

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra technologie staveb



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Náhrada cementového pojiva příměsí
pro transportbeton**

Bc. Pavlína Řezáčová

2017

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

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

V Praze 8. 1. 2017

.....

Bc. Pavlína Řezáčová



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Řezáčová Jméno: Pavčina Osobní číslo: 396608
Zadávací katedra: K122 - Katedra technologie staveb
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T045 Příprava, realizace a provoz staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Náhrada cementového pojiva příměsí pro transportbeton
Název diplomové práce anglicky: Replacement of cement binder with admixtures for ready-mix concrete
Pokyny pro vypracování:
1) Rešerše k vlastnostem a složení transportbetonů (z hlediska materiálového a technologického).
2) Normové a další požadavky na transportbetony a cement.
3) Rešerše k materiálové základně příměsí pro betony s ohledem na změnu vlastností betonu při jejich použití.
4) Návrh betonových receptur zaměřený na náhradu cementu vyšších směsných tříd pomocí příměsí.
5) Vyhodnocení reologických vlastností betonů s použitými přísadami (konzistence, obsah vzduchu v čerstvém betonu, hloubka průsaku tlakovou vodou, teploty záměsí).
6) Vyhodnocení mechanických a fyzikálních vlastností betonů s použitými přísadami (pevnost v tlaku, objemová hmotnost).
7) Diskuze výsledků z hlediska normových požadavků a návrh pro náhradu cementu v transportbetonech.
Seznam doporučené literatury:
1) ČSN EN 206 Beton
2) ČSN EN 13670 Provádění betonových konstrukcí
3) Pytlík, P. Technologie betonu
4) Škvára, F. Chemie a technologie anorganických pojiv
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce: 12.10.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Poděkování

Chtěla bych tímto poděkovat Ing. Rostislavovi Šulcovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích. Také bych chtěla poděkovat společnosti CEMEX Czech Republic, s. r. o. konkrétně pobočce Betonárna Plzeň Prior za možnost provádět zde praktickou část mé diplomové práce.

ANOTACE A KLÍČOVÁ SLOVA

Práce se zabývá náhradou portlandského cementu cementem portlandským směsným nebo mletou vysokopecní granulovanou struskou a záměnou plastifikátorů nebo superplastifikátorů v jednotlivých recepturách betonu. Autorka ověřuje nové složení betonů s provedenými záměnami, porovnává a vyhodnocuje jednotlivé reologické, mechanické a fyzikální vlastnosti betonu.

Klíčová slova: Transportbeton, příměsi, mletá vysokopecní granulovaná struska, popílek do betonu, přísady, plastifikátor, superplastifikátor, portlandský cement, portlandský směsný cement

ANNOTATIONS AND KEYWORDS

The Thesis deals with the replacement of Portland cement with Portland cement mixed or ground granulated blast furnace slag and substitution of plasticizers or superplasticizers in various concrete formulations. The author verifies new contents of concretes with substitutions made, and compares and evaluates individual rheological, mechanical and physical properties of concrete.

Keywords: Transportconcrete, admixtures, ground blast furnace granulated slag, fly ash for concrete, additives, plasticizer, superplasticizer, Portland mixed cement

OBSAH

ÚVOD	10
1 TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 Beton	11
1.1.1 Dělení betonu	11
1.2 Složky betonu	12
1.2.1 Kamenivo.....	12
1.2.2 Voda	13
1.2.3 Cement	14
1.2.4 Přísady	18
1.2.5 Příměsi	19
1.3 Složení betonu	21
1.3.1 Návrh složení betonu	22
1.3.2 Dávkování a mísení složek betonu	22
1.4 Vlastnosti betonu.....	23
1.4.1 Konzistence čerstvého betonu	23
1.4.2 Obsah vzduchu	24
1.4.3 Pevnost.....	24
1.4.4 Objemové změny betonu	25
1.4.5 Permeabilita betonu	26
1.5 Transportbeton	26
1.5.1 Požadavky na transportbeton.....	27
1.5.2 Výroba transportbetonu.....	27
1.5.3 Doprava transportbetonu.....	28
2 PRAKTICKÁ ČÁST.....	29
2.1 Cíl práce	29
2.1.1 Částečná náhrada CEM I 42,5 R za CEM II 32,5 R.....	29
2.1.2 Částečná náhrada CEM I 42,5 R za MGVS	29
2.1.3 Náhrada MGVS za CEM II 32,5 R	29
2.1.4 Záměna plastifikátorů/superplastifikátorů.....	30
2.2 Vstupní materiály.....	30
2.2.1 Kamenivo.....	30
2.2.2 Voda	30
2.2.3 Cement	30
2.2.4 Příměsi	30
2.2.5 Přísady	31
2.3 Zkoušky betonu	32
2.3.1 Měření teploty čerstvého betonu	33

2.3.2	Zkouška sednutí kužele.....	34
2.3.3	Měření obsahu vzduchu čerstvého betonu	34
2.3.4	Hloubka průsaku betonu tlakovou vodou	35
2.3.5	Tlaková zkouška.....	36
2.3.6	Objemová hmotnost	37
2.4	Navržené receptury	37
2.4.1	Částečná náhrada CEM I 42,5 R za CEM II 32,5 R v kombinaci s popílkem	38
2.4.2	Částečná náhrada CEM I 42,5 R za MGVS v kombinaci s popílkem	39
2.4.3	Náhrada MGVS za CEM II 32,5 R	41
2.4.4	Záměna plastifikátorů/superplastifikátorů.....	46
3	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	51
3.1	Částečná náhrada CEM I 42,5 R za CEM II 32,5 R v kombinaci s popílkem.....	51
3.1.1	Plastifikátor Isola BV	51
3.1.2	Superplastifikátor CX Isoplast 531	57
3.1.3	Superplastifikátor CX Isoflex 833	61
3.2	Částečná náhrada CEM I 42,5 za MGVS v kombinaci s popílkem.....	65
3.2.1	Plastifikátor Isola BV	65
3.2.2	Superplastifikátor CX Isoplast 531	70
3.2.3	Superplastifikátor CX Isoflex 833	74
3.3	Náhrada MGVS za CEM II 32,5 R	78
3.3.1	Plastifikátor Isola BV	78
3.3.2	Superplastifikátor CX Isoplast 531	83
3.3.3	Superplastifikátor CX Isoflex 833	88
3.3.4	Superplastifikátor CX Isoflow 793	93
3.3.5	Superplastifikátor MasterGlenium 446 ACE.....	96
3.3.6	Superplastifikátor Readyplast 342	99
3.4	Záměna plastifikátorů/superplastifikátorů.....	114
3.4.1	CEM I 42,5 R – referenční betony.....	114
3.4.2	CEM II 32,5 R – referenční betony.....	118
3.4.3	CEM I + CEM II 80kg + Popílek	122
3.4.4	CEM I + CEM II 60kg + Popílek	126
3.4.5	CEM I + CEM II 40kg + Popílek	130
3.4.6	CEM I + MGVS 80kg + Popílek.....	134
3.4.7	CEM I + MGVS 60kg + Popílek.....	138
3.4.8	CEM I + MGVS 40kg + Popílek.....	142
4	FINANČNÍ ZHODNOCENÍ	146
5	ZÁVĚR.....	151
5.1	Částečná náhrada CEM I 42,5 R za CEM II B-M 32,5 R v kombinaci s popílkem ..	151

5.2	Částečná náhrada CEM I 42,5 R za MGVS v kombinaci s popílkem	151
5.3	Náhrada MGVS za CEM II 32,5 R	152
5.4	Záměna plastifikátorů/superplastifikátorů.....	152
	POUŽITÁ LITERATURA	154
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	155
	SEZNAM OBRÁZKŮ	156
	SEZNAM TABULEK.....	157
	SEZNAM GRAFŮ.....	161
	SEZNAM PŘÍLOH	164

ÚVOD

Beton je jeden z nejdůležitějších stavebních materiálů používaný po celém světě. Se zkvalitňováním betonových konstrukcí se přechází od betonu vyráběného na stavbě k betonu vyráběnému ve specializovaných betonárnách. V těchto betonárnách je vyráběn beton vyšší kvality a poté je dovážen na stavbu, jedná se o tzv. transportbeton. Betonárny na transportbeton mají pokrytí po celé České Republice. Proto není problém splnit požadavek maximální doby dopravy betonu 90 minut na stavbu nebo vzdálenosti mezi betonárnou a místem uložení betonu 20 – 30 km.

Základní požadavky na transportbeton a beton obecně jsou požadavky na mechanické, fyzikální a reologické vlastnosti. Mechanické a fyzikální vlastnosti zahrnují pevnost v tlaku, objemovou hmotnost a hloubku průsaku tlakovou vodou ve ztvrdlém betonu. Mezi reologické vlastnosti patří konzistence čerstvého betonu, obsah vzduchu v čerstvém betonu a teplota čerstvého betonu.

Velmi důležitým kritériem pro výrobu betonu je cena. Nejdražší surovinou při výrobě betonu je cement. Proto dochází k různým modifikačním receptur, aby došlo k minimalizaci ceny při zachování stejných vlastností nebo k jejich zlepšení. Z tohoto důvodu dochází k experimentálním návrhům receptur, ověřování vlastností nových betonů a hledání optimálního složení betonu po stránce požadovaných vlastností a stránce finanční.

Cíle této diplomové práce:

- Ověření mechanických vlastností betonů s použitou náhradou portlandského cementu, MGVS a záměnou plastifikátoru/superplastifikátoru.
- Ověření fyzikálních vlastností betonů s použitou náhradou portlandského cementu, MGVS a záměnou plastifikátoru/superplastifikátoru.
- Ověření reologických vlastností betonů s použitou náhradou portlandského cementu, MGVS a záměnou plastifikátoru/superplastifikátoru.
- Finanční porovnání výhodnosti náhrady portlandského cementu, MGVS, a záměny plastifikátoru/superplastifikátoru.

Vzorky betonů byly zhotoveny v laboratoři společnosti CEMEX Czech Republic, s. r. o. v pobočce Betonárna Plzeň Prior. V této laboratoři byly jednotlivé směsi namíchány v talířové míchačce s nuceným oběhem. Zkoušky jednotlivých vzorků čerstvého a ztvrdlého betonu byly též provedeny v této laboratoři.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část diplomové práce se zabývá betonem a zvláště transportbetonem. Konkrétně jeho složením – voda, pojivo, plnivo, přísady a příměsi, návrhem, technologií a reologickými, mechanickými a fyzikálními vlastnostmi.

1.1 Beton

Beton, dříve také nazývaný umělý kámen, je základní stavební materiál. Skládá se z pojiva, vody a plniva a vzniká po ztvdnutí všech složek. Nejběžněji používané pojivo je cement a jako plnivo se používá kombinace drobného a hrubého kameniva. Pro zlepšení vlastností betonu se přidávají přísady nebo příměsi. Vlastnosti čerstvého a ztvdlého betonu jsou ovlivněny druhem a poměrem všech přidaných složek. Vlastnosti, které můžeme takto ovlivnit, jsou např. pevnost betonu, zpracovatelnost betonové směsi, konzistence, doba tuhnutí a tvrdnutí a vodonepropustnost [2].

Technologie betonu se zabývá složením, výrobou a vlastnostmi betonu s cílem dosáhnout potřebných vlastností betonu s minimální energetickou náročností (minimální spotřebou cementu) a minimální zátěží pro životní prostředí [1].

1.1.1 Dělení betonu

Beton dělíme podle různých hledisek. Jeden beton může být součástí několika kategorií.

- Pevnost v tlaku
 - válcová = charakteristická pevnost betonu v tlaku zkoušená na válci o průměru 150 mm a výšce 300 mm měřená v MPa ve stáří vzorků 28 dnů
 - krychelná = charakteristická pevnost betonu v tlaku zkoušená na krychli o hraně 150 mm měřená v MPa ve stáří vzorků 28 dnů
- Třídy pevnosti betonu
 - Třídy pevnosti betonu jsou odstupňovány od C 8/10 do C 100/115 a lehkého betonu od LC 8/9 do LC 80/88. První údaj udává válcovou pevnost, druhý krychelnou.
- Objemová hmotnost
 - lehký beton = označení LC, 800 až 2000 kg/m³
 - obyčejný beton = označení C, 2000 až 2600 kg/m³
 - těžký beton = označení HC, nad 2600 kg/m³
- Vyztužení
 - beton prostý = beton neobsahuje výztuž se statickou funkcí
 - železobeton = beton vyztužený ocelovými pruty nebo sítěmi
 - předpjatý beton = beton obsahuje předepjaté pruty
 - vláknobeton = beton obsahuje ocelová, skelná nebo polymerová rozptýlená vlákna

- Technologie
 - staveništní = beton vyrobený v bezprostřední blízkosti stavby
 - transportbeton = beton je od míchačky do místa uložení dopravován pomocí autodomíchače
 - prefabeton = beton určený pro prefabrikované konstrukce
- Komerce
 - typové složení betonu = standardně předepsané složení betonu
 - předepsané složení betonu = odběratel stanovuje složení betonu
- Agresivita prostředí
 - Agresivita prostředí je rozdělena do pěti stupňů nazývané stupně vlivu prostředí.
- Podle způsobu výroby
 - monolitický beton – zpracovaný v místě stavby – litý do bednění
 - montovaný (prefabrikovaný) beton – odlitý do forem a v místě stavby montovaný [1]

1.2 Složky betonu

Hlavní složky betonu jsou voda, pojivo a plnivo. Nejběžněji používaný beton obsahuje cement jako pojivo. Další složky jsou přísady a příměsi. Vyztužený beton obsahuje navíc betonářskou ocel, rozptýlenou výztuž nebo předpínací výztuž [1].

1.2.1 Kamenivo

Kamenivo tvoří pevnou kostru betonu. Množství kameniva v betonu je 75 – 80 % celého objemu betonu [1].

Cílem uspořádání kameniva je vytvoření minimálních mezer mezi jednotlivými zrny kameniva – tzv. minimální mezerovitost. Z tohoto důvodu se do směsi přidávají ve vhodném poměru dvě různé frakce kameniva – hrubá a drobná. Mezerovitost kameniva udává minimální objem cementového tmele, který musí zaplnit dutiny mezi zrny kameniva [1].

Kamenivo může být přírodní, umělé nebo recyklované. Přírodní kamenivo dále dělíme na drcené, těžené nebo těžené předrcené. Těžené kamenivo vzniklo přirozeným rozpadem a vyznačuje se zaoblenými zrny. Drcené má nepravidelná zrna s ostrými hranami a vzniklo drcením. Umělé kamenivo zahrnuje např. materiály z průmyslových odpadů. Recyklované kamenivo vzniká např. při recyklaci starých betonových konstrukcí. Kamenivo do betonu se používá převážně anorganického původu [1].

Rozdělení:

- Dle velikosti zrn:
 - hrubé kamenivo = 4 - 125 mm
 - drobné kamenivo = do 4 mm
 - jemné kamenivo = 0,25 - 0,125 mm

- Dle objemové hmotnosti:
 - lehké = do 2000 kg/m³
 - hutné = 2000 – 3000 kg/m³
 - těžké = nad 3000 kg/m³
- Dle frakce kameniva:
 - úzká frakce = je vymezena síty s poměrem velikosti otvorů (velikost horního oka/velikost spodního oka) menším nebo rovným 2, např. 0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 8/16, 11/22, 16/22, 32/63
 - široká frakce = poměr velikosti otvorů větší než 2, např. 0/4, 4/16, 8/22, 0/32, [3]

Vlastnosti kameniva ovlivňuje jeho původ (chemické a mineralogické složení, obsah škodlivých příměsí) a způsob výroby (tvarový index, nadsítné, podsítné) [1].

Kamenivo nesmí obsahovat látky, které způsobují ve styku s cementovým tmelem nežádoucí objemové změny, které mohou vést k vnitřnímu napětí, a tím porušování betonu. Dále je nepřipustný obsah látek, které nepříznivě ovlivňují tuhnutí a tvrdnutí cementového tmele nebo snižují soudržnost betonu s ocelí. Látky, které jsou pro beton nepříznivé, jsou např. ornice, kořeny, cukry, soli, uhlí, hlína, rozpustné chloridy a dusičnany (způsobují korozi oceli) [1].

1.2.2 Voda

Voda má v betonu dvě funkce - hydratační a reologickou. Hydratační funkce podmiňuje hydrataci cementu a tak spolu s cementem vytváří cementový kámen. Minimální množství vody pro hydrataci cementu je cca 25 až 35 % hmotnosti cementu. Reologická funkce umožňuje vytvoření dobře zpracovatelného čerstvého betonu [1].

Pro vlastní hydrataci cementu je zapotřebí takové množství vody, které se bude chemicky vázat s mineralogickými složkami cementu. Toto množství závisí na složení cementu a na jemnosti mletí. S tímto množstvím záměsové vody je však betonová směs nezpracovatelná, protože je příliš suchá a hrozí, že proces hydratace neproběhne, kvůli částečnému odpařování vody, úplně. Proto je množství záměsové vody vždy vyšší [1].

Množství vody v čerstvém betonu vyjadřuje vodní součinitel, který se pohybuje v rozmezí od 0,25 – 0,70 [1].

Důsledkem nedostatečného množství záměsové vody je suchá směs, která je špatně zpracovatelná a není-li hutněna předepsaným způsobem, má beton malou hutnost a pevnost [4].

Vyšší dávka vody zlepšuje zpracovatelnost, ale ve ztvrdlém betonu je větší množství pórů a kapilár, beton má významně nižší pevnost a také nižší odolnost vůči vlivům prostředí. Proto je zakázané přidávat vodu do betonu na staveništi [3].

Technologickou vodu dále rozdělujeme na záměsovou a ošetřovací. Záměsová voda se dává při mísení betonové směsi.

Ošetřovací voda se dodává po zatuhnutí betonu po několik dnů pro udržení betonu ve vlhkém stavu [1].

Voda může pocházet z různých zdrojů, ale jen v některých případech se musí zkoušet před použitím do betonu (např. recyklovaná voda, průmyslová voda, přírodní podzemní a povrchová voda) [1].

1.2.3 Cement

Cement je hydraulické pojivo, které po smíchání s vodou postupně tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Tyto procesy probíhají na vzduchu i pod vodou [3].

Cement se vyrábí pálením vhodných surovin až na mez slnutí a vzniklý slínek se rozemílá na prášek. Cement se skládá z různých mineralogických složek, které vznikají při tepelném zpracování surovin na slínek [4].

Cementy dělíme:

- CEM I – Portlandský cement (výroba betonů o vysokých pevnostech)
- CEM II – Portlandský směsný cement (výroba transportbetonu)
- CEM III – Vysokopecní cement (vodní díla)
- CEM IV – Pucolánový cement
- CEM V – Směsný cement (výroba masivních betonových konstrukcí)

Cementy dále dělíme podle třídy normalizované pevnosti: 32,5 MPa, 42,5 MPa a 52,5 MPa. V České Republice se používá národní dodatek 22,5 MPa. Do betonu se používá stejná pevnostní třída cementu nebo vyšší než požadovaná pevnostní třída betonu. Pokud má cement vysoké počáteční pevnosti, značí se „R“, pokud má normální počáteční pevnost značí se „N“ [1].

Cement se normalizovaně značí např.:

CEM II / B-S (S-L-V) 32,5 R

druh cementu – podíl příměsí – druhy příměsí – normalizovaná pevnost – rychlost vývoje počáteční pevnosti [3]

Podíl příměsí:

- A = 6 až 20 %
- B = 21 až 35 % [3]

Druhy příměsí:

- K = slínek
- S = vysokopecní struska
- D = křemičitý úlet
- P = přírodní pucolány
- V = křemičité popílky
- W = vápenaté popílky
- T = kalcinovaná břidlice
- LL, L = vápence [3]

Portlandský cement

Chemické složení portlandských cementů

Nejdůležitější ze všech oxidů je oxid vápenatý. Pokud je ve směsi jeho obsah nízký, klesá pevnost cementu, pokud je jeho obsah vysoký, cement se rozpíná. Oxid křemičitý, oxid hlinitý a oxid železitý se nazývají hydraulické složky. Obsah oxidu hořečnatého nesmí překročit 5 %, protože po dosažení této hranice dochází k nadměrným objemovým změnám. Oxid vápenatý je obsažen v cementu ve formě vázané do minerálních složek a volné, tzv. volné vápno. Množství volného vápna musí být $\leq 4 \%$ nebo může nastat vápenné rozpínání [4].

Tabulka 1 - Chemické složení portlandských cementů

Složka		Obsah (%)
CaO	Oxid vápenatý	56 – 68
SiO ₂	Oxid křemičitý	16 – 26
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý	4 – 8
Fe ₂ O ₃	Oxid železitý	1 – 8
MgO	Oxid hořečnatý	0 – 5
SO ₃	Oxid sírový	0,5 – 4,5
P ₂ O ₅	Oxid fosforečný	0,1 – 0,3
Na ₂ O + K ₂ O	Oxid sodný a draselný	0,8 – 1,5
TiO ₂	Oxid titaničitý	0,1 – 0,5

Hlavní složky portlandského cementu

Anorganické látky v množství převyšujícím 5% hmotnosti všech použitých hlavních a doplňujících složek [3].

- Portlandský slínek

Vyrábí se pálením nejméně do slinutí přesně připravené surovinové směsi obsahující prvky oxidů: oxid vápenatý, oxid křemičitý, oxid hlinitý a malé množství jiných látek. Tato surovinová směs musí být homogenní. Portlandský slínek je hydraulická látka, která se musí skládat minimálně ze dvou třetin hmotnosti z křemičitanů vápenatých a ve zbylé třetině je obsažena slíneková fáze obsahující hliník, železo a jiné sloučeniny [3].

- Granulovaná vysokopecní struska

Vhodně složená strusková tavenina vznikající při tavení železné rudy ve vysoké peci se rychle ochladí a vzniká granulovaná vysokopecní struska. Struska musí být nejméně ze dvou třetin hmotnosti sklovitá a při vhodné aktivaci musí vykazovat latentně hydraulické vlastnosti. Musí se skládat minimálně ze dvou třetin hmotnosti z oxidu vápenatého, oxidu hořečnatého, oxidu křemičitého a ve zbytku je obsažen oxid hlinitý a malé množství jiných sloučenin [3].

- Pucolány

Přírodní nebo průmyslové látky, jejichž hydraulické vlastnosti jsou vyvolány vhodnou aktivací [5].

- Popílký

Popílek se získává z elektrostatických nebo mechanických odlučovačů prachových částic z kouřových plynů topenišť otápěných práškovým uhlím může být použit v cementech. Popílek může být svou podstatou křemičitý nebo vápenatý. Křemičitý popílek má pucolánové vlastnosti a vápenatý má hydraulické vlastnosti [3].

- Křemičitý popílek

Jemný prášek, který se skládá z kulových částic s pucolánovými vlastnostmi. Skládá se převážně z aktivního oxidu křemičitého a oxidu hlinitého a ve zbytku je obsažen oxid železitý, oxid vápenatý a jiné sloučeniny [3].

- Vápenatý popílek

Jemný prášek s hydraulickými a/nebo pucolánovými vlastnostmi. Skládá se z aktivního oxidu vápenatého, oxidu křemičitého a oxidu hlinitého. Ve zbytku je obsažen oxid hlinitý a jiné sloučeniny [3].

- Kalcinovaná břidlice
- Vápenec
- Křemičitý úlet [3]

Doplňující složky portlandského cementu

Jedná se o vybrané anorganické přírodní látky, které pocházejí z procesu výroby slínku nebo složky uvedené v ČSN EN 197-1 ED. 2, pokud nejsou použity v cementu jako složky hlavní. Množství nesmí převyšovat 5 % hmotnosti všech použitých hlavních složek. Doplňující složky zlepšují fyzikální vlastnosti cementu (zpracovatelnost). Nesmí výrazně zvyšovat spotřebu vody pro zpracování cementu, nesmí snižovat odolnost betonu nebo malty vůči poškození a nesmí snižovat ochranu výztuže vůči korozi [3].

Tabulka 2 - Složení Portlandských cementů

Označení výrobku	Složení (poměry složek podle hmotnosti)						Doplňující složky
	Hlavní složky						
	Slínek	Vysokopepní struska	Křemičitý úlet	Pucolány	Kalcinovaná břidlice	Vápenec	
	K	S	D	P/Q	T	L/LL	
Portlandský cement CEM I	95-100	-	-	-	-	-	0-5
Portlandský směsný cement CEM II/B-M	65-79	21-35					0-5

Výroba portlandského cementu

Výroba se skládá z těžby surovin (vápence, slínů, hlíny a břidlic) a jejich úpravy, přípravy surovinové směsi, výpalu a mletí slínku s přísadami na portlandský cement. Důležitá je výroba slínku se zadaným mineralogickým složením, zachování správného režimu výpalu a chlazení slínku [4].

V dnešní době se používají dva způsoby výroby portlandského cementu – mokrý a suchý způsob. V České Republice všechny cementárny používají pro výrobu cementu suchý způsob [4].

Při suchém způsobu se vápenec s dalšími složkami nadrtí a předsuší. Tyto složky se dávají do surovinového mlýna, kde se společně melou a dosouší se. Surovinová moučka se v homogenizačních silech homogenizuje a popřípadě se koriguje její chemické složení. Výpal slínku se provádí v peci a poté se slínek chladí v chladičích. Mletím slínku spolu se sádrovcem vzniká portlandský cement [4].

U mokrého postupu se těží suroviny s větší vlhkostí a mletí surovin probíhá ve vodním prostředí. To má výhodu vzniku dobře zhomogenizované surovinové směsi [4].

Vlastnosti portlandského cementu

- Pevnost

Jedná se o nejdůležitější vlastnost. Pevnost může být v tlaku, v tahu za ohybu a ve smyku. Rozlišují se třídy, které se odvozují od nejmenší předepsané pevnosti v tlaku po 28 dnech v MPa. Pevnost cementů během jejich hydratace a tvrdnutí stále narůstá. Pevnost je ovlivněna řadou faktorů jako např. mineralogickým složením a strukturou slínku, jemností mletí cementu, vodním součinitelem, časem a podmínkami hydratace [5].

Na pevnost cementu má také vliv doba jeho uskladnění. Na cement působí vlhkost a na povrchu zrn vznikají hydratační produkty, které snižují pevnosti po zatvrdnutí [5].

- Tuhnutí

Proces, při kterém pohyblivá směs cementu s vodou postupně houstne a získává takovou počáteční pevnost, při které se dá směs velmi těžko nebo vůbec mechanicky zpracovat [1].

Počátek tuhnutí se stanovuje na kaši s normální hustotou při pokojové teplotě a je to čas, kdy se jehla Vicatova přístroje zastaví 3 – 5 mm nad podložkou, počítáno od rozmíchání kaše [5]. Počátek tuhnutí je minimálně 45 až 60 minut a obvykle probíhá 3 až 5 hodin, maximálně 12 hodin [1].

Dobu tuhnutí lze prodloužit zvýšením obsahu vody nebo přidáním přísady a zkrátit zvýšením teploty. Cementový kámen však nesmí vykazovat nepřiměřené objemové změny, trhliny nebo odštěpky [1].

- Měrný povrch

Měrný povrch částic souvisí s velikostí zrn a zrnitostí. Čím je měrný povrch cementu větší, tím rychleji cement hydratuje, ale jeho výroba je energeticky náročnější [1].

Záměsově vody je potřeba více při větším měrném povrchu cementu a z toho důvodu má cementový kámen větší smrštění [1].

Jemnost mletí cementu není nikde předepsána. Jemnost mletí ovlivňuje počáteční nárůst pevností, počátek a dobu tuhnutí, objemové změny a rychlost vyvinu hydratačního tepla [3].

1.2.4 Přísady

Přísady jsou tekuté nebo práškovité látky, které se přidávají do betonové směsi v množství od 0,2 do 5 % hmotnosti cementu. Používají se za účelem zlepšení vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Velikost účinku přísady lze měnit její dávkou a její působení je závislé na druhu cementu, konkrétně jeho mineralogickém složení [1].

Některé přísady mají omezenou vzájemnou mísitelnost. Dávkování přísady je vhodné vyzkoušet nebo dávkovat podle návodu dodavatele. Minimální dávka přísady je 2 g/kg a maximální je 50 g/kg cementu. Pokud je přísada kapalná a je jí více než 3 litry na 1 m³ betonu započítává se do množství vody při výpočtu vodního součinitele [1].

Provzdušnění čerstvého betonu přísadou (kromě provzdušňovací přísady) nemá překročit 2 % proti referenčnímu vzorku. Přísada určená pro použití ve vyztuženém betonu nesmí korozivně napadat ocelovou výztuž [3].

Přísady dělíme dle ČSN EN 934-2+A1:

- plastifikační - redukuje záměsovou vodu,
- superplastifikační - redukuje záměsovou vodu,
- stabilizační,
- provzdušňující,
- urychlující tuhnutí cementu,
- urychlující tvrdnutí cementu,
- zpomalující tuhnutí,
- hydrofobizační - odpuzující vodu,
- plynotvorné,
- pěnotvorné [1].

Plastifikační a superplastifikační přísady

Plastifikační přísady snižují povrchové napětí vody, a tím zvyšují smáčecí schopnost záměsově vody. Výsledkem je zlepšení zpracovatelnosti betonové směsi. Při ponechání stejné zpracovatelnosti betonové směsi na původní úrovni je možno snížit dávku záměsově vody a docílit tak vyšší pevnosti betonu. Snížení dávky záměsově vody je možné využít, při zachování původní hodnoty vodního součinitele, pro snížení dávky cementu [4].

Plastifikační přísady přispívají také k rovnoměrnému rozptýlení cementu v betonové směsi, což se projevuje větší aktivitou povrchu cementových zrn při hydratačním procesu tvrdnutí a zvýšením počátečních pevností [4].

Plastifikační přísadou musí být sníženo množství vody o více než 5 % při stejné konzistenci a u superplastifikátoru o více jak 12 %. Pevnost v tlaku vzrůstá pomocí plastifikátoru za 7 a 28 dní minimálně na 110 % proti referenčnímu betonu, u superplastifikátoru je to o 140 % za 1 den a minimálně na 115 % za 28 dní. Konzistence čerstvého betonu s použitým plastifikátorem se nesmí během 30 minut od přidání přísady změnit vůči původnímu stavu. Zlepšení zpracovatelnosti proti referenčnímu betonu přidáním superplastifikátoru má být o 120 mm sednutím (proti 70 mm). Běžně používané plastifikátory (sulfonové deriváty) zhoršují zpracovatelnost s postupující dobou od zamíchání přísady [1].

Doporučuje se dávkovat 1 – 3 % hmotnosti cementu podle požadované konzistence a použití betonu [1].

1.2.5 Příměsi

Příměsi jsou jemné anorganické nebo organické látky, které se přidávají do betonové směsi za účelem zlepšení vlastností nebo k docílení zvláštních vlastností [1].

Ovlivňují množství cementového tmele. Pokud jsou latentně hydraulické, mohou snížit potřebné množství cementu, ale vždy zvyšují množství záměsové vody [1].

Rozdělení:

- Inertní příměsi (mleté horniny, kamenná moučka), pigmenty
Inertní příměsi se nezúčastňují procesu hydratace.
- Latentně hydraulické (létavý popílek, křemičité úlety) nebo pucolány [1].

Létavý popílek

Popílek je jemný prášek skládající se z kulovitých částic, které vznikají při spalování práškového uhlí. Práškové uhlí se spaluje samotné nebo se spalovaným materiálem. Má pucolánové vlastnosti a skládá se převážně z oxidu křemičitého a hlinitého [3].

Popílek se získává elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním z plynů topenišť otápěných práškovým uhlím samotným nebo i se spolu spalovaným materiálem [3].

Zrnitost popílku je závislá na použitých odlučovačích. Z elektrostatických odlučovačů je popílek jemnější než z mechanických [1].

Popílek se může před jeho použitím upravovat například tříděním, výběrem, proséváním, sušením, smícháváním, mletím, snižováním uhlíku nebo kombinací těchto procesů ve vhodném výrobním zařízení. Takto upravený popílek může sestávat z popílků různých zdrojů [3].

Podle druhu spalovaného uhlí, lokality a způsobu odlučování z odpadních látek vypouštěných do okolí má proměnlivé mineralogické, chemické a granulometrické složení. Nejvhodnější je popílek z černého uhlí [1].

Popílký bohaté na oxid křemičitý působí jako pucolány. Pucolanita se projevuje velmi pomalu a je prakticky zjištěná za 90 dnů a později [3].

Popílek zlepšuje zpracovatelnost čerstvého betonu a zvyšuje jeho vodní součinitel, protože určitou část vody spotřebuje k adsorpci na povrchu zrn.

Hydraulicky aktivní popílek zvyšuje dlouhodobé pevnosti betonu. Příměs popílku snižuje karbonataci betonu a vratné smrštění.

Maximální množství aktivního popílku je omezeno podílem: $\text{popílek/cement} \leq 0,33$ hmotnosti. Popílek zvyšuje potřebné množství vody m_V [kg/m³], proto se musí vodní součinitel upravit rovnicí:

$$w = \frac{m_V}{m_C + k * m_P} \quad (1)$$

kde: m_V množství vody [kg/m³],
 m_C množství cementu [kg/m³],
 m_P množství popílku [kg/m³],
 k k-hodnota popílku.

Pro beton obsahující cement CEM I a CEM II/A podle ČSN EN 197-1 ED.2 a vysokopecní granulovanou strusku podle ČSN EN 15167-1 se doporučuje k-hodnota 0,6 [1].

Pucolanita je schopnost látky s reakcí oxidu křemičitého v alkalickém prostředí tvrdnout za normální teploty. Podmínkou chemické reakce je alkalické prostředí vytvářené v roztoku i jinými chemickými sloučeninami, které nazýváme budiče hydraulicity [1].

Vysokopecní struska

Práškové latentně hydraulické pojivo bílé barvy. Vysokopecní struska vzniká při výrobě surového železa, kdy vsázka obsahuje i další příměsi, které zhoršují kvalitu surového železa. Proto se do vsázky přidávají struskotvorné přísady. Ze složek hlušiny se vytvářejí lehce tavitelné součásti. Vzniklá struska plave na povrchu surového železa. Na 1 tunu surového železa připadá asi 0,5 až 0,7 tun strusky. Rudy, které obsahují méně železa, poskytují více strusky [5].

Základní složení strusek je oxid vápenatý, oxid křemičitý, oxid hlinitý, oxid manganitý a v malém množství oxid železitý, sulfid vápenatý a sulfid manganatý [5].

Struska získaná ve skelné formě je označovaná za granulovanou strusku. Granulace se provádí tak, že se vzduchem nebo vodou rozptyluje tavenina v malých kapkách a vytváří se granule o velikosti cca 4 mm ve skelném stavu. Po granulaci se obsah vody snižuje pod 30% v sušících bubnech. Další způsob granulace je, kdy tavenina strusky je ochlazená vodou a potom ostříkována do vzduchu pomocí rotujícího bubnu. Při tomto postupu je možno získat řadu frakcí strusky od 0 – 4 mm do 4 – 15 mm [5].

Jemné podíly tuhých částic

Jemné podíly tuhých částic zahrnují cement, podíl jemných zrn kameniva do 0,125 mm, hydraulicky aktivní i neaktivní příměsi, barevné pigmenty a jemné částice obsažené v cementovém kalu. Tyto podíly tvoří cementový kámen, který musí dokonale obalit povrch plniva i výztuže. Technologicky je podíl jemných částic důležitý u transpotbetonu, samozhutňujícího betonu a betonu pro tenkostěnné konstrukce.

Jemné podíly zvyšují potřebné množství záměsové vody, ale zajišťují lepší přidrženost k podkladu a větší soudržnost čerstvého betonu. Proto je limitována maximální dávka do betonu podle velikosti maximálního zrna kameniva [1].

1.3 Složení betonu

Beton se skládá ze směsi dílčích materiálů (voda, cement, kamenivo), proto obsahuje velký počet nezávisle proměnných. Dále nelze uvažovat, že kamenivo a cementový kámen, který se skládá z cementu a vody, jsou homogenní. Uspořádání zrn kameniva je náhodné, dávkování složek betonové směsi se děje v daných tolerancích. Proto nelze žádné získané závislosti mezi jednotlivými veličinami považovat za dané, ale pouze za pravděpodobné [1].

Při návrhu musíme počítat se směrodatnou odchylkou souboru, proto se obecně zvyšuje požadovaná pevnost v tlaku o 4 až 8 MPa [1].

Složení betonu závisí na stupni vlivu prostředí, kterému bude konstrukce vystavena, na požadované pevnosti betonu podložené statickým výpočtem, na technologii zpracování, objemové hmotnosti, vodonepropustnosti, mrazuvzdornosti a dalších požadovaných vlastnostech betonu [1].

Stupeň vlivu prostředí definuje hodnoty pro maximální vodní součinitel, minimální množství cementu a stupeň provzdušnění. Se statickým výpočtem dále souvisí určení vzdálenosti mezi pruty výztuže a její krytí a podle toho se stanoví maximální zrno kameniva, které ještě závisí na rozměrech betonové konstrukce. Hlavním ekonomickým kritériem je minimální spotřeba cementu [3].

Množství cementu se posuzuje v objemu cementového tmele, který musí být vyšší než mezerovitost kameniva. Přebytek cementového tmele „ v “ je koeficient, kterým vynásobíme mezerovitost kameniva pro stanovení objemu cementového tmele. Hodnota koeficientu „ v “ se pohybuje od 1,05 do 1,40 [3].

Obsah jemných podílů je limitován pro $D_{max} = 16$ mm do 530 kg/m^3 , pro $D_{max} = 32$ mm do 460 kg/m^3 a pro $D_{max} = 63$ mm do 430 kg/m^3 . V tomto limitu je zahrnut cement, příměsi a jemné podíly kameniva [3].

Množství vzduchových pórů V_z v betonu se udává v % objemu. Čerstvý beton bez provzdušňovacích přísad lze prakticky zhutnit až do minimální hodnoty asi 2% [3].

Zpracovatelnost zlepšíme:

- zvýšením vodního součinitele,
- použitím plastifikátorů nebo superplastifikátorů,
- částečně zvýšením množství cementu a příměsi,
- kamenivem s větší mezerovitostí a menším měrným povrchem (snížíme podíl frakce 0/4 mm) [1].

Výslednou pevnost betonu zvýšíme:

- snížením vodního součinitele,
- cementem vyšší pevnostní třídy,
- vyšším množstvím cementu, ale pouze do určité míry,
- kamenivem s menší mezerovitostí,
- snížením podílu vzduchových pórů v betonu [1].

1.3.1 Návrh složení betonu

V první fázi návrhu složení betonu je nutné definovat požadavky na čerstvý a ztvrdlý beton. Jako vstupní požadavky k návrhu betonu slouží technologické požadavky, požadavky od projektanta a provozní podmínky [1].

Mezi technologické požadavky patří způsob zpracování čerstvého betonu, jeho konzistence, způsob dopravy a ukládání čerstvého betonu, způsob zhutňování, podmínky pro tuhnutí a tvrdnutí, teplotní pole, počáteční nárůst pevnosti a doba zpracování čerstvého betonu [1].

Požadavky od projektanta zahrnují typ konstrukce – druh stavby, expoziční třída, pevnostní třída betonu a uložení výztuže [1].

Provozní podmínky se týkají doby betonáže a dopravy transportbetonu.

Druhá fáze návrhu složení betonu zahrnuje volbu složek betonu – kamenivo, cement, vodu, přísady a příměsi [1].

Ve třetí fázi se provádí samotný návrh složení betonu podle vybraného algoritmu [1].

V poslední fázi dochází k experimentálnímu ověření složení betonu. Výpočet dávky na zkušební záměs. Stanovení konzistence čerstvého betonu, poté dochází k potřebné úpravě složení na potřebnou konzistenci a pevnost. Zhotovení zkušebních vzorků – krychlí a normové tvrdnutí 28 dní a provádění dalších zkoušek čerstvého a ztvrdlého betonu [1].

1.3.2 Dávkování a mísení složek betonu

Kvalitu promísení složek betonu posuzujeme dosažením stejnorodosti v celém objemu namíchané dávky při předepsané konzistenci čerstvého betonu [1].

Do míchačky se dávkuje cement, kamenivo a příměsi hmotnostně. Voda a přísady v suspenzi objemově nebo hmotnostně. Požadovaná přesnost dávkování u cementu, kameniva, příměsí je $\pm 3 \%$ a u přísad $\pm 5 \%$. Přesnost dávkovacího zařízení musí být pravidelně ověřována. Hmotnost kameniva je ovlivněna vlhkostí, nasáklou a povrchovou.

Dávkování přísad se doporučuje opozdit o 30 – 60 s po dávce první části vody [1].

Doba míchání závisí na typu míchačky, konzistenci a složení betonu. Prodloužená doba míchání neznamena vždy zlepšení stejnorodosti směsi. Platí podmínka optimální doby mísení [1].

1.4 Vlastnosti betonu

Vlastnosti betonu lze rozdělit na vlastnosti čerstvého betonu a na vlastnosti ztvrdlého betonu [4].

Vlastnosti čerstvého betonu:

- konzistence,
- teplota,
- objemová hmotnost,
- obsah vzduchu (u provzdušněného betonu),
- obsah vody a vodní součinitel,
- odlučování vody,
- tuhnutí betonu [4].

Vlastnosti ztvrdlého betonu:

- pevnost v tlaku, v prostém tahu, v tahu za ohybu, v příčném tahu,
- modul pružnosti,
- vodonepropustnost,
- mrazuvzdornost,
- odolnost proti posypovým solím,
- objemová hmotnost, nasákavost, vzlínavost,
- rozložení vzduchových pórů v betonu (u provzdušněného betonu),
- objemové změny [4].

1.4.1 Konzistence čerstvého betonu

Konzistence charakterizuje zpracovatelnost čerstvé betonové směsi. Podle konzistence se volí i způsob hutnění betonu [4]. Ke zjištění konzistence transportbetonu se běžně používají zejména zkoušky sednutím kužele nebo zkoušky rozlitím [3].

Čerstvý beton se doporučuje míchat a dodávat na staveniště ve „velmi měkké konzistenci“ se sednutím kužele $S_3 = 100 - 150$ mm. Tato konzistence má výhody: beton pro univerzální použití, homogenní staveništní beton, není nutná úprava na staveništi, dobré povrchy betonové konstrukce a vysoký výkon zpracování s malými náklady [3].

Konzistenci stanovujeme:

- Sednutím kužele S – výsledek v mm – ČSN EN 12350-2
- Rozlitím F – výsledek v mm – ČSN EN 12350-5
- Zkouškou VeBe V – výsledek v sekundách – ČSN EN 12350-3
- Indexem zhutnění C – výsledek poměrné číslo – ČSN EN 12350-4
- Zkoušky samozhutnitelných betonů
 - Zkouška sednutím – rozlitím dle ČSN EN 12350-8
 - Zkouška V-nálevkou dle ČSN EN 12350-9
 - Zkouška L-truhlíkem dle ČSN EN 12350-10
 - Zkouška Orimet a J-Ring test [4]

Zkouška sednutí kužele a rozlívání jsou vhodné pro měkké až tekuté směsi transportbetonu. Zkouška rozlívání pak pro betony vyloženě tekuté. Index zhutnění a zkouška VeBe jsou určeny pro betony velmi tuhé a tuhé konzistence používané v prefabrikaci [4].

Zpracovatelnost zlepšíme:

- zvýšením vodního součinitele,
- použitím plastifikátorů a superplastifikátorů potřebné koncentrace,
- použitím provzdušňovací přísady,
- částečně zvýšením množství cementu a příměsí,
- kamenivem s větší mezerovitostí a menším měrným povrchem (snížení podílu frakce 0/4 mm) [4].

1.4.2 Obsah vzduchu

V běžném betonu je obsah vzduchu cca 1 až 2 %, v betonu dobře provzdušněném 4 až 6,5 %. Obsah vzduchu v čerstvém betonu dle ČSN EN 12350-7 se stanovuje pomocí tlakového hrnce [4].

1.4.3 Pevnost

Pevnost je schopnost materiálu vzdorovat vzniklým napětím. Pevností betonu se označuje mezní hodnota napětí v betonu, při které dojde k porušení soudržnosti. Beton vzdoruje rozdílnou měrou všem druhům zatížení, která v betonové konstrukci vznikají. Protože je beton křehká látka, vzdoruje napětí v tahu a smyku podstatně méně než v tlaku [1].

Pevnosti betonu:

- pevnost v tlaku,
- pevnost v tahu,
- pevnost ve smyku a v kroucení [1].

Základní pevností betonu je jeho krychelná nebo válcová pevnost v tlaku ve stáří 28 dní zjištěná předepsaným experimentálním postupem na krychli 150 x 150 x 150 mm nebo válci 150 x 300 mm měřená v MPa [4].

Pevnost betonu závisí na hodnotě vodního součinitele betonové směsi, na druhu a kvalitě použitého cementu a kameniva a na pórovitosti betonu. Čím vyšší je vodní součinitel, tím nižší je pevnost betonu a zároveň lepší zpracovatelnost [3].

Množství cementového kamene má být takové, aby zaplnilo mezery mezi zrny kameniva a obalilo povrch zrn kameniva tenkou vrstvou. Granulometrie kameniva má vykazovat minimální mezerovitost [3].

Rozhodující je také vlhkost a teplota, ve kterém beton tvrdne a způsob ošetřování čerstvého betonu [3].

Na pevnost betonu má největší vliv pórovitost cementového kamene, která je tvořena:

- množstvím vody, která není potřebná pro hydrataci cementu, $w > 0,23$;
- vzduchovými póry, které vznikly nedokonalým zhutněním čerstvého betonu;
- provzdušněním betonu použitím provzdušňovacích přísad;
- trhlinkami o šířce větší než 10^{-4} m vznikající při tvrdnutí.

Pevnost betonu je jen zlomkem pevnosti použitého kameniva a dosažitelné pevnosti cementového kamene. Slabým místem je rozhraní kameniva a cementového kamene a pórovitá struktura cementového kamene. Pórovitost cementového kamene je závislá hlavně na hodnotě vodního součinitele. Čím je vyšší, tím má beton menší pevnost [1].

Výslednou pevnost betonu zvýšíme:

- snížením vodního součinitele,
- cementem vyšší pevnostní třídy,
- vyšším množstvím cementu, ale pouze do určité míry,
- kamenivem s menší mezerovitostí,
- snížením podílu vzduchových pórů v betonu [1].

Zkoušení pevnosti betonu

Postupy zkoušení pevnosti betonu jsou přesně popsány v mezinárodních nebo národních normách. Díky tomu jsou výsledky dobře vzájemně srovnatelné [1].

Zkoušet pevnost betonu v tlaku lze destruktivní i nedestruktivní zkouškami [1].

1.4.4 Objemové změny betonu

Objemové změny betonu dělíme:

- smršťování,
- nabývání,
- teplotní dilatace,
- dotvarování [4].

Smršťování je způsobeno samotným procesem hydratace a vysycháním. V suchém prostředí se beton smršťuje v rozmezí 0,3 - 0,6 ‰ a ve vodě nabývá 0,1 – 0,2 ‰ [4].

Dotvarování betonu je způsobeno s dlouhodobým působením vnějšího zatížení a mění se v čase [4].

Objemové změny betonu jsou závislé na skladbě směsi (vodní součinitel, typ kameniva, celkový obsah vody, přísady, příměsi), ošetřování betonu, charakteru prostředí, ve kterém se beton nalézá [4].

Dotvarování betonu lze ovlivnit druhem a obsahem cementu, vodním součinitelem, druhem kameniva, dobou zatížení, stupněm zatížení, druhem zatížení, velikostí zkušebního tělesa [1].

1.4.5 Permeabilita betonu

Permeabilita betonu se zabývá pronikáním vody pórovitou strukturou cementového kamene (vodonepropustnost, vzlínavost a nasákavost) a elektrickou vodivostí betonu. Všechny tyto vlastnosti jsou závislé na pórovitosti cementového kamene [1].

Na permeabilitu má vliv:

- křivka zrnitosti kameniva,
- obsah záměsové vody v betonové směsi,
- přísady a příměsi,
- zhutnění [4].

Vodonepropustnost betonu

Pro vodonepropustnost betonu jsou rozhodující otevřené kapiláry velikosti větší než 10^{-7} m, kterými prochází voda působením tlakového gradientu. Menší póry průchod vody neumožňují. Propustnost betonu je závislá na objemu a distribuci makropórů a kapilár v cementovém kameni. Množství makropórů v betonu závisí na vodním součiniteli. Stářím betonu vodonepropustnost vzrůstá [1].

Odolnost betonu proti tlakové vodě ovlivňuje:

- hutnost a podíl cementového kamene (nízký vodní součinitel, dokonale zhutnění čerstvého betonu)
- použitím hydrofobních přísad nebo příměsí polymerů
- impregnací betonu nebo jinou vhodnou povrchovou úpravou [3]

1.5 Transportbeton

Transportbeton je beton dodávaný v čerstvém stavu organizací nebo osobou, která není odběratelem betonu. Podle normy ČSN EN 206 je transportbeton také beton vyráběný odběratelem mimo staveniště a beton vyráběný na staveništi, ale ne odběratelem [3].

V období od roku 1963 se transportbeton začíná rozvíjet v Československu. Byl dán do trvalého provozu první československý automiřač AM3, byla odsouhlasena koncepce rozvoje transportbetonu a byly dány do provozu betonárny s vyšší kapacitou, které zásobovaly stavby v okolí [2].

V současné době technologie betonu směřuje ke zvýšení kvality a snižování zátěže životního prostředí. Kvalita betonu je zajišťována téměř výhradně výrobou transportbetonu. Ochrana životního prostředí je zajišťována bezodpadovou technologií betonu, která je zajišťována recyklací čerstvého betonu. Při recyklaci se využívají zbytky čerstvého betonu, které nahrazují přírodní zdroje jako voda nebo kamenivo. Recyklace omezuje skládky odpadů a šetří přírodní zdroje. Se zvyšováním kvality betonu lze očekávat snižování hmotnosti konstrukcí, tím i snižování potřeby betonu, tím i snižování dopravní zátěže a úspory neobnovitelných zdrojů přírodního kameniva a úspory energie při výrobě cementu [1].

1.5.1 Požadavky na transportbeton

Pro čerpání čerstvého betonu musí být upravena konzistence a soudržnost a musí být zajištěna dobrá čerpatelnost. Technologické požadavky na čerstvý beton souvisí s druhem cementu, zrnitostí kameniva, vodním součinitelem, obsahem jemných podílů a zpracovatelností. Doporučují se portlandské cementy CEM I vyšších pevnostních tříd, ale lze užít i CEM II [1].

Největší zrno kameniva je určeno průměrem potrubí, které je použito při čerpání. Doporučuje se těžené drobné kamenivo frakce 0 – 4 mm, tvarový index větší než 3 maximálně 30 % a je dovoleno 10 % nadsítného podílu kameniva [1].

Jemné frakce zrn do 0,25 mm zajišťují přenos čerpacího tlaku, tvoří vrstvu na stěnách potrubí a tím snižují vnitřní tření čerstvého betonu, omezují odlučování a zvyšují soudržnost čerstvého betonu. Obsah jemných podílů do 0,25 mm má být do 8 % a jejich množství spolu s cementem se limituje podle maximálního zrna kameniva. K doplnění jemných podílů se používají příměsi – popílek, mletý vápenec, struska nebo prosívky drceného kameniva, které jsou méně vhodné [1].

Doporučuje se velmi měkká konzistence s parametry sednutí kužele $S = 100 - 150$ mm, pro beton s těžným kamenivem a popílkem $S = 80 \pm 20$ mm a s drceným kamenivem 140 ± 20 mm. Nejvhodnější je konzistence s vodním součinitelem $w = 0,45 - 0,55$. Při $w = 0,3$ nastává vystřelování čerstvého betonu tím, že se v potrubí tlačuje vzduch. Také je potřeba velkého tlaku čerpadla, protože čerstvý beton je lepkavý. Pokud je $w = 0,5$ snižuje se soudržnost čerstvého betonu, dochází k oddělování, ztrácí se mazací účinek cementového tmele u vnitřních stěn potrubí a potrubí se může ucpat [1].

Zlepšení čerpatelnosti čerstvého betonu lze dosáhnout:

- zvýšením podílu částic do 0,25 mm,
- příměsemi s větším měrným povrchem,
- vyšší podíl drobného kameniva 0 – 4 mm,
- konzistencí s větším sednutím kužele, ale do $S \leq 200$ mm,
- náhradou drceného kameniva kamenivem těžným,
- účelnou dávkou vhodné plastifikační přísady,
- provzdušněním [1].

1.5.2 Výroba transportbetonu

Čerstvý beton lze vyrobit třemi způsoby mimo staveniště:

- v betonárně,
- v automíchači,
- kombinovaně.

V České Republice se nejčastěji transportbeton připravuje v betonárně. Při výrobě čerstvého betonu v betonárně dochází k nadávkování složek betonu do míchačky, kde dojde k zamíchání. Dobu míchání předepisuje technologický předpis pro daný druh betonu nebo výrobce míchačky. Při dopravě automíchačem takto vyrobeného čerstvého betonu je nutné dát pozor na rozmísení směsi [6].

Čerstvý beton lze vyrábět také v automíchači. Složky betonu jsou nadávkovány v betonárně a k zamíchání dojde až během cesty na místo uložení betonu [6].

1.5.3 Doprava transportbetonu

Doprava transportbetonu lze rozdělit na primární a sekundární.

Primární doprava využívá speciální dopravní prostředky – autodomíchače a automíchače. Jedná se o dopravu z betonárny na staveniště, kde je čerstvý beton uložen. Při této dopravě by vzdálenost mezi betonárnou a místem určení neměla přesáhnout 20 až 30 km nebo časový interval by neměl být delší než 90 minut [6].

Sekundární doprava zahrnuje dopravu přímo po staveništi. Může být horizontální a vertikální [6].

2 PRAKTICKÁ ČÁST

Základní receptury betonů byly převzaty od firmy CEMEX Czech Republic, s. r. o. pro zjištění ekonomické výhodnosti částečné náhrady Portlandského cementu EN 197-1-CEM - I 42,5 R za mletou granulovanou vysokopecní strusku (MGVS) nebo Portlandský směsný cement EN 197-1-CEM - II/B-M (S-V-LL) 32,5 R. Dále u těchto receptur došlo k posouzení chování čerstvého a ztvrdlého betonu při záměně plastifikátorů nebo superplastifikátorů.

Receptury byly navrženy dle požadavků ČSN EN 206. Všechny záměsi byly namíchány v betonárně CEMEX Czech Republic, s. r. o. v pobočce Betonárna Plzeň Prior.

2.1 Cíl práce

Cílem zkoušek betonu uvedených receptur v předchozí kapitole je posouzení ekonomické výhodnosti. Dále je nutné posoudit výhodnost těchto náhrad po stránce reologických, mechanických a fyzikálních vlastností. U všech náhrad se ověřovali a porovnávali vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu.

2.1.1 Částečná náhrada CEM I 42,5 R za CEM II 32,5 R

Cílem bylo porovnat vlastnosti betonů vyrobených z CEM I 42,5 R a CEM II 32,5 R a betonů vyrobených z CEM I 42,5 R, který byl částečně nahrazen CEM II 32,5 R o hmotnostech 80 kg/m^3 , 60 kg/m^3 a 40 kg/m^3 v kombinaci s popílkem do betonu o hmotnosti 100 kg/m^3 .

Dále bylo cílem porovnat vlastnosti betonů se zvoleným superplastifikátorem Readyplast 342, kde došlo ke změně množství vody, superplastifikátoru a pojiva v receptuře.

2.1.2 Částečná náhrada CEM I 42,5 R za MGVS

Při částečné náhradě CEM I 42,5 R za mletou granulovanou vysokopecní strusku o hmotnosti 80 kg/m^3 , 60 kg/m^3 a 40 kg/m^3 v kombinaci s popílkem do betonu o hmotnosti 100 kg/m^3 bylo cílem porovnat vlastnosti betonu s betonem vyrobeným pouze z CEM I 42,5 R a CEM II 32,5 R.

Ve vybrané receptuře se superplastifikátorem Readyplast 342 bylo cílem porovnat vlastnosti betonů, kde došlo k úpravě množství vody, superplastifikátoru a pojiva v receptuře.

2.1.3 Náhrada MGVS za CEM II 32,5 R

Cílem náhrady MGVS za CEM II 32,5 R je porovnat vlastnosti čerstvého betonu a zjistit výhodnost této náhrady. MGVS a CEM II 32,5 je v recepturách obsažena v množství 80 kg/m^3 , 60 kg/m^3 a 40 kg/m^3 v kombinaci s popílkem do betonu o hmotnosti 100 kg/m^3 .

2.1.4 Záměna plastifikátorů/superplastifikátorů

Hlavním cílem záměny plastifikátorů a superplastifikátorů bylo porovnání vlastností jednotlivých receptur. Plastifikátor/superplastifikátor byl vždy použit na všechny receptury, které obsahují jako pojivo pouze CEM I 42,5 R nebo CEM II 32,5 R a CEM I 42,5 R v kombinaci s CEM II 32,5 R a CEM I 42,5 R v kombinaci s mletou granulovanou vysokopecní struskou.

2.2 Vstupní materiály

2.2.1 Kamenivo

Jako nosná kostra betonu je navržena kombinace dvou frakcí kameniva – přírodní praný písek a přírodní drcený štěrk. Praný písek frakce 0/4 pochází z Příšova u Plzně a štěrk frakce 8/16 z Mítova u Plzně. V příloze číslo 1 je prohlášení o vlastnostech použitého kameniva.

2.2.2 Voda

K výrobě betonu je použita podzemní voda, u které je třeba provést zkoušku před prvním použitím, poté 1x ročně.

Příloha číslo 2 obsahuje protokol o zkouškách k podzemní vodě používané jako záměsová voda do betonu.

2.2.3 Cement

K výrobě betonu byly použity Portlandský cement EN 197-1-CEM – I 42,5 R a Portlandský směsný cement EN 197-1-CEM - II/B-M (S-V-LL) 32,5 R. Použité cementy pocházejí od společnosti CEMEX Cement, k. s. – cementárna Prachovice.

Z hlediska pevnosti vyhovují používané cementy požadavkům uvedených v ČSN EN 197-1 ED. 2. Přílohy číslo 3 a 4 obsahují prohlášení o vlastnostech použitých cementů.

2.2.4 Příměsi

Většina receptur obsahuje jako příměs popílek do betonu a mletou granulovanou vysokopecní strusku. Popílek do betonu pochází od Plzeňské energetiky a. s. a mletá vysokopecní granulovaná struska je z výroby v Dětmarovicích.

Vlastnosti použitého popílku do betonu a mleté granulované vysokopecní strusky spolu s certifikátem shody a prohlášením o vlastnostech jsou uvedeny v přílohách číslo 5 a 6.

2.2.5 Přísady

Jako přísady byly použity k výrobě betonů přísady od firmy CEMEX Czech Republic, s. r. o.:

- plastifikační přísada Isola BV,
- superplastifikační přísada CX Isoplast 531,
- superplastifikační přísada CX Isoflex 833,
- superplastifikační přísada CX Isoflow 793,

od společnosti Baustofftechnik GmbH:

- superplastifikační přísada Readyplast VP 342

a od společnosti BASF Stavební hmoty Česká republika s. r. o.:

- superplastifikační přísada MasterGlenium ACE 446.

Plastifikační přísada Isola BV

Isola BV je kapalná přísada do betonu, která cíleně reguluje tuhnutí čerstvého betonu na lignosulfonové bázi. Působí na rozptýlení jemných součástí čerstvého betonu a na jeho hutnost. Příklad je v souladu s normou ČSN EN 934-2:2009+A1:2012. V navržených recepturách bylo dávkování 3 kg/m^3 . Doporučené dávkování podle výrobce je 0,4 – 1,0 % z hmotnosti cementu.

Superplastifikační přísada CX Isoplast 531

CX Isoplast 531 je kapalná superplastifikační přísada do betonu, která cíleně reguluje tuhnutí čerstvého betonu na lignosulfonové a multikarboxylové bázi. Příklad je v souladu s normou ČSN EN 934-2:2009+A1:2012. V navržených recepturách bylo dávkování 3 kg/m^3 .

Superplastifikační přísada CX Isoflex 833

CX Isoflex 833 je kapalná superplastifikační přísada do betonu, která cíleně reguluje tuhnutí čerstvého betonu na lignosulfonové a multikarboxylové bázi. Působí na rozptýlení jemných součástí čerstvého betonu a na jeho hutnost. Příklad je v souladu s normou ČSN EN 934-2:2009+A1:2012. V navržených recepturách bylo dávkování 3 kg/m^3 . Doporučené dávkování dle výrobce je 0,4 – 1,5 % z hmotnosti cementu.

Superplastifikační přísada CX Isoflow 793

CX Isoflow 793 je hnědá kapalná superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátetheru. Používá se pro výrobu betonových směsí pro transportbeton. Doporučené dávkování je 0,2 – 1,2 % hmotnosti cementu. V navržených recepturách bylo dávkování $2,3 \text{ kg/m}^3$.

Superplastifikační přísada Readyplast 342

Readyplast 342 je kapalná superplastifikační přísada do betonu. Příklad je v souladu s normou ČSN EN 934-2:2009+A1:2012. V navržených recepturách bylo dávkování $2,3 \text{ kg/m}^3$.

Superplastifikační přísada MasterGlenium ACE 446

MasterGlenium ACE 446 je tekutá přísada na bázi polykarboxylátetheru a je optimalizována pro výrobu prefabrikovaného betonu. Příklad je v souladu s normou ČSN EN 934-2+A1:2012. V navržených recepturách bylo dávkováno 2,3 kg/m³.

2.3 Zkoušky betonu

Podle připravených receptur byly naváženy potřebné složky betonu

- Portlandský směsný cement EN 197-1-CEM - II/B-M (S-V-LL) 32,5 R,
- Portlandský cement EN 197-1-CEM - I 42,5 R,
- voda,
- přírodní drcené kamenivo frakce 8/16,
- přírodní prané kamenivo frakce 0/4,
- popílek do betonu,
- mletá granulovaná vysokopeční struska,
- plastifikátor/superplastifikátor.

Obrázek 1 - Vstupní materiály



Po navážení je vše podle normového postupu namícháno. Nejprve se navlhčí míchačka, aby nedocházelo ke ztrátě části záměsové vody adsorpcí stěn míchačky. V laboratoři CEMEX je k dispozici talířová míchačka s nuceným oběhem.

Obrázek 2 - Talířová míchačka



Do navlhčené míchačky se nasype kamenivo, písek a štěrky. Kamenivo se promíchá, přileje se k němu část vody a opět promíchá. Poté se nechá pár minut odstát, aby došlo k provlhčení kameniva. Kamenivo musí být dostatečně navlhčené, jelikož některé příměsi mají tendenci přilnout k povrchu ještě nedostatečně navlhčeného kameniva. To má za následek nerovnoměrné rozptýlení příměsí v čerstvém betonu.

Po dostatečném odstátí se přisypou příměsi, přilije část vody a dojde k promísení s navlhčeným kamenivem. Jako poslední se přidává plastifikátor se zbylým množstvím vody.

Po řádném promísení se provádí zkouška sednutí kužele a změří se obsah vzduchu v čerstvém betonu. Dále se zaznamenávají teploty prostředí a čerstvého betonu.

Poté se nechá čerstvý beton 45 minut odstát a po uplynutí této doby se opět provede zkouška sednutí kužele. Všechny naměřené údaje se zaznamenávají do protokolu.

Po provedení druhé zkoušky sednutí kužele se připraví zkušební vzorky. Předem vymazané formy ve tvaru krychle o hraně 150 mm jsou plněny na dvakrát čerstvou betonovou směsí a hutněny na vibračním stole. Vrchní strana se zarovnáva lžící. Do protokolu se zaznamenává hmotnost čerstvého betonu. Pro naše zkoušky bylo zhotoveno pět zkušebních krychlí. Každý vzorek má svůj štítek s označením, datem výroby a účelem použití. Dva vzorky jsou určeny pro zjištění pevnosti po 7 dnech, další dva po 28 dnech a poslední vzorek slouží pro zjištění hloubky průsaku tlakovou vodou. Pět vzorků se vyrábělo celé první tři série. Při dodatkových záměsích se zhotovovali jen čtyři vzorky pro zkoušky pevností.

Obrázek 3 - Vibrační stůl



2.3.1 Měření teploty čerstvého betonu

Po zamíchání záměsi došlo ke změření teploty čerstvého betonu a teploty prostředí. Teplota byla měřena kalibrovaným teploměrem.

2.3.2 Zkouška sednutí kužele

Zkouška sednutí kužele se provádí podle normy ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím.

Forma se z vnitřní strany navlhčí a položí se na navlhčenou vodorovnou podkladní desku. Na formu se umístí násypka a forma se zajistí proti nežádoucímu posunu přišlápnutím bočních úchytek. Naplní se po třetinách formy čerstvým betonem a vždy po každém naplnění se zhutní 25 vpichy propichovací tyčí tak, aby vždy došlo k částečnému zasažení vrstvy předchozí. Při plnění poslední vrstvy musí dojít k mírnému přeplnění formy. Po posledním zhutnění se odstraní násypka a přebytečný čerstvý beton, okraj kužele se zarovná a z podkladní desky se odstraní spadlý čerstvý beton.

Forma se zvedá plynulým pohybem kolmo vzhůru během 2 – 5 s, tak aby nebyla nijak ovlivněna zkouška. Forma se postaví vedle sednutého betonu na podkladní desku, položí se na ní propichovací tyč a změří se rozdíl mezi nejvyšším bodem sednutého vzorku a propichovací tyčí. Výsledek se zaokrouhlí s přesností na 10 mm.

Obrázek 4 - Zkušební kužel



2.3.3 Měření obsahu vzduchu čerstvého betonu

Měření obsahu vzduchu se provádí podle normy ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – tlakové metody.

Hrnc se naplní do poloviny čerstvým betonem, provede se zhutnění, poté se nádoba doplní a opět se zhutní. Vrchní strana se zarovná, očistí se okraje hrnce, aby nedocházelo k netěsnostem při uzavření víka, a hrnc se uzavře.

Horním ventilem se natlakuje tlaková komora a ručičky tlakoměru se nastaví na počáteční hodnotu. Pomocí bočních ventilů, umístěných proti sobě, se vhání voda do hrnce, aby došlo k vytlačení zbylého vzduchu. Při odstranění přebytečného vzduchu z hrnce se ventily uzavřou a stiskne se tlačítko pro uvolnění tlaku v tlakové komoře. Na displeji se ukáže množství vzduchu v čerstvém betonu v procentech. Hodnota se zaokrouhluje na 0,5 %.

Obrázek 5 - Hrnec pro měření obsahu vzduchu v ČB



2.3.4 Hloubka průsaku betonu tlakovou vodou

Zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou byla zkoušena na krychlích v betonárně CEMEX Pardubice – Semtín.

Hloubka průsaku betonu tlakovou vodou se provádí podle normy ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou.

Zkušební těleso je krychle o hraně 150 mm. Na zdrsňenou plochu se nechá působit vodní tlak 50 ± 50 kPa po dobu 72 ± 2 hodiny. Poté se těleso rozlomí na dvě poloviny rovnoběžně s působením tlaku a změří se hloubka průsaku v mm.

2.3.5 Tlaková zkouška

Po 7 a 28 dnech byly prováděny tlakové zkoušky podle normy ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

Vzorek je krychle o hraně 150 mm, která je přeměřena, zvážena a vložena do lisu na střed tlačných ploch v takovém směru, aby tlak byl kolmý na směr hutnění. Vzorek má být zatěžován rovnoměrně. Po zatížení se z displeje odečte maximální hodnota zatížení v kN. Pevnost se spočítá jako poměr z tohoto zatížení a plochy tlačené části.

Obrázek 6 - Zkušební vzorek v lisu



Pro beton C 20/25 musí být dodrženy minimální hodnoty pevnosti v tlaku uvedené v tabulce číslo 3.

Tabulka 3 - Pevnostní třídy v tlaku obyčejného a těžkého betonu podle ČSN EN 206 [7]

Pevnostní třída betonu v tlaku	Minimální charakteristická válcová pevnost $F_{ck,cyl}$ [MPa]	Minimální charakteristická krychelná pevnost $F_{ck,cube}$ [MPa]
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37

2.3.6 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost se měří podle normy ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost.

Forma o hraně 150 mm, používaná na tvorbu zkušebních krychlí, se zváží a zaznamená se její hmotnost m_1 . Naplní se čerstvým betonem. Plnění formy probíhá nadvakrát a po každém naplnění se vrstva zhutní. Po naplnění a zhutnění se forma zarovná, uhladí lžící a opět se zváží a zaznamená se její hmotnost m_2 . Vážení probíhá na kalibrovaných digitálních váhách.

Objemová hmotnost se dopočte ze vzorce:

$$D = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad (2)$$

kde: D objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m^3],
 m_2 hmotnost naplněné formy [kg],
 m_1 hmotnost prázdné formy [kg],
 V objem formy [m^3].

2.4 Navržené receptury

Pro všechny receptury jsou stejná vstupní data:

- pevnostní třída C 20/25
- stupeň vlivu prostředí X0 = beton bez nebezpečí koroze nebo narušení
- stupeň konzistence S3

Ze všech záměsí byla vyrobena zkušební tělesa pro ověření požadovaných vlastností. Receptury jsou rozděleny do sérií podle plastifikátoru/superplastifikátoru nebo podle obsahu CEM II 32,5 R/MGVS.