebního tělesa po cyklování suchý mráz+sušárna RECEPTURA 3

U zkušebních těles, které byly vystaveny střídání působení mrazu a sušárny, nedošlo ani u jedné z receptur ke vzniku trhlin na povrchu. Docházelo však k odlupování částí betonu. Na vzorcích je zřejmé že působení tepla došlo k vysušení a tím i barevné změně jak povrchu, tak struktury betonu. U všech tří receptur došlo po 50 cyklech ke zvýšení pevnosti v tlaku. Toto zvýšení je pravděpodobně způsobeno tím, že při cyklování ve struktuře docházelo k dodatečné krystalizaci a pro projevení účinků této zkoušky by bylo zapotřebí provést alespoň 100 cyklů oproti původním 50 cyklů.

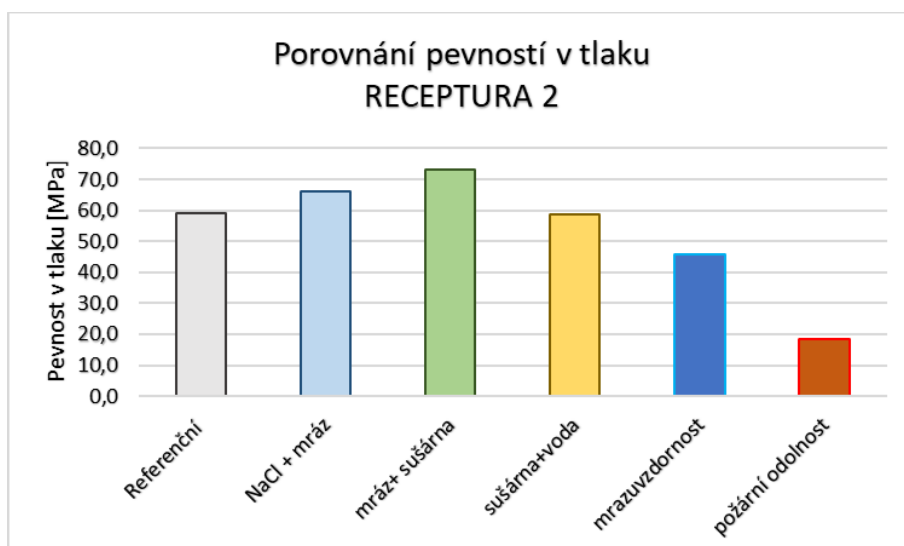
7.3 Porovnání výsledků

Tab. 17 - Souhrnné výsledky pevností v tlaku jednotlivých zkoušek

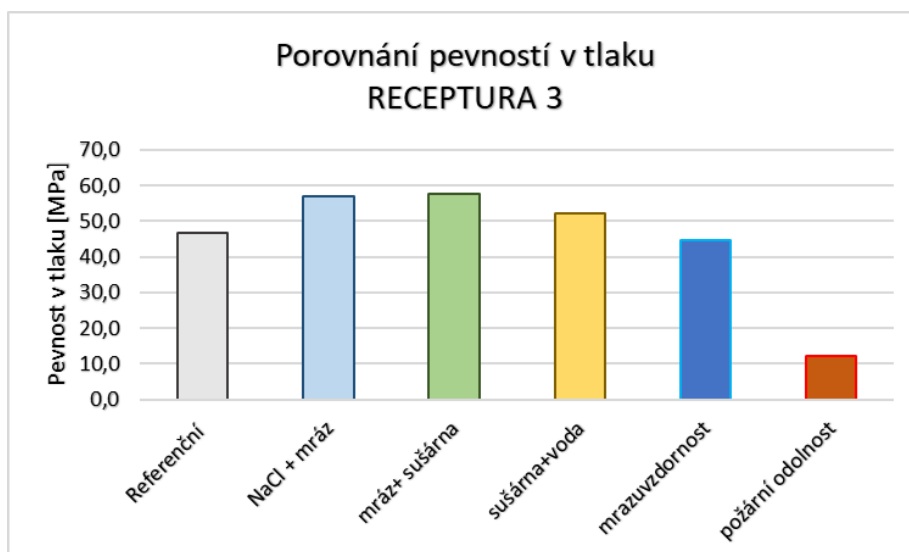
Receptura	Průměrná pevnost f_c [MPa]					
	Referenční	NaCl + mráz	Mráz + sušárna	Sušárna + voda	mrazuvzdornost	požární odolnost
1	31,4	37,3	36,5	29,1	22,0	7,8
2	59,0	66,1	73,1	58,8	45,6	18,5
3	46,7	57,0	57,7	52,3	44,7	12,3



Obr. 31 – Pevnosti v tlaku Receptura 1



Obr. 32 - Pevnosti v tlaku Receptura 2



Obr. 33 - Pevnosti v tlaku Receptura 3

ZÁVĚR

Bakalářská práce je věnována studiu chování betonu v extrémních klimatických podmínkách. Velké množství betonových konstrukcí po celém světě je vystaveno během své životnosti působení jak velmi vysokých teplot (nad 50 °C), tak také velmi nízkých teplot (nižších než -25 °C), nebo případně působení vysoké salinity z mořské vody. Cílem této práce bylo shrnutí dosavadních poznatků, které se týkají betonů, jež jsou vystaveny extrémním klimatickým podmínkám a možnostmi jakými lze dosáhnout zvýšení jejich trvanlivosti.

Beton je kompozit složený z více materiálů. Proto je část práce věnována vstupním surovinám, které jsou vhodné pro výrobu betonů, jež jsou vystaveny klimatickému namáhání. Je zde uvedena jejich charakteristika a chování za vysokých teplot, či nízkých teplot ale také jejich vliv na výsledné vlastnosti betonu z hlediska trvanlivosti a odolávání účinkům klimatického namáhání. U popisu vstupních surovin je pozornost směřována především na cement a kamenivo. A to z toho důvodu, že cement je hlavní složkou, která zajišťuje soudržnost jednotlivých složek v betonu. Výběrem vhodného druhu cementu, dokážeme ovlivnit chování a výslednou trvanlivost betonu při klimatickém namáhání. Kamenivo zaujímá zhruba 80 % objemu v betonu, proto je výběr vhodného kameniva velice důležitý. A to z toho důvodu, že opět výrazně ovlivní chování a odolnost betonu vůči extrémním klimatickým podmínkám. Každé kamenivo se při působení těchto teplot chová rozdílně. Kromě základních vstupních složek pro výrobu betonu je důležitou částí práce také popis jednotlivých druhů klimatických prostředí, které působí na beton a betonové konstrukce. Vlastnosti betonu jsou za působení vysoké teploty a nízké teploty rozdílné. Jsou zde popsány změny vlastností a možné způsoby poškození, či porušení, ke kterým může v betonu docházet v průběhu vystavení těmto extrémním klimatickým podmínkám.

V bakalářské práci je pozornost věnována také možným způsobům zvýšení trvanlivosti betonů vystavených působení těchto klimatických vlivů. V dnešní době se zvyšování trvanlivosti betonů provádí především pomocí přísad a příměsí. Studie však ukázaly, že největší vliv na trvanlivost a odolnost betonové konstrukce mají vstupní suroviny, tedy jejich kvalita. Následně jakým způsobem byla betonáž prováděna, za jakých podmínek probíhala a jaký byl následný postup ošetřování při zrání. Dominantní část této kapitoly je zaměřena na popis toho, jak postupovat při

betonáži a následném ošetřování betonu při jeho zrání, pokud byla betonáž prováděna za extrémních klimatických podmínek. Jsou zde však popsány i vybrané vstupní složky, které umožňují dostatečné zvýšení trvanlivosti.

V experimentální části práce bylo úkolem sledování vlivu jednotlivých druhů klimatických namáhání na vybrané parametry a trvanlivosti betonu. Pro experimentální část byly navrženy a namíchány 3 různé varianty betonů, různých pevnostních tříd, se stejnou zpracovatelností. U receptury č. 3 byla zároveň, pro zvýšení odolnosti proti působení mrazu, použita provzdušňovací přísada. Z každé receptury byla vyrobena zkušební tělesa. Tato tělesa byla po dosažení staří 28 dnů uložena do různých klimatických prostředí. V rámci experimentu bylo uskutečněno 6 klimatických simulací. Následně byly u vzorků sledovány parametry jako je pevnost v tlaku a vizuální změny. Pokud se podíváme na vizuální porovnání vzorků, bylo zjištěno že největší povrchové poškození vykazují vzorky, které byly vystaveny zkoušce požární odolnosti. U těchto vzorků došlo ke tvorbě trhlin, změně barvy a odlupování částí betonu. Podobné vlastnosti vykazovaly vzorky, které byly cyklovány v prostředí mráz+sušárna, jen s tím rozdílem že vzorky nevykazovaly povrchové trhliny. Pokud mezi sebou porovnáme tyto klimatické simulace a jejich vliv na výsledné pevnosti v tlaku, je zřejmé že největší pokles pevností nastává, pokud je beton vystaven žáru. Zde u všech receptur došlo v porovnání s referenčními vzorky k rapidnímu poklesu pevnosti v tlaku, a to zhruba o 70 %. U receptury 1 a 2 došlo také k poklesu pevností při zkoušce mrazuvzdornosti a cyklování sušárna+voda. Naopak u všech tří receptur došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku, při vystavení cyklování NaCl+mráz a mráz+sušárna v těchto případech došlo nejspíše během zkoušek k dodatečné hydrataci cementového tmele a ve struktuře se tvořily nové krystaly, které měly za následek zvýšení pevností. Pro prokázání negativních účinků těchto prostředí na beton, by bylo vhodné provést více zatěžovacích cyklů, a to alespoň 100 oproti původním 50-ti, které byly provedeny v této bakalářské práci.

Závěrem lze konstatovat, že cíle této bakalářské práce byly splněny. Ovšem pro přesnější stanovení a ověření účinků jednotlivých klimatických prostředí by bylo vhodné podrobit zkušební tělesa více zkušebním cyklům. Podrobnější klimatické zatěžování se sledováním vybraných parametrů odolnosti a trvanlivosti betonu je tedy vhodným námětem pro vypracování navazující diplomové práce.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROSECKÝ, Pavel. Vliv krystalizačních přísad na vodotěsnost betonů. Brno, 2017. Bakalářská práce. Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Fakulta stavební. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [2] DVOŘÁK, Jiří. KVÍTEK, Zdeněk. SLABÝ, Jiří. Betonové konstrukce I. 2.vydání. Praha: Sobotáles, 2001. 255s. ISBN 80-85920-2
- [3] KRYŠTOV, Martin. Analýza vlivu vybraných přísad na vlastnosti čerstvého betonu. Praha, 2017. Diplomová práce. Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Hana Hanzlová, CSc.
- [4] Hela, R. Technologie betonu I, Technologie betonu, Studijní opora VUT Brno, modul M01,2005.
- [5] ČSN EN 206+A2 Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, 2021
- [6] BEZDĚK, Ondřej. Vliv pH záměsové vody na hydrataci a mechanické vlastnosti cementových kompozitů. Brno, 2015. Diplomová práce. Ústav chemie materiálů. Fakulta chemická. Vedoucí práce Ing. Pavel Šiler, PH.D
- [7] JANÍČKOVÁ, Petra. Systémy rychle tuhoucích směsí na bázi portlandských cementů. Brno, 2008. Diplomová práce. Ústav strojní technologie. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Karel Rušín, DrSc.
- [8] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5
- [9] SVOBODA, Luboš. Stavební hmoty. 2. přepracované vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1
- [10] KODEŠOVÁ, Monika Studium vlivu superplastifikačních a provzdušňovacích přísad na vlastnosti čerstvých a zatvrdlých betonů. Brno, 2015. 59 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc
- [11] HELA, prof. Ing. Rudolf. Příměsi do betonu. *BETON*. 2015, **2015**(2). Dostupné také z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2015-2-04-primesi-do-betonu/>

- [12] IZORET, Laurent, et al. Concrete in a severe freezing environment: a meteorological characterization. *Materials and Structures*, 2021, 54.1: 1-18.
- [13] SHOUKRY, Samir N., et al. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 2011, 25.2: 688-696.
- [14] ČSN EN 12350-2. Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. 2009. Praha: Centrum technické normalizace, 2009.
- [15] ČSN EN 12350-6. Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Praha: Centrum technické normalizace, 2009.
- [16] ČSN EN 12390-7. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Centrum technické normalizace, 2009.
- [17] ČSN EN 12390-3/Z1. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Centrum technické normalizace, 2012.
- [18] ČSN EN 12390-5. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: Centrum technické normalizace, 2020.
- [19] ČSN 73 1326, Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látkách. MDT 666.972.017. Praha: Český normalizační institut, 1984
- [20] HOBZA, Jakub. *Odolnost betonu proti CHRL*. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc, FEng.
- [21] ČSN 73 1322, *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Z1. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [22] ZHANG, Jiak, Investigation of deterioration of joints in concrete pavement. Iowa: Iowa State University, 2013
- [23] TEPLÝ, B., ROVNANÍK, P. Účinky mrazu na beton. *Beton TKS*, 2007, 4, pp. 42- 45, ISSN 1213-3116
- [24] BECHYNĚ, Stanislav, *Stavitelství betonové- 1, vodotěsnost a jiné stavební a fyzikální vlastnosti betonu, svazek pátý*. Praha: STNL, 1961
- [25] BÍLEK, Vlastimil, Mrazuvzdornost betonu z druhého konce. In: Sborník konference Betonářské dny 2005. Praha: ČSSI (ČBS), 2005, s 109-114. IBSN 80- 86765-39-9

- [26] SLUNCE JE VINÍKEM VZNIKU TRHLIN NA STÉLÁCH PAMÁTNÍKU HOLOKAUSTU. *BETON*. 2007, **6**(42), 2.
- [27] Jakub Krejčík Problematika odolnosti betonů vůči působení vysokých teplot. Brno, 2017. 68 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [28] ČESKOMORAVSKÝ BETON: Příručka technologa BETON: suroviny, výroba, vlastnosti. 1. Českomoravský beton, 2013.
- [29] AÏTCIN, P.-C. Portland cement. In: *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing, 2016. p. 27-51.
- [30] Lenka Hučínová. Chování ettringitu v různých vlhkostních prostředích při zvýšené teplotě. Brno, 2016. 76 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Marcela Fridrichová, CSc..
- [31] Přepřacovaný text přednášky z Technické a vědecké cementářské konference 2005 pořádané 27. a 28. října 2005 v Norimberku Německou cementářskou asociací. Autor: Dr-Ing. Ch. Müller, Výzkumný ústav cementářského průmyslu, Düsseldorf.
- [32] Tůma, A.: Technologie chlazení betonu kapalným dusíkem. Sborník Technologie betonu 2009.
- [33] Technologie chlazení betonu v TBG METROSTAV. *Materiály pro stavbu*. 2013, **XIX**(7), 76-77.
- [34] KOMPAS, Michal. *Opatření pro stavbu v zimním období*. 2018. Bachelor's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- [35] DEVERA, Filip. *Vybrané aspekty výstavby v extrémních klimatických podmínkách*. 2017. Master's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- [36] In: *Ebeton* [online].[cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/slozeni-betonu-slozky-betonu/>
- [37] Štěrka, kamenivo, písek [online]. HeidelbergCement Česká republika, 2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/kamenivo>

- [38] VILD, Václav. *Experimentální analýza betonu při extrémně nízkých teplotách*. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Radek Štefan Ph.D., Ing. Jakub Holan.
- [39] Českomoravský beton. 7. DÍL: OŠETŘOVÁNÍ BETONU: Rádce na beton [online].In:[cit.2022-05-14].Dostupné z: <https://www.transportbeton.cz/7-dil-osetrovani-betonu.html>
- [40] HAGER, I., Behavior of high performance concretes at high temperature – evolution of mechanical properties, PhD thesis (in french), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, november 2004, 182 p.
- [41] COLLEPARDI, M., Moderní beton, Betonové stavitelství, Praha, 2009, p. 0-342, ISBN 978-80- 87093-75-7
- [42] HLAVINKOVÁ, Eva. Potenciální náhrada vysokopevní strusky ve směsných portlandských cementech. Brno, 2012. 64 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Marcela Fridrichová, CS
- [43] Adéla Halešová, Studium vlivu příměsí na trvanlivost provzdušněných betonů. Brno, 2015. 64 s., 74 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
- [44] David Fittl Možnosti využití krystalizačních a těsnících přísad pro betony ve vysoce chemicky agresivním prostředí. Brno, 2019. 78 s., 3 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
- [45] Lukáš Kavka Efekt aplikace jemných organických vláken do kompozitů s cementovou maticí. Brno, 2019. 71 s., 3 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [46] DVORÁK, Matěj. *Mrazové zvětrávání pískovců: mechanismy a laboratorní experimenty*. Praha, 2016. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Geologie. Vedoucí práce Doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.

- [47] PEŘKA, Lukáš. *Druhy a složení cementů podle ČSN EN 197-1 ed. 2 (TP 2.2): ČESKÁ KOMORA AUTORIZOVANÝCH INŽENÝRŮ A TECHNIKŮ ČINNÝCH VE VÝSTAVBĚ Rada pro podporu rozvoje profese ČKAIT*. 2020.
- [48] VETCHÝ, Jan. *Vapenné výkvěty*. www.mct.cz, 2016, 1-10.
- [49] TILLOVÁ, Jana. *Studium chování betonů při působení vysokých teplot*. Brno, 2013. 122 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D..
- [50] N.R. SHORT, J.A. PURKISS, and S.E. GUISE, "Assessment of fire damaged concrete using color image analysis", *Construction and Building Materials* 15, 9–15 (2001).
- [51] Jan Klobása *Vliv vysokých teplot na vlastnosti betonu*. Brno, 2020. 66 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
- [52] GOYAL, Arpit, et al. Inhibitor efficiency of migratory corrosion inhibitors to reduce corrosion in reinforced concrete exposed to high chloride environment. *Construction and Building Materials*, 2021, 303: 124461.
- [53] COPPOLA, Luigi, et al. Chloride diffusion in concrete protected with a silane-based corrosion inhibitor. *Materials*, 2020, 13.8: 2001.
- [54] ČSN EN 1363-1 *Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky*. Praha: ÚNMZ. 2013.