

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta stavební**



Bakalářská práce

**Možnosti využití technologie Two-Stage Concrete  
pro vodní stavby**

**Jan Vicher**

**Stavební inženýrství**

**Vodní hospodářství a vodní stavby**

© 2023 ČVUT v Praze

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Experimentální centrum

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Možnosti využití technologie Two-Stage Concrete  
pro vodní stavby**

Potential applications of Two-Stage Concrete  
technology for hydraulic structures

Autor: Jan Vicher

Vedoucí práce: doc. Ing. Bc. Radoslav Sovják, Ph.D., LL. M.

Konzultanti: Ing. Martin Králík, Ph.D., Ing. Kristýna Carrera,  
Ing. Přemysl Kheml

Akademický rok: 2022/23

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Vicher</u>	Jméno: <u>Jan</u>	Osobní číslo: <u>494048</u>
Zadávatel katedra: <u>K210</u>		
Studijní program: <u>(B3651) Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor/specializace: <u>Vodní hospodářství a vodní stavby</u>		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Možnosti využití technologie Two-Stage Concrete pro vodní stavby</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Potential applications of Two-Stage Concrete technology for hydraulic structures</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracování rešerše, návrh a testování vhodné směsi pro Two stage concrete, výroba zkušebních vzorků, testování vzorků s ohledem na využití tohoto materiálu ve vodních stavbách, zpracování výsledků a jejich vyhodnocení.	
Seznam doporučené literatury: Self - compacting grout to produce two-stage concrete, Hakim S Abdelgader Betonové konstrukce pro vodní stavby, Cigánek Mojmir	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>doc. Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>22.2.2023</u>	Termín odevzdání BP v IS KOS: <u>22.5.2023</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
<u>Podpis vedoucího práce</u>	<u>Podpis vedoucího katedry</u>

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

<u>22.2.2023</u>	<u>Podpis studenta(ky)</u>
Datum převzetí zadání	

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

V Praze dne 22.05.2023

---

Jan Vicher

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bc. Radoslavu Sovjákovi, Ph.D., LL. M. za jeho odborné vedení a cenné rady. Dále bych rád poděkoval konzultantům Ing. Kristýně Carrera, Ing. Martinu Králíkovi, Ph.D. a Ing. Přemyslu Khemlovi. Poděkování patří také kolegům a pracovníkům Experimentálního centra a Vodohospodářského experimentálního centra za pomoc při mé práci.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá technologií Two-stage concrete (dvoufázový beton) se zaměřením na jeho využití při výstavbě betonových konstrukcí na vodních stavbách. Popisuje současné užití betonu na vodních stavbách a jeho výhody a nevýhody. V rámci samotného výzkumu jsou v práci popsány užití materiály, jednotlivé postupy, směřování výzkumu, a především použité maltové směsi. Dále jsou zde popsány a vyhodnoceny výsledky samotného výzkumu. Výsledky jsou experimentálně ověřovány na standardizovaných tělesech s jednou výjimkou, a to vzorkem ve tvaru desky, pro nějž byla vytvořena zcela inovativní zkouška. Na závěr tato práce shrnuje možnosti využití technologie dvoufázového betonu na vodních stavbách s ohledem na závěry z vlastního výzkumu.

**Klíčová slova:** tradiční beton, dvoufázový beton, vodní stavby, betonáž, kamenivo, maltová směs

## **Abstract**

The thesis deals with the Two-stage concrete technology with a focus on its application in the construction of concrete structures in hydraulic structures. It describes the current use of concrete in hydraulic structures and its advantages and disadvantages. Within the research itself, the thesis describes the materials used, the different procedures, the direction of the research, and especially the mortar mixes. Furthermore, the results of the research itself are described and evaluated. The results are experimentally verified on standardised solids with one exception: a slab-shaped specimen for which a completely innovative test was developed. Finally, this paper summarises the possibilities of using two-stage concrete technology in hydraulic structures in light of the findings of the own research.

**Keywords:** traditional concrete, two stage concrete, hydraulic structures, concreting, aggregates, mortar mix

# Obsah

<b>1</b>	<b>Motivace .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Cíl práce.....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Literární rešerše .....</b>	<b>7</b>
<b>4.1</b>	<b>Vývoj materiálů na vodních stavbách .....</b>	<b>7</b>
<b>4.2</b>	<b>Využití betonu ve vodních stavbách.....</b>	<b>8</b>
4.2.1	Problematika výstavby vodních staveb a užívání betonu.....	10
4.2.2	Způsoby provádění omezení hydratačního tepla.....	12
4.2.3	Požadavky na beton na vodních stavbách .....	13
<b>4.3</b>	<b>Two stage concrete.....</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Dvoufázový beton .....</b>	<b>16</b>
<b>5.1</b>	<b>Maltová směs.....</b>	<b>18</b>
5.1.1	Portlandský cement .....	19
5.1.2	Vysokopeční cement .....	19
5.1.3	Sorfix.....	20
5.1.4	Přísady .....	20
5.1.4.1	MasterGlenium SKY 504 .....	21
5.1.4.2	Stabilan 300 F.....	21
<b>5.2</b>	<b>Kamenivo.....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Vlastní laboratorní výzkum – vývoj materiálu.....</b>	<b>23</b>
6.1.1	Technologický postup .....	23
6.1.2	Volba kameniva.....	26
6.1.3	Výzkum maltových směsí .....	28
6.1.3.1	Směs 1 – CEM I .....	28
6.1.3.2	Směs 2 – CEM III.....	29
6.1.3.3	Směs 3 – CEM III + superplastifikátor.....	30
6.1.3.4	Směs 4 – CEM III + přísady.....	31
6.1.3.5	Směs 5 – Sorfix .....	32
6.1.3.6	Směs 6 – Sorfix/CEM I .....	35
6.1.4	Reálný vzorek – směs 4 (CEM III + přísady) .....	38
<b>7</b>	<b>Vlastní laboratorní výzkum – zkoušky ztvrdlého betonu.....</b>	<b>41</b>
7.1.1	Objemová hmotnost .....	41
7.1.2	Pevnost v tlaku .....	42
7.1.3	Odolnost proti působení vody .....	42

7.1.4	Průsak tlakovou vodou .....	43
7.1.5	Řez vzorkem.....	44
7.1.6	Zkouška vodonepropustnosti – směs 4 reálný vzorek.....	44
<b>8</b>	<b>Vyhodnocení a shrnutí vlastního výzkumu .....</b>	<b>50</b>
8.1.1	Vyhodnocení čerstvých směsí .....	50
8.1.2	Vyhodnocení zkoušek ztvrdlého betonu .....	51
<b>9</b>	<b>Využití na vodních stavbách.....</b>	<b>54</b>
<b>9.1</b>	<b>Porovnání se současně užívaným betonem.....</b>	<b>54</b>
<b>9.2</b>	<b>Nahrazení betonu.....</b>	<b>54</b>
9.2.1	Technologický postup dvoufázového betonu.....	56
9.2.1.1	Jezy.....	58
9.2.1.2	Přehrady.....	58
9.2.1.3	Ostatní vodní stavby .....	59
9.2.2	Železobeton .....	59
<b>10</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>61</b>
<b>11</b>	<b>Literatura .....</b>	<b>62</b>



## Seznam obrázků<sup>1</sup>

Obrázek 1 - VD Vrchlice – hráz.....	8
Obrázek 2 - bezpečnostní přeliv Vyrovňovací nádrž Práčov .....	9
Obrázek 3 - zkušební tělesa o hraně 150 a 200 mm.....	23
Obrázek 4 - reálný vzorek .....	23
Obrázek 5 - technologický postup (připravené vzorky k betonáži) .....	24
Obrázek 6 - technologický postup (formy s plnicím potrubím).....	24
Obrázek 7 - technologický postup (vlevo vzorek bez perforace, vpravo s perforací).....	25
Obrázek 8 - vzorek s kamenivem 16/32.....	27
Obrázek 9 - střešací stolek s maltou.....	28
Obrázek 10 - směs CEM I (vyhotovený vzorek).....	29
Obrázek 11 - směs CEM III (vyhotovený vzorek).....	30
Obrázek 12 - směs CEM III + superplastifikátor (vyhotovený vzorek).....	31
Obrázek 13 - směs CEM III + přísady (1. vyhotovený vzorek).....	32
Obrázek 14 - směs CEM III + přísady (finální vyhotovený vzorek) .....	32
Obrázek 15 - směs Sorfíx „A“ (vyhotovený vzorek po vodní lázni) .....	33
Obrázek 16 - směs Sorfíx „A“ (vyhotovený vzorek) .....	33
Obrázek 17 - směs Sorfíx „B“ (vyhotovený vzorek) .....	34
Obrázek 18 - směs Sorfíx/CEM I „A“ (vyhotovené vzorky dle průběhu betonáže zleva) .....	35
Obrázek 19 - směs Sorfíx/CEM I "B" (poslední a první vyhotovený vzorek dle betonáže)....	36
Obrázek 20 - směs Sorfíx/CEM I "C" (vyhotovené vzorky).....	37
Obrázek 21 - reálný vzorek (postupné ukládání kameniva).....	38
Obrázek 22 - reálný vzorek (připravený vzorek k betonáži).....	39
Obrázek 23 - reálný vzorek (deska na ocelovém podstavci s viditelnými kavernami).....	40
Obrázek 24 - zkušební těleso s čarou průsaku .....	43
Obrázek 25 - řez vzorkem .....	44
Obrázek 26 - reálný vzorek (pohled na připravenou zkušební nádrž) .....	44
Obrázek 27 - reálný vzorek (pohled do zkušební nádrže na připravený vzorek).....	46
Obrázek 28 - reálný vzorek (zkušební zalití vzorku po utěsnění části desky) .....	47
Obrázek 29 - reálný vzorek (pohled na napuštěnou nádrž, úroveň vody 80 cm).....	48
Obrázek 30 - reálný vzorek (pohled do nádrže pro úroveň vody 180 cm).....	49

---

<sup>1</sup> Všechny obrázky byly vyhotoveny autorem této práce

Obrázek 31 - reálný vzorek (nádrž pro úroveň vody 180 cm) .....	49
Obrázek 32 - zleva: první vzorek, vzorek CEM III + přísady, vzorek Sorfix/CEM I "C" .....	51

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - směs 1 (CEM I).....	29
Tabulka 2 - směs 2 (CEM III) .....	30
Tabulka 3 - směs 3 (CEM III + superplastifikátor) .....	30
Tabulka 4 - směs 4 (CEM III + přísady) .....	32
Tabulka 5 - směs 5A (Sorfix).....	33
Tabulka 6 - směs 5B (Sorfix) .....	34
Tabulka 7 - směs 6A (Sorfix/CEM I).....	35
Tabulka 8 - směs 6B (Sorfix/CEM I) .....	36
Tabulka 9 - směs 6C (Sorfix/CEM I) .....	37
Tabulka 10 - výpočet odpadu na jednotku plochy .....	43

## Seznam grafů

Graf 1 - průměrná objemová hmotnost .....	41
Graf 2 - průměrná krychelná pevnost.....	42
Graf 3 - rozlivy maltových směsí [mm] .....	50

## Seznam použitých zkratk

Pa – pascal, odvozená fyzikální jednotka tlaku ( $\text{kg} \times \text{m}^{-1} \times \text{s}^{-2}$  v základních jednotkách)

kPa – kilopascal, odvozená fyzikální jednotka tlaku ( $1 \text{ kPa} = 1 \times 10^3 \text{ Pa}$ )

MPa – megapascal, odvozená fyzikální jednotka tlaku ( $1 \text{ MPa} = 1 \times 10^6 \text{ Pa}$ )

ml – mililitr – metrická jednotka objemu ( $1 \text{ ml} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ )

m – metr, základní fyzikální jednotka vzdálenosti

cm – centimetr, odvozená fyzikální jednotka vzdálenosti ( $1 \text{ cm} = 1 \times 10^{-2} \text{ m}$ )

mm – milimetr, odvozená fyzikální jednotka vzdálenosti ( $1 \text{ mm} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$ )

N – newton, odvozená fyzikální jednotka síly ( $\text{kg} \times \text{m} \times \text{s}^{-2}$  v základních jednotkách)

kN – kilonewton, odvozená fyzikální jednotka síly ( $1 \text{ kN} = 1 \times 10^3 \text{ N}$ )

EC – katedra K210 Experimentální centrum (FSv ČVUT v Praze)

VEC – katedra K250 Vodohospodářské experimentální centrum (FSv ČVUT v Praze)

ČSN – označení českých státních norem

VD – vodní dílo

$\text{kg/m}^3$  – kilogram na metr krychlový, odvozená fyzikální jednotka objemové hmotnosti

$\text{m}^3$  – metr krychlový, odvozená fyzikální jednotka objemu

NaCl – chemické značení chloridu sodného

$\text{g/m}^2$  – hmotnost odpadu na jednotku plochy  $\rho_a$

# 1 Motivace

V případě mé bakalářské práce je motivace následující: přijít s novým vhodným technologickým postupem pro výstavbu, rekonstrukce a sanace vodních staveb využívajícím lokální a ekologické materiály s cílem snížit celkové náklady na samotnou výstavbu a vliv na životní prostředí a tím zvýšit jejich lukrativnost, a především tím rozšířit počty těchto staveb v naší zemi, ale i po celém světě.

I přesto, že vodní stavitelství je považováno za vrcholné inženýrské umění, tak vývoj stavebních materiálů oproti jiným stavebním odvětvím v posledních letech zaostává. Nový materiál a nová technologie výstavby by tak zajisté přinesla čerstvý vítr do tohoto krásného a pestrého odvětví stavebního inženýrství.

## 2 Úvod

V současné době se zcela správně klade čím dál tím více důraz na ekologické myšlení a ochranu životního prostředí, přičemž se tyto tendence a idey přenáší i do stavitelství. Nemyslím tím například nevhodné omezování nové výstavby, obzvláště v budoucnu velice potřebných vodohospodářských objektů, například přehrad, či plavebních kanálů, ale vývoj nových materiálů a technologických postupů. Například recyklace betonu si úspěšně našla své místo v pozemních stavbách a dnes je již hojně využívána jak při rekonstrukcích, tak u novostaveb (například materiál ECOCRETE [1]). Bohužel ne všechny materiály lze plně nahradit, a toto tvrzení platí několikanásobně na vodních stavbách. Beton zde hraje důležitou roli a díky jeho vlastnostem jsme schopni vytvářet různorodé, tvarově zajímavé a úžasné konstrukce, leckdy i obřích rozměrů. Použití betonu je od staveb na drobných vodních tocích, přehrázek, rybníků, přes stavby větší jako například jezy, plavební komory, plavební kanály, vodní a přečerpávací elektrárny, až po ty největší vodní díla, přehrady. U všech těchto objektů se beton využívá na různé stavební konstrukce. Bez betonu by nebylo možné tyto stavby postavit a využívat. Jedná se tedy o prvek důležitý a velice těžko nahraditelný.

Česká republika má velice bohatou historii vodních staveb, od těch nejstarších, například jezy pražského typu (Staroměstský jez) až po ty relativně nejmodernější, například Vltavskou kaskádu. V posledních třiceti letech však dochází k útlumu výstavby větších vodních děl (poslední vybudovaná betonová tížná přehrada byla přehrada Hněvkovice, a to v roce 1992), obzvláště těch betonových, a to z mnoha důvodů. Jedním z nich je i rostoucí cena betonových konstrukcí, ovlivněná nejen finančním ohodnocením samotného materiálu, ale i zvyšováním nákladů na jeho výrobu, dopravu, uložení... Obzvláště u velkých vodních děl (například betonových tížných přehrad) je potřeba obrovské množství betonu (v porovnání například s pozemními stavbami – myšleno v porovnání s jednotlivými stavbami, nikoliv s celým oborem). Na příklad při výstavbě tělesa hráze VD Orlík bylo použito 923 tis. m<sup>3</sup> betonu [2]. Ať už tedy takto velkou stavbu financuje kdokoliv, stát nebo soukromý investor, je pro něj nerentabilní pro konstrukci využít právě beton a spíše se bude uchýlovat k lokálním a levnějším surovinám. V případě přehrad třeba k budování sypaných tížných hrází, které využívají jako hlavní surovinu zeminu. Tím snižují například náklady spojené s dopravou materiálů, dobu výstavby (z velké části suchý proces) a tím vším také vliv na životní prostředí.

Využívání jiných materiálů však s sebou nese i problémy či omezení budovaných konstrukcí, a to i například z hlediska užívání těchto staveb po jejich vybudování. Pokud bych měl uvést některé příklady, jedná se například o odolnost vůči tekoucí vodě přes korunu hráze.

V případě zvýšených povodňových průtoků, kdy již kapacita bezpečnostního přelivu dosáhla svého maxima, a dochází k přelévání vody z nádrže přes korunu hráze, a u tělesa sypané hráze na rozdíl od hráze betonové může dojít ke kolapsu této konstrukce. Dále například potřeba umístění bezpečnostního přelivu, který by v případě sypaných hrází měl být umístěn mimo těleso hráze (z důvodu sedání) a s tím spojený větší zábor prostoru vodního díla a složitější zemní práce.

V souhrnu toho všeho by změna technologie betonu, třeba jeho složení či způsobu provádění, která by vedla ke snížení celkových nákladů s ním spojených a například i vlivu na životní prostředí, mohla obnovit jeho atraktivitu u nových záměrů a rozšířit tak portfolio vodních děl v naší zemi i na celém světě. Mohlo by se jednat například o větší užívání lokálních materiálů pro jednotlivé složky či snížení vzdálenosti dovozu materiálu, jenž vyžaduje dovoz na stavenišť.

Takto upravený beton by však nemusel najít využití jen na velkých dílech. Stále se relativně ve velké míře užívá i na ostatních vodních stavbách (viz výše v textu). Například jako základ jezových konstrukcí, základ či výplň přehrázek nebo u malých říčních stupňů. I v těchto případech by levnější a ekologičtější varianta betonu našla zajisté své místo.

Jak již bylo zmíněno výše, v naší zemi, ale i po celém světě, se již velmi velké množství vodních staveb nachází a čas od času je zapotřebí jejich sanace, rekonstrukce či modernizace. I v těchto případech se využívá beton a opět v relativně velkých objemech a v mohutných konstrukcích. Jako příklad lze uvést rekonstrukci Staroměstského jezu na řece Vltavě v centru Prahy. Cílem této rekonstrukce bylo vrátit jezu původní podobu přelivné plochy z doby jeho výstavby ve 13. století. Součástí rekonstrukce bylo také vybudování nové železobetonové desky o tloušťce 350 mm, která tvoří základ celé přelivné plochy, a na kterou je uložen nový dřevěný rošt a žulový obklad. Ze statického hlediska je tato nově vyhotovená konstrukce namáhána prakticky minimálně (dřevěný rošt je kotven na původní dřevěné piloty), přičemž největší zatížení zde vzniká od obkladu přelivné plochy a od vztlaku vody. Převládající zatížení je v tomto případě tlak, a to v téměř rovnoměrně v celé ploše. I přesto byl v tomto případě použit beton o pevnosti C30/37, který se pro porovnání užívá například pro stropy či balkóny, tedy konstrukce mnohonásobně více namáhané, a to nejen tlakem, ale i tahem. Užití tohoto typu betonu zde tedy není vzhledem k jeho nízkému využití z hlediska pevnosti příliš hospodárné a ekologicky výhodné a nejedná se o rozhodně jediný příklad. Nehospodárné využití betonů s vyššími pevnostmi je zcela běžné, a to v případech různých vodních staveb. Právě v jejich

případech by využívání materiálů s nižší pevností a s možností využití lokálních zdrojů snížilo nejen celkové náklady stavby, ale zlepšilo i enviromentální aspekty.

### 3 Cíl práce

Přehrady, jezy, plavební komory, vodní elektrárny, plavební kanály, říční stupně, přehrážky a řada dalších... všechny tyto stavební objekty užívané na vodních tocích jsou nenahraditelné ve vztahu člověka a vody a jejich přínos lidstvu je nezanedbatelný. Všechny tyto stavby zároveň spojuje jeden materiál, a tím je beton. Beton je pravděpodobně nejrozšířenější a nejpoužívanější stavební materiál na celém světě. Nejenom však konstrukce vodních staveb, ale i všechny ostatní (pozemní stavby, komunikace...) stavební odvětví tento materiál používají, a to ve formě prostého betonu či železobetonu. Je tedy zřejmé, že zvyšující se nároky na počty nových staveb a na rekonstrukce těch stávajících rostou a poptávka po betonu se zvyšuje. Zájem o něj mnohdy převyšuje aktuální nabídku a leckdy i možnosti jeho výroby či přepravy.

S rostoucí spotřebou tohoto materiálu se však zvyšuje i zátěž na životní prostředí, protože jeho výroba, přeprava a užití složky nejsou příliš ekologické. Toto tvrzení obzvláště platí na vodních stavbách, na nichž je kvůli mohutnosti a rozsahu jednotlivých konstrukcí spotřeba betonu ve spoustě případů enormní. Zároveň se jedná leckdy o stavby špatně přístupné a dovoz materiálu na stavbu musí být prováděn i z větších vzdáleností a horším terénem. Obzvláště dovoz právě zmíněného betonu je náročný nejen kvůli jeho vysoké hmotnosti, ale i z technologického hlediska s ohledem na jeho dobu zpracovatelnosti. Pro pouhé vybudování základů pevného jezu je potřeba dopravit několik tisíců kubických metrů betonu na staveniště.

Úplné nahrazení betonu na těchto stavbách nepřipadá v žádném případě v úvahu a z tohoto důvodu je jedinou možností, jak zlepšit jeho dopady na životní prostředí, snížit náklady na jeho výrobu a přepravu, popřípadě i zrychlit proces výstavby, změnit jeho složení a postup provádění výstavby. Na vodních stavbách se s těmito pokusy můžeme setkat například u technologie válcovaných betonů užívaných na přehradách, díky kterým byla urychlena výstavba těchto mohutných konstrukcí.

Cílem mé práce je vyzkoušet novou technologii provádění betonových konstrukcí s možným využitím na vodních stavbách vycházející ze studie Two stage concrete od Hakima S. Abdelgadera [3], jenž by mohla nahradit současně užívaný prostý či vyztužený beton, popřípadě spolu s využitím jiných technologií, například drátokamenných konstrukcí a zároveň snížit náklady na realizaci těchto konstrukcí a zlepšit jejich environmentální aspekty. Hlavní myšlenkou této práce je možnost využívání lokálních surovin, s cílem snížení nároků na dovoz materiálu a zároveň užití ekologických materiálů, například poměrně rozšířeného



recyklovaného betonu či Sorfixu, jakožto materiálu založeném na odpadním popílku z uhelných elektráren.

## 4 Literární rešerše

V teoretické části mé bakalářské práce, se věnuji možnému využití technologie dvoufázového betonu na vodních stavbách, především jezových konstrukcích, přehradních tělesech a další objektech na vodních tocích, a to v rámci jejich výstavby, rekonstrukce, popřípadě sanace. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl v rámci literární rešerše shrnout vývoj stavebních materiálů na vodních stavbách, detailněji popsat využití betonu na těchto stavbách i problémy spojené s jeho užíváním a jejich možná řešení. Na konci mé rešerše také popisují studii, kterou jsem se v mé bakalářské práci nechal inspirovat.

### 4.1 Vývoj materiálů na vodních stavbách

Již od doby před naším letopočtem civilizace vyvíjela způsoby, jak si podmanit vodu, ovlivnit směr jejího proudění, zadržet její sílu či ochránit před ní svá obydlí. Tím započal i vývoj nejrůznějších staveb pro tyto účely a jako v každém oboru i zde hrál důležitou roli výzkum a vývoj nových stavebních materiálů. Na samém počátku byly ty nejzákladnější stavební prvky, tedy dřevo, kámen a zemina, a díky nim bylo možné vytvořit první vodohospodářské stavby, přičemž se jednalo především o primitivní jezy, kanály a rybníky pro zavlažování polí a chov ryb. S postupem času se lidstvu dařilo objevovat stále lepší a kvalitnější materiály, mezi nejdůležitější patřil objev materiálu podobnému dnešnímu tradičnímu betonu, který byl hojně využíván například pro výstavbu vodních nádrží. Dalším, a pravděpodobně nejdůležitějším krokem vpřed byl objev hydraulického pojiva cementu v 19. století a s ním spojeného použití v betonu a železobetonu. To umožnilo budovat mnohem větší, rozsáhlejší a složitější konstrukce.

Dalším důležitým materiálem využívaným v hydrotechnice je železo a jeho slitiny, nejčastěji tedy ocel. Krom jeho využití jakožto betonářské oceli si tento prvek našel důležité uplatnění u vysoce namáhaných konstrukcí, u nichž je zapotřebí přenos co největšího zatížení při redukci množství užitého materiálu. Z tohoto důvodu si ocel našla uplatnění při výrobě hradicích prvků (klapky, segmenty, hradidla...), vrat plavebních komor či jiných konstrukcí a prvků (gallův řetěz, česle, uzávěry...).

## 4.2 Využití betonu ve vodních stavbách

Beton, tedy ten klasický, složený ze směsi cementu, vody, kameniva, přísad a příměsí, popřípadě v kombinaci s betonářskou ocelí (železobeton), je hlavním stavebním prvkem téměř všech vodních staveb a na velkých vodních dílech bychom se bez tohoto materiálu neobešli. Zřejmě největší využití, co se objemu a hmotnosti týče, nalezneme na betonových přehradách, konkrétně tedy na našem nejrozšířenějším typu přehrady, a to přehradě betonové tížné. Zde beton zastává roli zatěžovacího prvku a přenáší zatížení vodního sloupce do základové spáry, přičemž svou hmotností zajišťuje stabilitu celé konstrukce proti otočení a posunutí od hydrostatického tlaku vody v nádrži a od tlaku spodní vody (vztlaku). V samotném tělese hráze jsou použity dva typy betonu rozdělené dle jejich požadovaných vlastností, a to na jádrový beton, sloužící čistě jako zatěžovací prvek v konstrukci nacházející se uprostřed tělesa hráze a obalový, rozložený po povrchu konstrukce a zajišťující resistenci proti působící vodě, aby nedošlo ke kolapsu stavby a zároveň aby přehrada mohla plnit svůj účel. Mezi hlavní požadované vlastnosti obalového betonu tedy patří vodonepropustnost a odolnost proti vnějšímu prostředí (například abrazi, chemická odolnost, odolnost proti změnám teplot...).

Takto mohutné konstrukce tvořené velkým objemem betonu však přinášejí řadu problémů (viz níže) a proto došlo k vývoji pilířových přehrad, které umožňují úsporu betonu při stejném statickém řešení. Ty však nejsou tolik rozšířené a v naší republice najdeme pouze jednu, a to VD Fláje. Další možností jsou takzvané klenbové přehrady. Ze statického hlediska je zde zatížení od vody přenášeno pomocí speciálně vytvarované

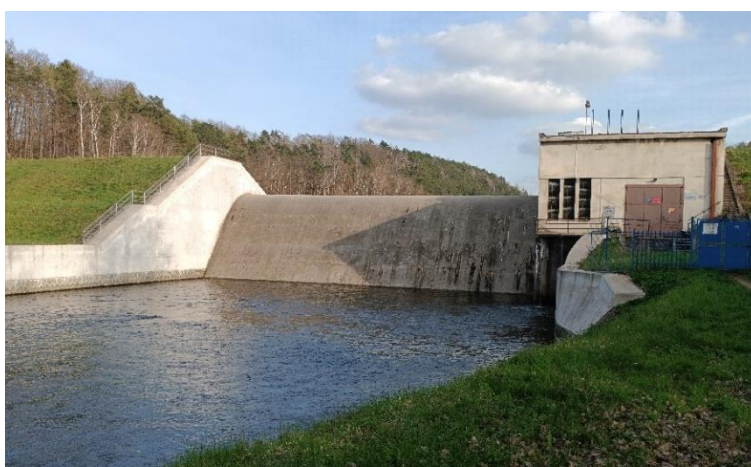


Obrázek 1 - VD Vrchlice – hráz

hráze do bočních stran údolí. Tím bylo dosaženo výrazné úspory materiálu, ale zvýšily se požadavky na jeho fyzikální vlastnosti z důvodu vyššího namáhání konstrukce ve více směrech. V našich geologických podmínkách se pro tento typ téměř nenachází vhodné podmínky, které by umožnily výstavbu tohoto typu přehrady, a proto stejně jako v případě přehrady klenbové nalezneme na našem území pouze jediný exemplář, a to VD Vrchlice.

Prostý beton a železobeton se však nepoužívá jen na přehradách betonových, ale i na sypaných homogenních a nehomogenních, jejichž těleso je tvořeno zeminou, a to v podobě například bezpečnostních přelivů či spodních výpustí. Ty jsou tvořeny převážně železobetonem a slouží k bezpečnému převedení vody přes těleso hráze, přičemž využití jiných materiálů by v těchto případech bylo velice problematické a nákladné.

Nejenom na velkých vodních dílech, přehradách, se s betonem setkáme. Jeho další využití bychom našli například u jezových konstrukcí. V naprosté většině těchto staveb jsou jejich základy (například ve tvaru Jamborova prahu) tvořeny právě betonem, a to v objemu stále poměrně velkém. Dále tento materiál nalezneme na konstrukčních prvcích jezu, například



Obrázek 2 - bezpečnostní přeliv Vyrovňovací nádrž Práčov

u pilířů mezi jednotlivými jezovými poli, u vývarové desky, u břehových křídel atd. Součástí jezů bývají i přidružené objekty, jako například plavební komory či vodní elektrárny. I zde je v hojné míře využíván beton. Například při rekonstrukci zdymadla České Vrbné u Českých Budějovic byla renovována

i plavební komora, přičemž spodní deska této komory měla mocnost přibližně dva metry.

V případě lodní dopravy se ve spoustě případech setkáme se situací, kdy řeka nesplňuje parametry vhodné pro plavbu, či je z ekonomického hlediska vhodnější zvolit jinou trasu či propojit dvě či více stávajících a v těchto případech si lidstvo pomohlo vytvořením umělých řek neboli plavebních kanálů. Jejich stavební řešení, především tedy z hlediska zajištění vodonepropustnosti konstrukce kvůli udržení vody v kanále, má několik variant, například užití fólií, přírodních vodonepropustných materiálů (jílové těsnění), či užití betonu. V posledním případě při využití betonového koryta se opět jedná o velkoobjemové stavby, a to především kvůli potřebné tloušťce konstrukce nejen z důvodu vodonepropustnosti, ale především kvůli vykompenzování vztlakových sil od spodní vody a zároveň z důvodu délky těchto vodních staveb, a to i v řádech desítek kilometrů. V České republice lze uvést jako příklad Plavební kanál Vraňany – Hořín pomáhající překonat lodím ústí řeky Vltavy do řeky Labe nedaleko města Mělník o celkové délce přes jedenáct kilometrů [4]. V současné době je plánována jeho

celková rekonstrukce a počítá se zde s vybudováním betonového těsnění v celé délce plavebního kanálu.

I na malých vodních tocích se setkáme se stavbami vybudovanými z betonu či beton obsahujícími. Jedním z příkladů můžou být například takzvané přehrážky, budované především na drobných tocích s cílem zastavení pohybu splavenin v případě zvýšených průtoků. Svým tvarem připomínají betonové tížné hráze, ale zpravidla nepřesahují výšku několika metrů. Mohou být buď pouze betonové, či kamenné anebo kombinované. Právě kombinované konstrukce jsou nejčastěji tvořeny vnějším obalem z pohledového kamene a vnitřní výplní z prostého betonu.

#### **4.2.1 Problematika výstavby vodních staveb a užívání betonu**

U staveb spojených s vlivem vodního prostředí se projektant, popřípadě stavitel musí potýkat s několika důležitými problémy, které mají vliv na budované dílo a jeho bezpečnost z hlediska možného ohrožení obyvatel. Jedním z nich je vliv samotného prostředí, a to jak na průběh výstavby, tak poté i na vybudovanou konstrukci po celou dobu její předpokládané životnosti. U výstavby hraje důležitou roli čas, ten se snažíme ušetřit u všech druhů staveb, ze zjevných důvodů jako třeba finance. U vodních staveb se však setkáme i s jinými argumenty, především tedy přírodními živly, například povodněmi (při budování vodního díla přímo v korytě řeky či jejím blízkém okolí), které mohou celou výstavbu přerušit, či vrátit o několik kroků zpět v případě porušení již zhotovené konstrukce. Při výstavbě vodního díla na vodním toce, v situaci, kdy dojde ke zvýšení aktuálního průtoku v korytě toku a prostředky pro převod vody přes staveniště nejsou schopny tento vyšší průtok bezpečně převést, jsou ohroženy jak již všechny vyhotovené konstrukce, tak i dočasné stavby či zařízení staveniště. Použití vhodných technologií, které urychlí průběh výstavby a tím sníží pravděpodobnost výskytu takovýchto povodňových nepředvídatelných stavů, ušetří finance jak investora, tak zhotovitele.

Avšak ani po dokončení výstavby není konstrukce v bezpečí, neboť je stále vystavována vlivu vodního prostředí. Kromě zatěžování konstrukce, která z tohoto důvodu musí splňovat dostatečné pevnostní vlastnosti (pevnostní třídy betonu v tlaku a tahu) je zde i vliv vody na samotnou vnější a vnitřní strukturu konstrukce, přesněji tedy užitého materiálu. Dle typu materiálu se určují i jeho potřebné vlastnosti, přičemž v této práci se věnuji převážně tradičnímu betonu. Ten musí být odolný vůči mechanickému narušování jeho struktury – abrazi (XM), teplotnímu kolísání (XF) a zároveň proti chemickému vlivu prostředí (XD, XA, XC). Všechny tyto charakteristiky betonu jsou nesmírně důležité a dodržení potřebných požadavků na beton

je i životně důležité. U vodních staveb může dojít v případě kolapsu konstrukce v důsledku nedodržení těchto zásad nejen k obřím ekonomickým a ekologickým újmám, ale i k rozsáhlým ztrátám na lidských životech. Z tohoto důvodu je výstavba vodních staveb jedním z nejrizikovějších stavebních odvětví a o to větší musí být i důslednost při kontrole a výběru jednotlivých materiálů a technologických postupů.

Dalším problematickou částí je používání samotného betonu. Jeho složení je v tomto případě jasné, skládá se klasicky z vody, kameniva, hydraulického pojiva (nejčastěji cement v kombinaci s jiným pojivem, například struskou či popílkem), příměsí a přísad. Při výstavbě vodních staveb se, jak jsem již zmiňoval výše, setkáme s konstrukcemi využívajícími velké objemy tohoto materiálu, který je ve většině případů potřeba dovážet i na větší vzdálenosti. Pokud bychom jako příklad opět vzali VD Orlík, přesněji tedy těleso jeho hráze, při stavbě které bylo spotřebováno přes 900 tis. m<sup>3</sup> betonu, tak objem dovezeného materiálu na tuto stavbu byl skutečně enormní a byl navíc ještě umocněn tím, že se v blízkém okolí nevyskytovaly dostatečně kvalitní zásoby kameniva pro výstavbu a bylo zapotřebí je dovážet z velkých vzdáleností [2]. V tomto případě byly využity staveništní betonárny, která celý proces urychlily a zároveň bylo možné dovážet jednotlivé složky betonu a míchat je přímo v prostoru staveniště. Z různých důvodů však tento způsob výstavby není možné provádět vždy a potom je nutné čerstvý beton na stavbu dovážet. Pro příklad, kdyby bylo zapotřebí dovážet beton na výstavbu VD Orlík, tak při využití normálního domíchávače betonu při dovezeném objemu 8 m<sup>3</sup> na jeden domíchávač, tak na celou stavbu by bylo zapotřebí jich dopravit přes 100 tisíc, což je z hlediska zátěže na životní prostředí nezanedbatelná položka.

S používáním betonu na vodních stavbách, přesněji tedy s velkými objemy jednotlivých stavebních prvků, se váže ještě jeden problém vycházející právě z velkoobjemových betonáží. Jedná se o vývoj hydratačního tepla. To vzniká v průběhu hydratačního procesu cementu po smíchání s vodou, například právě při výrobě betonu. Při betonážích velkých objemů, tedy v průběhu tuhnutí, může dojít vlivem hydratačního tepla k prudkému nárůstu teploty v konstrukci, což má za následek vznik tepelného napětí betonu, které má vliv na výslednou pevnost, vodonepropustnost a trvanlivost konstrukce. Jedná se o jev velice nebezpečný, obzvláště u betonáží probíhajících při vysokých teplotách, kdy může dojít ve finále i ke kolapsu celé konstrukce.

## 4.2.2 Způsoby provádění omezení hydratačního tepla

V současné době se s hydratačním teplem bojuje několika způsoby. Na prvním místě je volba správného cementu. Na vodních dílech, přehradách se jedná především o užívání cementu vysokopecního (CEM III – viz níže), jenž obsahuje vysokopecní strusku, která zde nahrazuje část cementu. Jeho hlavní konstrukční výhoda spočívá v pomalém nárůstu hydratačního tepla, a tím v průběhu tuhnutí a tvrdnutí dochází k ochraně konstrukce před prudkým zvýšením teploty, což by se při velkém betonovaném objemu stalo například při použití cementu portlandského (CEM I). Vývoj hydratačního tepla je zde tedy rozdělen do delšího časového intervalu, a to při stejných pevnostních charakteristikách jako při použití jiných druhů cementu. Jedinou nevýhodou užívání tohoto typu cementu je pomalý náběh pevnosti, což v případě výstavby velkých vodní děl, například přehrad, není zas tak zásadním problémem, protože doba výstavby těchto konstrukcí se pohybuje v delších časových horizontech.

Nejenom správný výběr hydraulického pojiva, ale i užití určitých přídavných látek může omezit vývoj hydratačního tepla při masivních betonážích. Jedná se například o použití granulovaného síranu hořečnatého, který se pomalu uvolňuje v průběhu hydratačního procesu a tím vytváří tepelnou stínící vrstvu, která zabraňuje nadměrnému ohřevu betonu. Tato technologie byla využita například při výstavbě přehrady Los Caracoles v Chile dokončené v roce 2017 [5]. Další přídavné látky mohou být například různé superplastifikátory, polymery, metakaolin [6] či zeolity.

Další variantou je rozdělení výstavby do jednotlivých etap či menších úseků, čímž se omezí objem čerstvého betonu, což má vliv na rychlost vychladnutí budované konstrukce. Nevýhodou je však delší doba výstavby právě z důvodu vyššího počtu betonáží, které od sebe musí být odděleny dostatečným časovým odstupem, a s tím spojené vyšší náklady na budovanou stavbu.

Betonovou směs však můžeme ochlazovat i přímo, a to jak před samotnou betonáží, tak i po ní. První možnost byla využita například při výstavbě přehrady Yacyretá na řece Paraná mezi státy Argentinou a Paraguayí [7] či největší přehrady na světě Tři soutěsky na řece Jang c' - ťiang v Číně [8] a spočívala v chlazení betonu při jeho míchání. Chlazení probíhalo přidáváním tekutého dusíku (tekutina o teplotě přibližně  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), čímž se snižovala počáteční teplota betonu již před samotnou betonáží. Tato varianta boje s hydratačním teplem je velice úspěšná, což potvrzuje užívání tohoto procesu i u těch největších přehrad. Velkou nevýhodou je vysoká cena tekutého dusíku, která se opět projevuje v celkových nákladech na výstavbu. Druhou možností je tedy ochlazování betonu až po samotné betonáží, tedy přímo v budované

konstrukci. V tomto případě se nejčastěji používá metoda předem uloženého potrubí v těle konstrukce, kterým se v průběhu hydratačního procesu nechává proudit studená voda, která beton zevnitř ochlazuje. Instalované chladicí potrubí je po dokončení procesu v konstrukci ponecháno. Tato technologie byla využita na našem území například při výstavbě vodního díla Orlík na řece Vltavě, v zahraničí se jednalo třeba o výstavbu Hooverovy přehrady na řece Colorado ve Spojených státech amerických. Výstavba probíhala v letech 1931 až 1935 a pro zajímavost k vychladnutí hráze na normální (okolní) teplotu došlo až v roce 1941 [9], tedy až po šesti letech.

### 4.2.3 Požadavky na beton na vodních stavbách

Tak jak jsou specifickým stavebním oborem vodní stavby, především co se týče mohutnosti jednotlivých konstrukcí, tak jsou i specifické betony na nich užívané. V průběhu let lze pozorovat vývoj těchto materiálů při výstavbě přehrad či jezů a lze říci, že každé vodní dílo má svůj vlastní specifický beton, který je dán specifickými požadavky na danou konstrukci. V našich podmínkách lze uvést například vodní dílo Orlík na řece Vltavě, při jehož výstavbě byla využita pro jádrový beton v té době unikátní směs betonu s využitím vysokopecního popílku [10] kvůli omezení hydratačního tepla (viz výše). Hydraulické pojivo v této betonové směsi se skládalo ze tří materiálů: portlandského cementu, strusky a portlandského popílku v poměru 9:4:5 a tato směs zajišťovala možnost použití i v takto mohutné konstrukci. Co se týče pevnosti tohoto betonu, tak dle získaných výsledků pevnost v tlaku po 28 dnech dosahovala hodnoty 10,1 MPa a po jednom roce vystoupala na hodnotu 23,4 MPa [11]. Z toho vyplývá, že požadavky na pevnost po 28 dnech nebyly nikterak veliké. V souhrnu lze říci, že hlavními směry z hlediska hydrotechnických staveb ve vývoji betonu bylo zaměření na vodotěsnost a trvanlivost v kombinaci se snížením hydratačního tepla. Trvanlivost byla ovlivňována především působící vodou v kombinaci se zmrazovacími cykly, a to s ohledem na předpokládanou životnost vodních staveb přesahující i sto let. V současné době však dochází k přejímání Českých technických norem (zkráceně ČSN), v nichž se všechny tyto vlastnosti dohánějí leckdy i přehnanými nároky na krychelnou pevnost v tlaku.

Jako příklad lze uvést porovnání současné normy ČSN EN 206+A2 [12] a doplňkové normy ČSN P 73 2404 [13], které charakterizují vlastnosti pro beton, jak čerstvý, tak ztvrdlý pro jednotlivé typy konstrukcí s knihou obsahující požadavky na beton na vodních dílech z roku 1961, tedy z doby největšího rozkvětu přehrad na našem území [14]. Dle těchto norem například všechny konstrukce vystavené dlouhodobému působení vody musí dosahovat



krychelné pevnosti v tlaku minimálně 30 MPa, zatímco v roce 1961 byly požadavky na obalový beton přehrady (taktéž konstrukce trvale vystavená působení vody) 135 kg/cm<sup>2</sup> (v přepočtu přibližně 13 MPa). Nejedná se však jen o příklady z přehradního stavitelství. Při rekonstrukcích, například jezových konstrukcí, se taktéž můžeme setkat s přehnaně vysokými nároky na pevnost betonu u minimálně namáhaných konstrukcí při dodržování ČSN. Jako příklad lze uvést rekonstrukci Šítkovského jezu v Praze na řece Vltavě (ř. km 54,14) zahájenou v roce 2023, při níž je budováno nové betonové předpolí. V tomto případě se nejedná o vysoce namáhanou konstrukci, působí na ni pouze hydrostatický tlak o výšce vodního sloupce v řádech maximálně několika málo metrů a částečný vztlak od spodní vody. Přesto z důvodu dodržování ČSN zde byl dán požadavek na beton minimální pevnosti 30/37 MPa. Pro porovnání, beton této pevnosti se užívá pro ohýbané namáhané konstrukce, například stropy obytných budov. V tomto směru by tedy dle mého názoru mělo dojít k úpravě stávajících technických norem a jejich přizpůsobení reálným podmínkám na vodních stavbách.

Pokud tedy shrnu současné požadavky na výstavbu a rekonstrukci vodních staveb v České republice s ohledem na požadavky vycházející z ČSN, tak lze konstatovat, že v mnoha případech jsou nároky na betonové konstrukce z hlediska výsledné pevnosti v tlaku, přesněji tedy na beton na nich použitý přílišně přehnané a v mnoha případech by bylo možné použít i betony s nižšími výslednými pevnostmi. Popřípadě nepoužívat striktně požadavek na pevnost v tlaku po 28 dnech běžně užívanou, ale z důvodu délky výstavby některých vodních staveb, z nichž se některé pohybují i v řádech let, se řídit pevnostmi po odpovídající době.

Beton na vodních dílech se však nenavrhuje pouze z hlediska pevnosti, ale jak jsem již psal výše, tak i s ohledem na agresivitu prostředí, v němž se bude nacházet. Dle typu působení vnějšího prostředí rozlišujeme jednotlivé stupně vlivu prostředí, ty jsou rozděleny do několika skupin a jsou ještě déle rozděleny do podstupňů, dle intenzity vlivu. Od těchto stupňů jsou odvozeny doporučené hodnoty pro maximální vodní součinitel, minimální třídu betonu, minimální obsah vzduchu a minimální množství cementu ve směsi. Jednotlivé stupně jsou označeny X0, XC, XD, XS, XF a XA a jsou právě doplněny o jednotlivé podstupně, přičemž dle intenzity vlivu je k danému označení přidána ještě číslice, například tedy XF4, XA2 atd. Tyto stupně nám popisují vliv prostředí následovně:

- X0 – bez nebezpečí koroze anebo narušení
- XC – koroze vlivem karbonatace
- XD – koroze způsobená chloridy jinými než z mořské vody
- XS – koroze způsobená chloridy z mořské vody

- XF – střídavé působení mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich
- XA – chemicky agresivní prostředí

Jednotlivé podstupně poté ještě upřesňují, v jaké míře vnější vlivy na beton působí, například zda se jedná o mokré či vlhké prostředí, jak moc je beton nasycen či jak často je vystavován danému jevu či jak moc je prostředí agresivní. Z toho všeho je tedy jasné, že při výstavbě vodních děl se lze setkat téměř se všemi vlivy prostředí, a navíc ještě samostatně každá konstrukce bude mít tento stupeň vlivu jiný (například trvale ponořený vývar jezu oproti tělesu hráze s neustálými změnami hladiny). Důležitým poznatkem je však to, že ve většině případů je u těchto vlivů doporučena minimální třída betonu C30/37.

### 4.3 Two stage concrete

Celým názvem „Self-compacting grout to produce two-stage concrete“, v překladu „Samozhutnitelná malta pro výrobu dvoustupňového betonu“ je studie týmu vedeného Hakimem S. Abdelgaderem z University of Tripoli v Libii z roku 2019. Hlavním cílem studie bylo odstranění problému se segregací kameniva, který se vyskytuje u prostého a samozhutnitelného betonu s využitím dvoustupňového betonu. Ten skládá ze dvou hlavních složek, tedy injektážní malty a hrubého kameniva. Do bednění se nejprve vkládá hrubé kamenivo a poté se do bednění vstříkuje čerstvá směs. Hlavním rozdílem mezi tradičním betonem a betonem two-stage concrete je způsob přípravy a velikost kameniva [3].

Právě tato studie mě inspirovala k výzkumu technologie dvoufázového betonu s možným využitím na vodních stavbách, avšak nikoliv z důvodu segregace kameniva, ale možného použití lokálních zdrojů kameniva a možným vlivem na vývoj hydratačního tepla.

## 5 Dvofázový beton

Jak již bylo výše zmíněno, cílem mé práce je materiál vycházející ze studie Two stage concrete, který by našel využití na vodních stavbách. Zkoumaná technologie tak dostala počestný název dvofázový beton. Základní princip výzkumu je obdobný jako u zdrojové studie, tedy otočit tradiční průběh betonáže, tedy lití již připraveného betonu/malty (pojivo, kamenivo, voda...) do formy/bednění a to tak, že kamenivo je předem uloženo, vsypáno do formy – první fáze, a maltová směs je přidávána až v následném kroku – druhá fáze. Hlavní cíl tohoto postupu je však jiný než u Two stage concrete, kde se jednalo o odstranění problému se segregací kameniva v betonové směsi. V tomto případě je primárním cílem práce najít směs vhodnou pro výše uvedený způsob betonáže s možným využitím na vodních stavbách z důvodu ekologizace výstavby těchto staveb. Pojem ekologizace dnes zahrnuje široké spektrum aspektů, od snížení emisí, užívání ekologických materiálů, snižování uhlíkové stopy až po výsadbu zeleně v centru měst.

U dvofázového betonu je na prvním místě využívání lokálních zdrojů surovin. Dvofázový beton, stejně jako ten tradiční, obsahuje cca 76 % hmotnostního podílu kameniva, z čehož v případě dvofázového betonu zaujímá přibližně 60 % hmotnosti hrubé kamenivo. Při normální betonáži se celý objem musí leckdy dovážet přímo na staveniště a obzvláště u vodních staveb, u kterých je podíl betonu v konstrukci ve většině případů enormní, jde o značný vliv na životní prostředí. Dvofázový beton předpokládá využití výše zmíněného hrubého kameniva z lokálních zdrojů, ideálně z nejbližšího okolí staveniště (v případě vodních staveb například říční kamenivo) s tím, že by takto bylo možné ušetřit dopravu přibližně 60 % hmotnosti dováženého materiálu v domíchávacích betonu. A to jak z betonárky na stavbu, tak z kamenolomu na betonárku.

Výsledný prvek však musí splňovat celou řadu náležitostí, vlastností, které by umožňovaly jeho užití v praxi. Jedná se například o výše zmíněnou pevnost v tlaku, tahu či například vodonepropustnost. Dalším důležitým faktorem je možnost opakování jeho výroby, tedy zajištění konzistentních vlastností u všech takto vyrobených prvků, aby mohly být jednotlivé fyzikální a chemické vlastnosti garantovány.

Každý nově objevený materiál by však nebyl ničím bez možnosti jeho využití v praxi a u dvofázového betonu tomu není jinak. Primárním směrem tohoto výzkumu bylo jeho uplatnění, tedy využití na vodních stavbách. Jako každý obor ve stavitelství i tento má svá specifika a požadavky na jednotlivé materiály. Na tomto základě byly vybrány klíčové vlastnosti, které by zkoumaný materiál měl mít. Na prvním místě byla samozřejmě krychle

na pevnost. Jelikož cílem bylo nahrazení prostého betonu, musel i výsledný produkt mít v tomto směru obdobné vlastnosti. K rychlená pevnost v tlaku u prostého betonu v současnosti používaného na vodních stavbách se liší podle typu konstrukce, a to přibližně od 5 MPa až po 37 MPa. Z tohoto důvodu nebyla cílová hodnota zkoumaného materiálu exaktně stanovena, a to kvůli možné aplikaci na více typech objektů. Předpokladem bylo tedy dokonalé stmelení jednotlivých zrn kameniva tak, aby spolupůsobením všech prvků směsi dosáhl beton za pomoci technologie výroby dvoufázového betonu požadované pevnosti. Další charakteristikou vodních staveb je přítomnost vody. V kombinaci s počasím a jinými přírodními vlivy se jedná o poměrně nebezpečný faktor, a proto jako další vlastnost byla vybrána odolnost proti zmrazování a rozmrazování. Zkoumaný prvek by tedy měl být odolný proti trvalému ponoření do vody v kombinaci s nepříznivým častým střídáním teplot. Voda obsahuje i jiné chemické látky, například chloridy, a z tohoto důvodu by měl být dvoufázový beton odolný i vůči vlivům těchto látek. V určitých případech užití betonu na vodních stavbách se řadí mezi jeho hlavní vlastnosti i vodonepropustnost. Z důvodu malé prostupnosti maltové směsi mezi stykovými plochami jednotlivých zrn ve vzorku zde byla obava z přílišného průsaku vody tímto materiálem, například při vzniku kaveren při nedokonalém prolití kamenné výplně, a proto se vodonepropustnost zařadila mezi požadované vlastnosti tohoto materiálu.

Nejenom samotný materiál, ale i jeho výroba, tedy technologický postup, musí splňovat určité parametry či kritéria. Na prvním místě je samozřejmě schopnost provádění, tedy obtížnost vytvoření prvku. Předpokladem bylo tedy vytvoření materiálu, jehož výroba by byla co nejjednodušší, a to ideálně bez použití těžké mechanizace a zároveň byl splněn požadavek, aby materiál i při tom nejprimitivnějším provádění vždy zajistil všechny požadované vlastnosti na celé budované konstrukci. V případě Two stage concrete použil Hakim S. Abdelgader tlakovou betonáž, tedy připravenou maltovou směs do bednění vhněhl mechanizací pod tlakem. Tento způsob se zdál být vhodný i pro výrobu dvoufázového betonu. Jedná se o efektivní způsob probetonování těžko přístupných míst a pravděpodobně by tímto způsobem došlo k velmi kvalitnímu prolití celé uložené kamenné výplně ve formě. Zároveň se však jedná o metodu technicky poměrně obtížnou a ekonomicky náročnou. Proto byl proveden krok zpět na úplný začátek s tím, že jedinou pohonnou jednotkou prolévání maltovou směsí bude gravitace. Metoda byla tedy založena na samovolném protečení/prolití celého vzorku připravenou maltovou směsí s tím, že správně zvolená směs bude schopna tímto způsobem vyplnit všechny volný prostor, všechny póry a vytvoří tak zmonolitněnou strukturu

s dostatečnou pevností a chemickou a fyzikální odolností s možností využití na vodních stavbách.

Posledním důležitým požadavkem byla ekonomická stránka. V současné době se zvyšují ceny stavebních materiálů každým dnem a cena jednotlivých staveb vzrostla i několikanásobně. Na vině jsou nejen globální faktory, například válka na Ukrajině, či snahy ekologů o omezení některých dle nich neekologických materiálů (prostý beton), ale i úbytek surovin potřebných pro výrobu stavebních materiálů. Jedná se například o zdroje písku, vápence (výroba cementu) či jiné. Proto užívání lokálních materiálů a snížení hmotnosti a objemu dováženého materiálu, by teoreticky mohlo zajistit nižší cenu stavebního díla při výstavbě. Zároveň byla při výzkumu snaha využít ekologičtějších materiálů nahrazujících cement, jako například Sorfix, jehož složení je založeno na bázi vysokopecního popílku (odpad při spalování, například v uhelných elektrárnách), a i tímto způsobem snížit vliv na životní prostředí dvoufázového betonu.

## 5.1 Maltová směs

Ve stavebnictví se malta hojně využívá jako pojivo či omítková hmota. Každá malta sestává z několika hlavních složek, jedná se o drobné kamenivo, vodu, a hlavně pojivo. Dle typu tohoto pojiva rozeznáváme malty vápenné, vápenocementové, hliněné, cementové a další. V rámci mé práce používám maltu cementovou, u níž je, jak již název napovídá, hlavním pojivem cement. Jedná se o hydraulické pojivo, tedy materiál schopný tvrdnout i pod vodou. Základním prvkem cementu jsou slínkové minerály, které se vyrábějí v rotační peci za vysokých teplot okolo 1 450 °C ze směsi vápence a jílu. Existuje celkem pět základních druhů cementu. Portlandský (CEM I), portlandský směsný (CEM II), vysokopecní (CEM III), pucolánový (CEM IV) a směsný (CEM V). Každý z nich se vyznačuje jiným složením a samozřejmě odlišnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které mají vliv na výslednou charakteristiku ztvrdlé směsi. Normalizované značení cementu vychází z použitého druhu cementu, podle množství příměsí, pevnosti a rychlosti vývoje počáteční pevnosti. Z hlediska pevnosti rozeznáváme tři typy cementu, a to 32,5 MPa, 42,5 MPa a 52,5 MPa (pevnost cementu po 28 dnech).

V mé práci často používám pojmy malta a beton. Jak jsem již psal výše, v obou případech se jedná o směs pojiva, vody, příměsí, přísad a kameniva. Právě užití kamenivo, přesněji jeho velikost či frakce, od sebe tyto dva termíny, materiály rozlišuje. Zatímco malta obsahuje pouze kamenivo drobné, tedy kamenivo obsahující zrna do maximální velikosti 4 mm, beton se vyznačuje obsahem jak drobného, tak hrubého kameniva (zrna o velikosti od 2 do 63 mm).

Jako příklad drobného přírodního kameniva lze uvést například klasický říční písek, či písek kopaný, přičemž v mé práci užívám v maltové směsi jako drobné kamenivo právě říční písek praný frakce 0/4.

### 5.1.1 Portlandský cement

Jedná se o nejpoužívanější cement ve stavebním inženýrství, který je zároveň oproti ostatním i nejvíce dostupný. Mezi jeho hlavní výhody patří rychlý nárůst pevnosti a právě dostupnost. Mezi hlavní nevýhody patří především vysoký vývin hydratačního tepla a vyšší cena než u ostatních cementů. Z hlediska použitelnosti se využívá především pro betony vyšších tříd, pro konstrukce předpínané, tenkostěnné či mostní a železobetonové.

V mé bakalářské práci používám cement značený CEM I 42,5 R. Jedná se o cement s normovanou pevností v tlaku po 28 dnech 42,5 MPa a s rychlým nárůstem pevnosti (značení R). Jeho jedinou složkou je portlandský slínek, a to z něj dělá cement o vysoké kvalitě, který je vhodný pro ty nejnáročnější konstrukce. Zároveň se jedná o cement vhodný pro výrobu injektážních malt [15].

### 5.1.2 Vysokopecní cement

Jedná se o cement, který neobsahuje pouze slínek portlandský, ale i určité množství vysokopecní strusky (odpad při výrobě železa ve vysokých pecích). Tento druh cementu je vhodný především pro velkoobjemové betonáže, a to z důvodu nízkého nárůstu hydratačního tepla. Zároveň vyniká výbornou odolností vůči agresivnímu prostředí. Jedná se tak o cement vhodný pro použití při výstavbě vodních staveb. Cenově se nachází pod cementem portlandským, ale není tak dostupný a běžný.

V rámci mé práce pracuji s vysokopecním cementem značeným jako CEM III/B 32,5 L – LH/SR. Jedná se o cement s obsahem přibližně 65 - 80 % vysokopecní strusky (značení B), zbytek tvoří portlandský slínek a síran vápenatý. Z hlediska pevnosti má po 28 dnech pevnost v tlaku 32,5 MPa a zároveň má pomalý nárůst pevnosti (značení L). Mezi charakteristické vlastnosti patří odolnost proti síranům, odolnost vůči agresivnímu prostředí (XA1 až XA3), velmi pomalý nárůst pevností, velmi nízká počáteční pevnost, středně vysoká konečná pevnost, velmi pomalý vývin hydratačního tepla a celkově nízké hydratační teplo [16].

### 5.1.3 Sorfix

Jedním z použitých materiálů v mé práci je Sorfix. Jedná se o hydraulické pojivo na bázi fluidního popílku vyvinuté ve spolupráci Fakulty stavební ČVUT v Praze, Ústavu skla a keramiky VŠCHT Praha a firmy ČEZ Energetické produkty s.r.o. [17]. Jeho základní surovinou, dle volně dostupných informací, je výše zmíněný fluidní popílek. Ten na rozdíl od klasického vysokopecního popílku, jenž se hojně využívá při výrobě betonu jako součást hydraulických pojiv, vzniká při fluidním spalování (ekologičtější varianta spalování uhlí v tepelných elektrárnách, která snižuje produkci oxidu siřičitého a oxidu uhličitého a tím i dopad na životní prostředí [18]) a liší se především svým chemickým a mineralogickým složením. Díky jeho složení bylo prokázáno, že konstrukce vytvořené za pomoci tohoto materiálu jsou odolnější vůči působení agresivního prostředí (například slaná mořská voda) oproti klasickému portlandskému cementu a zároveň při porovnání s konvenčním cementem výroba jedné tuny tohoto materiálu ušetří 0,72 tuny CO<sub>2</sub> [19]. Jedná se o materiál vhodný k výrobě betonů, malt, prefabrikovaných výrobků, vibrolisovaných výrobků a jako příměsí do betonu. V současné době nalezneme i konstrukce z něj vytvořené přímo v praxi, například jakožto stříkaný beton při výstavbě průzkumné štoly metra D v Praze.

Zajímavostí je, že obdobné pojivo bylo odhaleno při analýzách římských nadzemních a podmořských staveb. Tento beton se vyznačoval taktéž vysokou odolností, o čemž svědčí i stáří zkoumaného materiálu, přibližně dva tisíce let [17].

Pro využití v mé práci jsem tento materiál zvolil z důvodu jeho ekologičnosti a obdobným vlastnostem jako v případě vysokopecního cementu, tedy kvůli pomalého vývoji hydratačního tepla a předpokládané dobré odolnosti vůči vlivům vnějšího prostředí.

### 5.1.4 Přísady

Jak již bylo zmíněno výše, součástí betonu také často bývají takzvané přísady. Jedná se o chemické látky, které při smíchání s čerstvou maltou mění požadované vlastnosti čerstvého či ztvrdlého betonu. Z celkové hmotnosti betonu či malty zabírají pouze desetiny procent, jejich dávkování je tedy v porovnání s ostatními složkami velice malé. Podle funkce, tedy měněné vlastnosti čerstvého betonu se dělí přísady následovně:

- plastifikátory, superplastifikátory
- zpomalovače tuhnutí, tvrdnutí
- urychlovače tvrdnutí, tuhnutí

- provzdušňovače
- zpěňovače
- stabilizátory atd.

V mé práci užívám dva z těchto typů přísad, a to superplastifikátor a stabilizátor. V prvním případě se jedná o chemickou sloučeninu určenou pro lepší zpracovatelnost čerstvého betonu při užití nižšího objemu vody, což vede ke snížení vodního součinitele (podíl vody a cementu ve směsi) a tím k vyšším pevnostem a lepší chemické a fyzické odolnosti ztvrdlého betonu. Hodí se tedy v případech, kdy je zapotřebí vyšší tekutost čerstvého betonu (například při prolévání kameniva) s dodržáním hodnot odolnosti betonu ztvrdlého. V druhém případě, u stabilizátoru, se jedná opět o chemickou sloučeninu, užívanou pro stabilizaci čerstvého betonu pro zachování konzistentních podmínek a zároveň pro zabránění segregace kameniva ve směsi, odlučování vody a tvorby výkvětů. Využívá se například při výrobě vysoce tekutých a samozhutnitelných betonů.

#### 5.1.4.1 MasterGlenium SKY 504

Jedná se o plastifikátor od výrobce Master Builders Solutions CZ s.r.o. na bázi polykarboxyláteteru, který slouží pro výrobu stříkaných betonů a betonů měkkých a velmi tekutých. Po přidání do míchané směsi způsobuje velmi dobré ztekucení čerstvého betonu a zároveň výborné zachování konzistence zejména u betonů F4 až F6. Zároveň zajišťuje lepší rozptýlení cementu ve směsi a při vyšším dávkování zpomaluje vývoj počáteční pevnosti a tím i vývoj hydratačního tepla [20].

#### 5.1.4.2 Stabilan 300 F

Tento stabilizátor od firmy Stachema CZ s.r.o. je vytvořen na bázi syntetických kopolymerů a užívá se především k výrobě vysoce tekutých samozhutnitelných betonů, prefabrikátů, monolitických betonových konstrukcí a lehkého betonu. Zajišťuje neměnnou konzistenci betonu až po dobu dvou hodin, a hlavně zabraňuje segregaci kameniva, odlučování vody a tvorbě výkvětů. Zároveň pozitivně ovlivňuje reologické vlastnosti čerstvého betonu strukturu a konečnou pevnost vyzrálého betonu [21].



## 5.2 Kamenivo

Společně s pojivem a vodou tvoří kamenivo hlavní složku betonu, přičemž ve směsi zaujímá přibližně 76 % celkové hmotnosti. V současnosti se hojně využívá téměř ve všech odvětvích stavebního průmyslu a jedná se o nedílnou součást téměř každé betonové konstrukce. Spousta lidí si pod pojmem kamenivo v betonu představí klasický kámen, který člověk nalezne například v kamenolomu, avšak pravda je trochu jiná. Pod tímto pojmem se schovává téměř každý zrnitý materiál, ať již přírodní či umělý, který je k výrobě betonu vhodný. Nejedná se tedy jen o klasický lomový kámen (jak těžební, tak drcený) zmíněný výše, ale i například uměle vyráběný Liapor (kamenivo vyráběné tepelnou expanzí jílu), či recyklované materiály, které vznikají nejčastěji nadrcením již vyhotovené konstrukce, nejčastěji se jedná například o recyklovaný beton.

## 6 Vlastní laboratorní výzkum – vývoj materiálu

Součástí mé bakalářské práce je i můj vlastní laboratorní výzkum a vývoj materiálů testovaný na fyzických vzorcích a zkušebních tělesech v laboratořích katedry K210 Experimentální centrum FSv ČVUT v Praze. V rámci tohoto výzkumu jsem se snažil prozkoumat a otestovat všechny aspekty spojené s technologií dvoufázového betonu, a to samozřejmě s cílem dosáhnout co nejlepšího možného



Obrázek 3 - zkušební tělesa o hraně 150 a 200 mm



Obrázek 4 - reálný vzorek

Jednalo se o převážně o krychle  $200 \times 200 \times 200$  mm a krychle  $150 \times 150 \times 150$  mm. Výjimku tvořilo zkušební těleso reálného vzorku, které mělo tvar desky o rozměrech  $1 \times 1 \times 0,2$  m.

výsledku s ohledem právě na možné využití na vodních stavbách. Celkem tedy byly zkoumány tři složky této technologie, tedy vhodný technologický postup, hrubé kamenivo a maltová směs, viz níže.

Součástí výzkumu bylo i vytváření zkušebních těles, z důvodu následného testování ztvrdlého betonu.

### 6.1.1 Technologický postup

Cílem nalezení vhodného technologického postupu nebylo použít systém plný složitých mechanismů a operací, ale naopak, přizpůsobit technologii dvoufázového betonu tak, aby i ten nejjednodušší způsob výroby umožňoval dosáhnout požadovaného výsledku a každý další technologický krok, mechanizace..., byl už jen krokem vpřed. Například v rychlosti výroby, v kvalitě vzorku, či ve finální ceně. Z těchto důvodů byla, jak je výše uvedeno, zvolena metoda s využitím gravitace, tedy samovolného prolití celé kamenné výplně maltovou směsí. Otázkou však bylo, zda aplikovat směs jako při normální betonáži směrem odshora dolů, či využít systém trubek a plnit bednění směrem odspodu vzhůru. Při první variantě by však bednění vyžadovalo navýšené okraje, aby nedocházelo k vylévání maltové směsi mimo formu, a z tohoto důvodu byla zvolena varianta s proléváním ve směru odspodu vzhůru. Zároveň při této metodě bylo jasně vidět pouhým pohledem kdy došlo k plnému naplnění všech mezer, tedy kdy se maltová směs objevila na povrchu vzorku. Dalším krokem výzkumu tedy bylo samotné plnění potrubí. Z důvodu snadného protékání maltové směsi tímto potrubím bylo zvoleno klasické PP potrubí o průměru DN 32 mm a délce přibližně o 10 cm větší, než byla výška bednění, a to z důvodu

snazšího plnění a vysouvání potrubí z formy. V rámci výzkumu byly vybrány dvě varianty plnicího potrubí, první s perforací a druhá bez perforace. Potrubí s perforací obsahovalo po celé své výšce navrtané otvory, které měly napomoci lepšímu prolití formy. Tyto dvě varianty byly otestovány u prvního zkušební vzorku.

Protože se jednalo o výzkum v laboratorních podmínkách, další důležitou volbou byl výběr formy, tedy bednění. Pro klasické zkoušení betonu, maltových směsí, cementu... se tradičně užívá demontovatelná ocelová forma o rozměrech 150 × 150 × 150 mm. Pro tento projekt s využitím větších frakcí kameniva se však tento rozměr zdál ne příliš dostatečný. Z tohoto důvodu byla zvolena u většiny testovaných směsí ocelová forma o rozměrech 200 × 200 × 200 mm. Opět se jednalo o demontovatelnou ocelovou formu. Pro přiblížení realitě bylo u jednoho vzorku využito i bednění o větších rozměrech, viz níže.

Následovala samotná příprava před betonáží. Ta nejprve spočívala v uložení plnicích trubek do připravené formy (obr. 5). Ty byly vždy uloženy na střed bednění a na samém počátku se dotýkaly dna. V dalším kroku přišlo na řadu ukládání kameniva. Ať se jednalo o jakékoliv kamenivo (viz níže), před samotným vložením bylo nejprve omyto tekoucí vodou a



Obrázek 5 - technologický postup (připravené vzorky k betonáži)



Obrázek 6 - technologický postup (formy s plnicím potrubím)

až následně vkládáno do formy. Ukládání probíhalo velice jednoduše, kamenivo bylo pouze vysypáno do formy, a to bez jakéhokoliv hutnění. Zároveň tedy došlo k obsypání připraveného plnicího potrubí. To ve výsledku vyčnívalo několik centimetrů nad horní hranu kameniva. Pro snazší plnění bylo každé plnicí potrubí vybaveno na jeho horním konci plnicím trychtýřem. Poté již přišlo na řadu míchání a příprava maltové směsi. Bez ohledu na druh směsi byly vždy jednotlivé složky přesně naváženy na digitální váze a poté v předepsaném pořadí smíchány dohromady. K promíchání byly využity elektrické míchačky, vždy dle objemu připravované maltové směsi. Nejprve do nich byly vsypány cement a písek a tyto dvě složky byly pár minut promíchávány. Následovalo postupné přidávání vody, a nakonec byly do směsi se dány i užívané příměsi (pokud je daná směs obsahovala). U určitých typů směsí bylo zapotřebí

několik minut všechny složky důkladně promíchávat, a to z důvodu aktivace příměsí, bez nichž by čerstvá směs neměla dostatečné požadované vlastnosti. Doba míchání se odvíjela od typu dané příměsí a aktuální pokojové teploty (viz 5.1.4). Po dokončení této části byla hotová mokrá maltová směs přelita do připravených nádob a přešlo se k betonáži.

Ta, jak bylo uvedeno výše, probíhala za využití gravitace a to následovně. Pomocí zednické naběračky (betonářské ruční náradí užívané k nabírání betonu) byla maltová směs nabrána a opatrně nalita do připraveného trychtýře nad plnicím potrubím. Plnění probíhalo do té doby, dokud se celá plnicí trubka zcela nezaplnila. Po jejím zaplnění byla trubka přibližně o 5 cm povysunutá směrem z formy a celý proces se znovu opakoval, a to až do úplného vysunutí plnicí trubky ze vzorku. Vršek byl následně zednickou lžící srovnán do roviny. Tímto způsobem probíhala betonáž všech zkušebních vzorků nehlédě na použité kamenivo či maltovou směs.

Jak již bylo zmíněno výše, u první sady, dvojice zkušebních vzorků, byly otestovány dvě varianty plnicích trubek, tedy s perforací a bez perforace. Již ihned po betonáži byly mezi oběma variantami znatelné rozdíly. U první z výše zmíněných variant byl do vzorku prokazatelně nalit menší objem maltové směsi nežli u té druhé, tedy bez perforace. Co se týče reologických vlastností, tedy schopnosti směsi protéci plnicím potrubím, se průměr potrubí zdál být dostatečný, neboť v tomto případě maltová směs bez větších problémů svévolně protékala do formy. Po vytuhnutí a vytvrnutí obou vzorků následovalo jejich odbednění. Zde již byl prokazatelně patrný rozdíl mezi oběma zvolenými technologickými postupy, viz obr. 7. V případě trubky s perforací připomínal vzorek svým tvarem atomový hřib, bylo tedy patrné, že v průběhu betonáže vlivem navrtaných otvorů maltová směs volila směr toku s nejnižším odporem, tedy pouze v horní části vzorku. Spodní část byla velice nedostatečně prolita a z tohoto důvodu bylo užívání potrubí s perforací označeno jakožto nevhodné pro tento výzkum.



Obrázek 7 - technologický postup (vlevo vzorek bez perforace, vpravo s perforací)

V případě druhé varianty, tedy užití potrubí bez perforace, byl výsledek diametrálně odlišný. Zde vyhotovený a odbedněný vzorek připomínal svým tvarem spíše válec, bylo tedy jasné, že postupné vytahování potrubí zajistilo postupné prolití po celé výšce v dostatečném rozsahu, betonáž tedy byla v tomto případě ideálně

konzistentní po celé výšce. Pro následující fáze výzkumu byla tedy zvolena tato varianta jakožto dostatečně účinná, nijak technologicky náročná a splňující všechny zadané požadavky a nároky.

### 6.1.2 Volba kameniva

Jedním ze zkoumaných směrů při vývoji dvoufázového betonu byla volba používaného kameniva. Kamenivo by mělo být dostatečně velké frakce, aby umožňovalo co nejlepší prolití maltovou směsí a ekonomicky hospodárné (levné) a plošně dostupné z důvodu možnosti využívání lokálních zdrojů. Dalším rozhodujícím faktorem výzkumu byl fakt, že se jednalo o laboratorní experiment prováděný v omezených prostorách a formách a vyžadující možnost opakování a s tím spojené, pokud možno co nejkonzistentnější, složení kameniva. Jak již bylo zmíněno výše, viz technologický postup, pro výzkum byla zvolena ocelová forma o rozměrech  $200 \times 200 \times 200$  mm. Do formy této velikosti je tedy možné uložit kameny od těch nejmenších velikostí až teoreticky po velikost 200 mm. Pro účely tohoto výzkumu však bylo zapotřebí vybrat kamenivo o vhodné velikosti, tak aby ve výsledném vzorku splňovalo všechny požadované vlastnosti.

Nejprve však bylo zapotřebí definovat vhodnou frakci kameniva, aby bylo možné jednotlivé pokusy opakovat, a aby mělo kamenivo vždy podobné vlastnosti. Z tohoto důvodu byl rozhodnuto, že kamenivo bude voleno dle klasického užívaného rozdělení dle frakcí. V tomto případě by se mohlo jednat o kamenivo v rozmezí 0/125. Kameniva malých frakcí 0/16 v tomto případě nejsou příliš vhodná, neboť dle předpokladu by v případě betonáže kvůli nízké pórovitosti maltová směs nebyla schopna v dostatečné míře protéct celou mocností kameniva i tím efektivně vyplnit všechny prostory. To by mělo za následek nekonzistentnost celého vzorku, a hlavně pravděpodobně drolení vzorku v okrajových částech (v prostoru nejvzdálenějším od místa aplikace směsi). Malé frakce tedy byly z experimentu vyřazeny. Další na řadě byla tedy úvaha nad maximální velikostí kameniva.

Rozhodující byla v tomto případě velikost formy. Teoreticky by bylo možné do ní uložit kamenivo velkých frakcí, například 63/125, ale z experimentálního hlediska by u takto malého vzorku takto velké kamenivo mohlo způsobovat přílišné odchylky u jednotlivých vyhotovených vzorků a nebyl by tedy splněn požadavek na možnost iterace, z důvodu rozdílných fyzikálních a chemických vlastností. Z těchto důvodů bylo tedy užití takto velkého kamenivo zamítnuto. Zbývaly tedy na výběr frakce z rozmezí 16 - 63 mm.

Nabízely se tedy k dispozici dvě frakce kameniva, a to 16/32 a 32/63, přičemž obě vítězné frakce byly otestovány praktickou metodou. První z těchto dvou byla vyzkoušena u první sady vzorků. Do dvou forem bylo tedy v tomto případě vsypáno těžené kamenivo frakce 16/32 a byla provedena betonáž (viz 6.1.1). Po odbednění vzorku však vyvstal problém s takto malou frakcí, neboť bylo zřejmé, že díky malé pórovitosti nebyla maltová směs schopna v dostatečné míře protéct připraveným kamenivem. Ihned po odbednění totiž téměř 50 % kameniva vypadlo ven a pouze polovina z něj byly zpevněna maltovou směsí. Ta pronikla kamenivem maximálně do vzdálenosti cca 6 cm od místa uložení prolévacího potrubí. Tato frakce byla tedy vyhodnocena jakožto nevhodná a vyřazena z projektu, protože u ní nebylo možné dosáhnout prolití vzorku v takové míře, aby byly splněny vstupní požadavky a předpoklady. Zbývalo tedy kamenivo frakce 32/63. To bylo použito hned u druhé zkušební sady vzorků.



Obrázek 8 - vzorek s kamenivem 16/32

Betonáž u druhé sady vzorků probíhala obdobně jako v prvním případě, pouze s tím, že předem uložené kamenivo bylo lomové frakce 32/63. Již v průběhu betonáže bylo vidět, že směs v tomto případě protéká mnohem snadněji a dle spotřeby malty byl vzorek i více vyplněn. Po vytvrdnutí betonu a odbednění vzorku bylo jasné, že toto kamenivo bude pro další průběh experimentu vhodné. Malta vyplnila téměř 90 % celkové objemu vzorku, což byl oproti předchozímu pokusům významný pokrok. Jedním z důvodů byla pravděpodobně větší mezerovitost v kamenivu a zároveň to, že bylo použito kamenivo lomové, tedy ostrohranné a tím došlo k lepšímu propojení malty a jednotlivých zrn než u kameniva oblého. Z tohoto důvodu a na základě vizuálního posouzení jednotlivých vzorků bylo rozhodnuto, že u následujících pokusů bude použito toto lomové kamenivo frakce 32/63 a bude zkoumána pouze vhodná maltová směs.

### 6.1.3 Výzkum maltových směsí

Po zvolení vhodného hrubého kameniva pro výzkum technologie dvoufázového betonu přišel na řadu výzkum maltové směsi, s cílem splnit zadané požadavky. V rámci mé bakalářské práce bylo otestováno celkem devět směsí, přičemž každá tato směs byla zkoumána z hlediska finálních fyzikálních a mechanických vlastností, tedy již na vyhotovených a vyzrálých vzorcích a zároveň, a to především, z hlediska průběhu betonáže a schopnosti prolít uložené kamenivo. V tomto případě se tedy posuzovaly vlastnosti čerstvé malty. Ve většině případů se jednalo o vizuální posouzení těchto atributů, přičemž u vybraných směsí byla provedena reologická zkouška stanovení konzistence čerstvé malty s pomocí střešacího stolku dle ČSN EN 1015-3 [22], viz Vyhodnocení čerstvých směsí. Posouzení čerstvé malty je vždy popsáno u jednotlivých směsí viz níže.



Obrázek 9 - střešací stůl s maltou

#### 6.1.3.1 Směs 1 – CEM I

Výzkum jednotlivých směsí při výzkumu technologie dvoufázového betonu započal první maltovou směsí označenou jako CEM I. Ta se skládá klasicky z hydraulického pojiva, v tomto případě z portlandského cementu (CEM I 42,5 R), kameniva frakce 0/4, vody a dvou přísad. Ze superplastifikátoru MasterGlenium SKY 504 a stabilizátoru Stabilan 300 F. Důvody použití těchto přísad jsou popsány výše (5.1.4), ve shrnutí z důvodu udržení nízkého vodního součinitele při vysoké tekutosti čerstvé malty a zároveň proti segregaci drobného kameniva ve směsi. Důvody použití portlandského cementu viz. 5.1.1. Poměrové složení směsi, viz tabulka č. 1, vycházelo z dodržení, pokud možno co nejnižšího vodního součinitele (poměr vody a cementu, který byl v tomto případě 0,36 a z předepsaných hodnot jednotlivými výrobci pro obě použité přísady).

Tabulka 1 - směs I (CEM I)

<i>Složky</i>	<i>Hmotnostní poměry</i>	<i>Hmotnostní podíl</i>
CEM I 42,5 R	1,000	41,84 %
voda	0,360	15,06 %
Stabilan 300 F	0,020	0,840 %
MasterGlenium Sky 504	0,010	0,420 %
kamenivo 0/4	1,000	41,84 %

Tato směs byla využita v první fázi pro posouzení vhodného hrubého kameniva, přičemž u finálně zvoleného kameniva frakce 32/63 bylo již možné posoudit tuto maltu z hlediska jejich vlastností na průběh betonáže a prolití uloženého kameniva. U betonáže jednotlivých vzorků bylo zřejmé, že použitá směs nebude příliš vhodná, neboť po nalití malty do plnicího potrubí směs vtékala do vzorku velice pomalu, a i po delším čekání se směs nedostala až ke stěnám ocelové formy. Bylo vidět, že i přes relativně vysokou tekutost malty díky užitým přísadám směs sama od sebe hrubým kamenivem vhodně neprotéká a skrz menší prostupy kamenivem nepronikala téměř vůbec. Tento výsledek byl jasně vidět po ztvrdnutí a odbednění vyhotovených vzorků. Jak je vidět (obr. 10), tak maltová směs skutečně nebyla schopna protéci gravitačně celým vzorkem a obzvláště v rozích a horní polovině se nachází odkrytá zrna kameniva. V tomto případě několik kamenů dokonce ze směsi vypadlo, neboť je směs neobalila ani z části.



Obrázek 10 - směs CEM I (vyhotovený vzorek)

Jelikož tedy tato směs nesplnila základní požadavek na dostatečné prolití uloženého kameniva, nadále se s touto směsí nepokračovalo.

### 6.1.3.2 Směs 2 – CEM III

Po vyzkoušení směsi číslo jedna, která obsahovala cement portlandský, jsem se rozhodl vyzkoušet cement více užívaný na vodních stavbách kvůli jeho vlastnostem z hlediska vlivu prostředí a hydratačního tepla. Jednalo se tedy o cement vysokopecní (viz 5.1.2), přesněji CEM III/B 32,5 L – LH/SR. Zároveň z důvodu snížení nákladů na výrobu maltové směsi je tato směs ochuzena o přísady, s tím, že bylo zvýšeno zastoupení vody (zvýšen vodní součinitel na hodnotu 0,45) z důvodu dostatečné tekutosti směsi a zároveň bylo zvýšeno i zastoupení obsahu drobného kameniva, přičemž poměrové složení této směsi je uvedeno v tabulce 2.



Tabulka 2 - směs 2 (CEM III)

<i>Složky</i>	<i>Hmotnostní poměry</i>	<i>Hmotnostní podíl</i>
CEM III/B 32,5	1,000	33,90 %
voda	0,450	15,25 %
kamenivo 0/4	1,500	50,85 %

V průběhu aplikace této směsi se však projevil problém s vyšším obsahem drobného kameniva a absence přísad. I přes vysokou tekutost směsi z důvodu vyššího vodního součinitele



Obrázek 11 - směs CEM III (vyhotovený vzorek)

tato směs téměř vůbec nebyla schopna do uloženého kameniva vtéci a již v průběhu betonáže bylo zřejmé, že směs vyplnila pouze prostor v okolí plnicího potrubí. Jedním z možných důvodů mohlo být to, že nižší množství cementu nezaručilo dostatečnou vazkost malty i přes její relativně vysokou tekutost. K tomu zároveň přispěla i absence superplastifikátoru. Po odbednění bylo zřejmé, že směs skutečně nedokázala protéci v dostatečné míře uloženým kamenivem a zároveň docházelo k drolení této ztvrdlé malty, a to po pouhém přejetí prstem.

Z těchto důvodů byla z mé práce vyřazena.

### 6.1.3.3 Směs 3 – CEM III + superplastifikátor

Po neúspěchu se směsí CEM III, jsem se rozhodl vyzkoušet obdobné složení (opět cement vysokopeční), avšak tentokrát s použitím plastifikátoru MasterGlenium SKY 504. Zároveň jsem u této směsi chtěl vyzkoušet ještě větší zastoupení drobného kameniva oproti cementu (zde v poměru 4:1) než v předchozí směsi, abych prokázal, že obsah cementu má na schopnost malty protéci uloženým kamenivem velký vliv a ani vyšší vodní součinitel, v tomto případě je roven 0,9, a užití superplastifikátoru schopnosti protéci nepomůže. Celkové složení této směsi je uvedeno v tabulce 3 níže.

Tabulka 3 - směs 3 (CEM III + superplastifikátor)

<i>Složky</i>	<i>Hmotnostní poměry</i>	<i>Hmotnostní podíl</i>
CEM III/B 32,5	1,000	16,86 %
voda	0,900	15,18 %
MasterGlenium SKY 504	0,030	0,510 %
kamenivo 0/4	4,000	67,45 %

Již při promíchávání všech složek v míchačce betonu bylo od pohledu patrné, že tato směs připomíná spíše tekutý písek než čerstvou maltu. To se projevilo již při vlévání směsi do plnicího potrubí, přičemž ta nechtěla ani tímto potrubím řádně protéci, natož aby protekla uloženým kamenivem. Zároveň docházelo k velkému krvácení betonu (odlučování vody od pevných částic) a plnění bylo čím dál tím obtížnější.

Po odbednění vzorku odpadlo téměř 20 % kameniva, které nebylo vůbec maltovou směsí dotčeno, přičemž prolito bylo pouze několik kamenů v okolí plnicího potrubí. Pouze na povrchu se nacházela celistvá vrstva, ta však byla prolita shora, nikoliv skrz potrubí. Stejně jako u předchozí směsi se ztvrdlá maltová směs při dotyku drolila, což potvrzovala i barva malty, která byla výrazně do oranžova (velký obsah drobného kameniva – písku). Bylo tedy prokázáno, že bez vyváženého poměru



Obrázek 12 - směs CEM III + superplastifikátor (vyhotovený vzorek)

drobného kameniva a cementu nebude mít malta dostatečné vlastnosti pro kvalitní prolití uloženého kameniva, a to ani při vysokém vodním součiniteli a s použitím plastifikátoru. Stejně jako předchozí směsi, byla i tato tedy vyhodnocena jako nevhodná.

U této směsi byla stejně jako u většiny ostatních provedena reologická zkouška stanovení konzistence čerstvé malty. I přes velice špatné vlastnosti z hlediska pronikání této směsi kamenivem, dosahovala tato směs největších rozlivů a nebylo nutné ani využívat střešací stolek. Po zvednutí kovového kužele se směs ihned rozlila po celé zkušební ploše a rovnou tak dosáhla maximální možné zkoušené hodnoty rozlivu, tedy přes 280 mm. Bylo tedy zřejmé, že na schopnost prolévání kameniva nemá hodnota rozlivu, tedy tekutost, žádný vliv.

#### 6.1.3.4 Směs 4 – CEM III + přísady

Po neúspěchu u předchozích směsí jsem se rozhodl opět se vrátit ke složkám a poměrům z první směsi, která zatím byla nejúspěšnější a nejnadějnější, avšak s tím rozdílem, že místo portlandského cementu je v této směsi použit cement vysokopecní, tak jako v případě směsí číslo 1 a 2. Jedná se tedy o cement CEM III/B 32,5 L – LH/SR. Tato směs tedy opět obsahuje obě přísady, tedy superplastifikátor MasterGlenium SKY 504 a stabilizátor Stabilan 300 F. Vodní součinitel má v tomto případě tedy zase hodnotu 0,36, což je v porovnání se směsí číslo 3 o dost nižší hodnota, avšak díky poměru 1:1 mezi cementem a drobným kamenivem byla tato hodnota stanovena jako optimální. Složení této směsi je opět uvedeno v tabulce 4 níže.

Tabulka 4 - směs 4 (CEM III + přísady)

Složky	Hmotnostní poměry	Hmotnostní podíl
CEM III/B 32,5	1,000	41,84 %
voda	0,360	15,06 %
Stabilan 300 F	0,020	0,840 %
MasterGlenium Sky 504	0,010	0,420 %
kamenivo 0/4	1,000	41,84 %

Dle prvního vizuální posouzení směsi již v průběhu míchání bylo možné pozorovat lepší rozliv malty než při použití cementu portlandského. Totéž se potvrdilo i u samotné betonáže, která probíhala v porovnání s předchozími směsmi velice rychle a směs ochotně vtékala do plnicího potrubí. U prvního vyhotovené vzorku však nebyla správně odhadnuta dostatečná doba pro svévolné prolití vzorku a plnicí potrubí bylo vytaženo příliš rychle. To mělo za následek nedokonalé prolití okrajů a rohů vzorku, viz



Obrázek 14 - směs CEM III + přísady (finální vyhotovený vzorek)



Obrázek 13 - směs CEM III + přísady (1. vyhotovený vzorek)

obr. 14. I v tomto případě však byl vzorek téměř dokonale prolit a žádný kámen nebyl volný. V ostatních případech bylo již ponecháno plnicí potrubí ve vzorku déle, bylo tedy pomaleji ze vzorku vysunováno, a vždy se důsledně počkalo, aby měla maltová směs schopnost dotéci i do rohů bednění. Tento postup přinesl své ovoce a po odbednění vzorků bylo po vizuální kontrole patrné, že vzorek, přesněji tedy uložené kamenivo, bylo prolito ze 100 %. Navenek se jednalo o monolitickou betonovou kostku, bez možnosti odlišení od vzorku vybetonovaného tradiční metodou.

Po těchto zjištěních byla tato směs určena jako vhodná pro využití u technologie dvoufázového betonu z hlediska vlastností čerstvé malty na průběh betonáže a schopnost prolití vzorku a z tohoto důvodu byla i vybrána pro vyhotovení reálného vzorku, viz 5.3.4.7.

#### 6.1.3.5 Směs 5 – Sorfix

Tato směs se skládá ze stejných poměrů a přísad, jako v předchozím případě u směsi č. 4 CEM III + přísady, avšak liší se v použitém hydraulickém pojivu. V tomto případě je jako pojivo použit Sorfix, z důvodů uvedených výše (viz 5.1.3). V průběhu testování této směsi se

však projevila savost Sorfixu z hlediska spotřeby vody a z tohoto důvodu bylo zapotřebí nakonec poupravit procentuální zastoupení vody ve směsi, tedy navýšit její množství, neboť při použití původního množství malty již od pohledu nebyla ideálně tekutá. Z tohoto důvodu nakonec byly testovány dvě směsi s použitím Sorfixu s rozdílným vodním součinitelem, z důvodu nalezení ideálního poměru vody k ostatním složkám. Jedna z nich je tedy dle původních poměrů, druhá se zvýšeným zastoupením vody.

#### 6.1.3.5.1 Sorfix – směs 5A

První zkoumaná směs s využitím Sorfixu kopíruje stejné poměry jednotlivých sloučenin jako v předchozím případě, viz tabulka 5. Vodní součinitel je zde tedy opět 0,36.

Tabulka 5 - směs 5A (Sorfix)

Složky	Hmotnostní poměry	Hmotnostní podíl
SORFIX	1,000	41,84 %
voda	0,360	15,06 %
Stabilan 300 F	0,020	0,840 %
MasterGlenium Sky 504	0,010	0,420 %
kamenivo 0/4	1,000	41,84 %

V průběhu betonáží se tato směs zdála být obdobná jako v případě směsi č. 4, avšak v průběhu bylo potřeba maltu pravidelně promíchávat, neboť poměrně rychle docházelo



Obrázek 16 - směs Sorfix „A“  
(vyhotovený vzorek)

k jejímu tuhnutí a tím se zhoršovala i zpracovatelnost a plnění probíhalo pomaleji a pomaleji. Po vytvrdnutí a odbednění vyhotovených vzorků byly jasně vidět neprolité prostory na okrajích vzorku. Po pár dnech se však na vyhotovených vzorcích začaly vytvářet smršťovací trhliny (trhliny vzniklé smršťováním, tedy zmenšováním objemu, maltové směsi v průběhu tuhnutí a tvrdnutí). Z tohoto důvodu jsem se u příští zkušební sady rozhodl po vytužení vzorků o jejich uložení do vodní lázně. Po pravidelné kontrole těchto těles však bylo jasné, že ve vodním prostředí maltová směs, přesněji tedy Sorfix, nebyla schopna vytvrdnout a vzorky se tedy začaly rozpadat. Až po jejich vyjmutí z vody a cca 10 dnech v určité míře malta

vyhotovených vzorků byly jasně vidět neprolité prostory na okrajích vzorku. Po pár dnech se však na vyhotovených vzorcích začaly vytvářet smršťovací trhliny (trhliny vzniklé smršťováním, tedy zmenšováním objemu, maltové směsi v průběhu tuhnutí a tvrdnutí).



Obrázek 15 - směs Sorfix „A“  
(vyhotovený vzorek po vodní lázni)

vytvrdla. Jednotlivá zrna hrubého kameniva a maltová směs však již nebyla spojena a tyto vzorky se tedy i nadále rozpadaly. Tento postup boje proti smršťovacím trhlinám se tedy ukázal jako nevhodný. U další sady zkušebních těles se opět projeví nevhodné vlastnosti této směsi z hlediska nedokonalého prolití celého uloženého hrubého kameniva a z tohoto důvodu bylo od této směsi v mé práci upuštěno.

#### 6.1.3.5.2 Sorfix – směs 5B

Z důvodu nedostatečné tekutosti čerstvé malty při použití předchozí směsi 5A, která měla za následek nedostatečné prolití uloženého kameniva, jsem se rozhodl vyzkoušet navýšení obsahu vody u této směsi, čímž se zvýšil i vodní součinitel, který je v tomto případě roven hodnotě 0,48. Složení této směsi viz tabulka 6 níže.

Tabulka 6 - směs 5B (Sorfix)

Složky	Hmotnostní poměry	Hmotnostní podíl
SORFIX	1,000	39,81 %
voda	0,482	19,19 %
Stabilan 300 F	0,020	0,800 %
MasterGlenium Sky 504	0,010	0,400 %
kamenivo 0/4	1,000	39,81 %

V průběhu míchání bylo zřejmé, že směs je skutečně tekutější a totéž se projevilo i při samotné betonáži v průběhu vlévání malty do plnicího potrubí. Tento proces probíhal zcela hladce a jednotlivé zkušební vzorky byly prolity velice rychle. Problém se projevil až po odbednění vzorků. Na první pohled byla tělesa téměř ideálně prolita maltovou směsí a ve většině případů se vyskytovaly pouze nepatrné kaverny. Opět se zde však po několika dnech začaly vyskytovat smršťovací trhliny. Původně jsem chtěl tento problém vyřešit uložením kostek po jejich odbednění nikoliv do vodní lázně, ale pouze do vlhkého prostředí. Tuto variantu



Obrázek 17 - směs Sorfix „B“ (vyhotovený vzorek)

jsem však opustil, neboť i po několika dnech byla maltová směs stále relativně měkká a nebylo možné se vzorky bezpečně manipulovat. K vytvrdnutí došlo až přibližně po dvou týdnech, a to v suchém prostředí. Možným důvodem mohl být zvýšený obsah vody, který má na výslednou pevnost vliv [23]. Z těchto důvodů bylo užití samotné Sorfixu vyhodnoceno jako nevhodné a od této směsi jsem v mé práci upustil.

### 6.1.3.6 Směs 6 – Sorfix/CEM I

Poslední ze zkoumaných směsí v mé práci je směs opět se stejnými poměry a složením jako v předchozích případech, avšak opět s upraveným hydraulickým pojivem, a i s proměnným vodním součinitelem. Jako v přechodím případě je zde využit materiál Sorfix. Ten se však jako jediné užitě pojivo příliš neosvědčil, viz výše u směsi 5, a z tohoto důvodu je u této směsi použita kombinace tohoto materiálu s klasickým portlandským cementem (CEM I 42,5 R) v poměru 1:1, s cílem dosažení rychlejšího nárůstu pevnosti, jeho pevnosti a k potlačení smršťovacích trhlin. Výchozí poměr jednotlivých složek zde byl po odzkoušení první směsi nahrazen novým, se zvýšeným procentuálním zastoupením vody, a to z důvodu velmi nízké tekutosti. Obsah vody byl následně ještě dvakrát navýšen a vznikly tak tři směsi s využitím kombinace Sorfixu a portlandského cementu s proměnným vodním součinitelem.

#### 6.1.3.6.1 Sorfix/CEM I – směs 6A

Jak jsem psal výše, tato směs využívá kombinace materiálu Sorfix a portlandského cementu, a to v poměru 1:1. Původní poměr jednotlivých složek, vycházející z předchozích směsí (například směs 4) však nebyl dostatečný a bylo zapotřebí upravit poměr vody, přesněji tedy jej navýšit, aby směs byla dostatečně tekutá pro kvalitní prolití uloženého kameniva. Ve výsledku má tedy tato směs vodní součinitel 0,39. Složení této směsi viz tabulka 7 níže.

Tabulka 7 - směs 6A (Sorfix/CEM I)

Složky	Hmotnostní poměry	Hmotnostní podíl
SORFIX	0,500	20,69 %
CEM I 42,5 R	0,500	20,69 %
voda	0,387	16,01 %
Stabilan 300 F	0,020	0,830 %
MasterGlenium Sky 504	0,010	0,410 %
kamenivo 0/4	1,000	41,37 %

V průběhu betonáže čerstvá malta připomínala svou konzistencí vzorky ze směsi 5B Sorfix. U první kostky čerstvá malta relativně dobře a rychle protékala uloženým kamenivem a vzorek byl brzy hotov. Bohužel u druhého vzorku



Obrázek 18 - směs Sorfix/CEM I „A“ (vyhotovené vzorky dle průběhu betonáže zleva)

se projevila velká nevýhoda této směsi, a to rychlé tuhnutí. Postupem betonáže byla směs i přes pravidelné promíchávání stále hustější a hustější a u posledních zhotovovaných vzorků již jen velice špatně protékala plnicím potrubím. Vliv tuhnutí směsi na průběh betonáže a vyhotovené vzorky je vidět na obrázku č. 18. Na odbedněných vzorcích je vidět, že u posledního vzorku směs skutečně vyplnila směs velice špatně, avšak u toho prvního je vzorek až na drobné kaverny velice dobře maltou vyplněn.

Možným řešením v tomto případě by bylo využití retardéru, tedy přísady do betonu zpomalující proces tuhnutí čerstvé směsi, který by prodloužil možnost využití této směsi. Jelikož však ani první vzorek nebyl zcela perfektní, byla zvolena metoda opětovného zvýšení vodního součinitele.

#### 6.1.3.6.2 Sorfix/CEM I – směs 6B

V rámci mého výzkumu tedy následovalo zvýšení obsahu vody ve směsi využívající kombinace Sorfixu a portlandského cementu. Tato směs s označením 6B tedy má vodní součinitel 0,40, přičemž procentuální zastoupení vody ve směsi se zvýšilo o půl procenta, viz tabulka 8 níže.

Tabulka 8 - směs 6B (Sorfix/CEM I)

Složky	Hmotnostní poměry	Hmotnostní podíl
SORFIX	0,500	20,58 %
CEM I 42,5 R	0,500	20,58 %
voda	0,399	16,43 %
Stabilan 300 F	0,020	0,820 %
MasterGlenium Sky 504	0,010	0,410 %
kamenivo 0/4	1,000	41,17 %

V průběhu betonáže maltová směs prokazatelně lépe protékala připravenými vzorky než u směsi předchozí a celý průběh byl tedy rychlejší. I v tomto případě se však projevilo rychlé



Obrázek 19 - směs Sorfix/CEM I "B" (poslední a první vyhotovený vzorek dle betonáže)

tuhnutí malty a betonáže posledních vzorků opět trvaly déle a po jejich odbednění bylo zřetelně vidět nedokonalé prolití uloženého kameniva. U této směsi však první vyhotovené vzorky byly téměř perfektní a při pravidelném míchání maltové směsi v průběhu betonáže byla tekutost malty téměř konzistentní a betonáž tak mohla probíhat

děle. Opět by zde byla varianta užití retardéru, avšak průměrný vzorek této směsi však stále nebyl zcela ideální. Přišla tedy na řadu poslední směs.

#### 6.1.3.6.3 Sorfix/CEM I – směs 6C

Poslední ze zkoumaných směsí pro využití v technologii dvoufázového betonu využívajících kombinaci Sorfixu a portlandského cementu, a zároveň poslední testovaná směs vůbec nese označení 6C a má největší procentuální zastoupení vody z posledních tří směsí. Voda je v této směsi zastoupena z téměř 17 %, díky čemuž je její vodní součinitel roven 0,42. Cílem takto vysokého zastoupení vody jsou lepší reologické vlastnosti čerstvé malty z hlediska schopnosti vyplnění všech mezer v uloženém kamenivu. Poměry jednotlivých složek v tomto případě viz tabulka 9 níže.

Tabulka 9 - směs 6C (Sorfix/CEM I)

Složky	Hmotnostní poměry	Hmotnostní podíl
SORFIX	0,500	20,45 %
CEM I 42,5 R	0,500	20,45 %
voda	0,415	16,97 %
Stabilan 300 F	0,020	0,820 %
MasterGlenium Sky 504	0,010	0,410 %
kamenivo 0/4	1,000	40,90 %

Již na první pohled po smíchání všech složek bylo jasné, že směs je skutečně velmi tekutá a totéž se potvrdilo i v průběhu samotné betonáže. Jednalo se pravděpodobně o nejrychlejší prolévání vzorků v porovnání se všemi předchozími vzorky. Po naplnění plnicího potrubí maltová směs ihned zmizela v uloženém kamenivu a celý vzorek byl během několika chviliek vyplněn. Směs dokonce mnohem pomaleji tuhla a betonáž téměř všech zkušebních těles se obešla bez průběžného promíchávání čerstvé malty.

Po odbednění všech vzorků bylo na první pohled vidět dokonalé prolití uloženého hrubého kameniva a finální vzorky bylo nemožné rozeznat od zkušebních kostek zhotovovaných

tradičním způsobem.

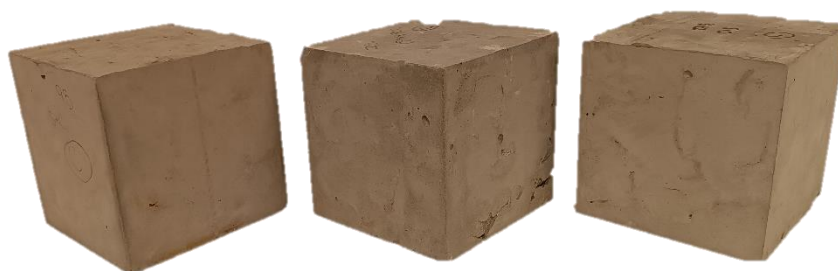
Pouze v jednom

případě byly vidět

nepatrné kaverny, ale

opět se jednalo

o vzorek z konce



Obrázek 20 - směs Sorfix/CEM I "C" (vyhotovené vzorky)



betonáže, po delší pauze mezi proléváním vzorků z důvodu otestování doby zpracovatelnosti. Po vizuálním posouzení všech vyhotovených a odbedněných zkušebních těles bylo zřejmé, že se jedná o směs, z hlediska průběhu betonáže a prolití uloženého kameniva, zcela vhodnou pro provádění technologie dvoufázového betonu.

#### 6.1.4 Reálný vzorek – směs 4 (CEM III + přísady)

Při reálném užití v praxi se mohou laboratorní výsledky na zkušebních vzorcích zcela diametrálně lišit. O to víc v případě užití technologie dvoufázového betonu, u které je nejdůležitějším prvkem důkladné prolití uloženého kameniva. Obtížnost technologického procesu s velikostí vytvářeného vzorku roste a pro co nejreálnější přiblížení skutečnému provádění betonáže v praxi bylo na místě vytvořit co možná největší vzorek, který se v laboratorních podmínkách dá vytvořit. Omezujícím faktorem v našem případě byla váha samotného vzorku. Ta musela být taková, aby bylo možné se vzorkem manipulovat i v uzavřených prostorách a aby nebyla překonána únosnost podlah v laboratořích, ideálně tedy vzorek do 1000 kg. Dále jsme se museli zaměřit na způsob testování tohoto vzorku. Kvůli jeho předpokládané velikosti jsem se obrátil na katedru Vodohospodářského experimentálního centra (dále jen VEC), jejíž laboratoře jsou pro takto objemný vzorek dostatečně kapacitní, a navíc mají k dispozici prostředky pro testování vzorku na působení vody.

Z těchto důvodů bylo nakonec rozhodnuto, že vzorek bude mít tvar desky o čtvercové základně o hraně délky 1 m a tloušťce desky 20 cm s předpokládanou hmotností 450 kg. Tloušťka byla zvolena na základě zkušeností z předchozích zkušebních vzorků, neboť tento



Obrázek 21 - reálný vzorek (postupné ukládání kameniva)

rozměr bylo možné ideálně vyplnit cementovou směsí a takto široké vzorky vykazovaly dobré fyzikální vlastnosti.

Nejprve bylo vytvořeno bednění pro tento vzorek. Z důvodu návaznosti na plánované zkoušení poskytlo VEC vlastní bednění požadovaných rozměrů z desek užívaných při vodohospodářských experimentech. Každá měla rozměr 1 × 1 m, tedy zcela vyhovující a zároveň vzorek vyrobený v tomto bednění zajišťoval vyšší úspěšnost při budoucím utěsnění proti unikání vody v rámci testování.

Dalším krokem byla příprava před samotnou betonáží, tedy připravení plicních trubek

a uložení kameniva do bednění. Plnicí potrubí bylo stejné jako u předchozích prvků, tedy materiál PP o DN 32 mm. Celkem bylo na vzorku použito osm těchto trubek, uložených na osu desky, přičemž dvě byly uloženy jako krajní, tedy přiléhaly k bočnicím a plnily zde význam dokonalého prolití okraje vzorku z důvodu ideálního těsnění při pozdějším testování. Zbytek trubek byl uložen rovnoměrně po délce vzorku. Délka každé trubky byla 110 cm, byly tedy dostatečně dlouhé, aby se dotýkaly dna a zároveň jejich horní konec vyčníval nad horní hranu vzorku.

Po jejich uložení přišlo na řadu uložení kamenné výplně do bednění. Stejně jako u předchozích vzorků byl použit lomový kámen 32/63, tentokrát však z kamenolomu Zbraslav. Před samotnou aplikací bylo kamenivo omyto vodou. Poté bylo vsypáno do bednění, tak aby nedošlo k posunu plnicích trubek. I zde nebylo kamenivo nikterak hutněno, pouze bylo volně uloženo. Vrstva kameniva sahala v průměru 2 cm pod horní okraj bednění, a to z důvodu možnosti vytvoření dokonale hladkého povrchu, opět kvůli budoucí vodotěsnosti. Ve vzorku tedy bylo uloženo přibližně 280 kg kameniva.

Následovala příprava maltové směsi. V tomto případě byla zvolena směs č. 4 a obsahovala tedy cement vysokopecní CEM III/B 32,5 L – LH/SR. Předpokládané množství jednotlivých složek vycházelo ze zkušeností s předchozími vzorky, tedy s procentuálním obsahem maltové směsi ve vzorku přibližně 38 %. V tomto případě se jednalo přibližně o 250 litrů. Hmotnost cementu u tohoto vzorku tedy činila přibližně 72 kg. Postup betonáže byl rozdělen na 3 po sobě jdoucí etapy, z důvodu objemových možností užívané míchačky čerstvé malty, přičemž v každé z nich byla namíchána část maltové směsi. Po navážení všech jednotlivých složek (viz tabulka 4) byla namíchána první várka a přešlo se k samotné betonáži.

Technologický postup betonáže byl obdobný jako u předchozích vzorků. Připravená maltová směs byla postupně přes pomocný trychtýř vlévána do jednotlivých plnicích trubek. Po jejich naplnění byly vždy postupně o několik centimetrů povytaženy směrem vzhůru z bednění a celý proces se opakoval, dokud nebyly všechny plnicí trubky zcela vytaženy ze vzorku. Vrstva cementu na vršku vzorku byla následně vyhlazena



Obrázek 22 - reálný vzorek (připravený vzorek k betonáži)

kvůli lepšímu budoucímu utěsnění. Betonáž tedy opět probíhala bez jakéhokoliv hutnění či vibrování vlévané maltové směsi s cílem samovolného prolití vzorku.

V průběhu betonáže se však objevilo několik problémů. Nejzásadnějším z nich byla chybná várka číslo dvě, která nedosahovala dostatečného rozlití/tekutosti a měla výrazně horší vlastnosti, které se projevovaly při lití směsi do plnicích trubek. Toto se posléze projevilo na kvalitě vzorku, viz níže. Možnou příčinou mohlo být nedostatečně dlouhé promíchávání směsi, které je důležité pro aktivaci plastifikátoru, nebo nízká pokojová teplota, která má taktéž vliv na aktivaci přísad. Dalším problémem byl lidský faktor, neboť samotná betonáž trvala přes tři hodiny a v průběhu aplikace poslední várky již doprovázela betonáž nízká morálka zúčastněných.

Po 4 dnech byl vzorek opatrně odbedněn. Ihned po odbednění byl patrný vliv druhé várky maltové směsi. Přibližně v polovině vzorku byla výrazná kaverina, avšak neodpadávaly

z ní jednotlivé kameny a skrz vzorek nebylo vidět. Kaverina měla rozměry přibližně 20 x 30 cm a v jejím okolí se nacházelo několik dalších, avšak výrazně menších. Spodní třetina, ta, která byla vylita první várkou malty, však dosahovala velmi dobrých výsledků. Již na první pohled zde maltová směs vyplnila všechny



Obrázek 23 - reálný vzorek (deska na ocelovém podstavci s viditelnými kavernami)

okem viditelné prostory a deska zde byla ideálně zmonolitněná. V horní třetině se však projevila lidský faktor zmíněný výše a tato vrstva opět vykazovala menší vady. Takto zhotovený vzorek byl tedy položen do horizontální polohy a byl převezen do laboratoře VEC. Tam byl pomocí strojního jeřábu přenesen na připravený ocelový podstavec, který desku podpíral po jejím okraji a zároveň pomocí dvou úhelníků umístěných úhlopříčně pod deskou i v jejím středu. Kolem vzorku byly následně umístěny čtyři desky, které byly spojeny šrouby a maticemi a tím vytvořily nádrž, jejíž stěny tvořily tyto desky a dno zde tvořil připravený vzorek. Kvůli lepšímu utěsnění byl prostor styku mezi všemi deskami a vzorkem vyplněn sanitárním silikonem a zároveň byly nade dnem umístěny křížem dvě závitové tyče, které po dotažení utěsnily, přimáčkly, desky ke vzorku. Takto byl vzorek připraven k prvnímu zkušebnímu naplnění vodou.

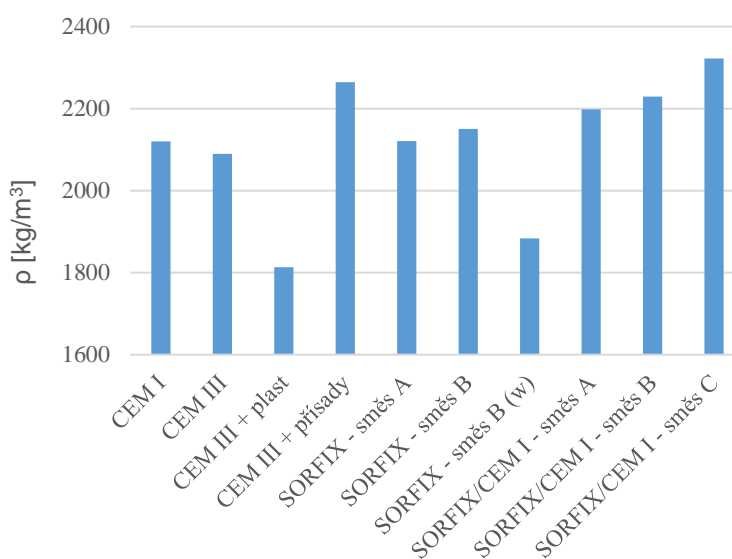
## 7 Vlastní laboratorní výzkum – zkoušky ztvrdlého betonu

Po vyhodnocení všech použitých maltových směsí přišly na řadu doplňující zkoušky technologie dvoufázového betonu, a to konkrétně zkoušky ztvrdlého betonu s cílem zjistit jeho fyzikální vlastnosti. Jednalo se o zkoušky k zjištění objemové hmotnosti, krychelné pevnosti v tlaku po 28 dnech, odolnost cementového betonu proti působení vody a průsak tlakovou vodou. V rámci mého výzkumu byly provedeny i dvě inovativní zkoušky, a to rozříznutí vyhotoveného vzorku a zkouška vodonepropustnosti na reálném vzorku. V rámci jednotlivých zkoušek byla jednotlivá zkušební tělesa rozdělena dle použité maltové směsi, přičemž směs Sorfix B, u níž byla část vzorků ponořena při tvrdnutí do vody (viz 6.1.3.5.2), byla rozdělena na klasické vzorky (zn. SORFIX – směs B) a vzorky uložené do vodní lázně (zn. SORFIX – směs B (w)).

### 7.1.1 Objemová hmotnost

Nejjednodušší měřenou fyzikální veličinou v rámci mého výzkumu byla objemová hmotnost. Ta byla zjišťována u všech vyhotovených vzorků, a to změřením jejich objemu  $V$  (klasická metoda přenásobením rozměrů zjištěných posuvným mikrometrem) a jejich hmotnosti  $m$ . Objemovou hmotnost jsem poté dopočítal dle vzorce  $m \div V$ . Výsledná hodnota se odvíjela především od procentuálního vyplnění

Graf 1 - průměrná objemová hmotnost



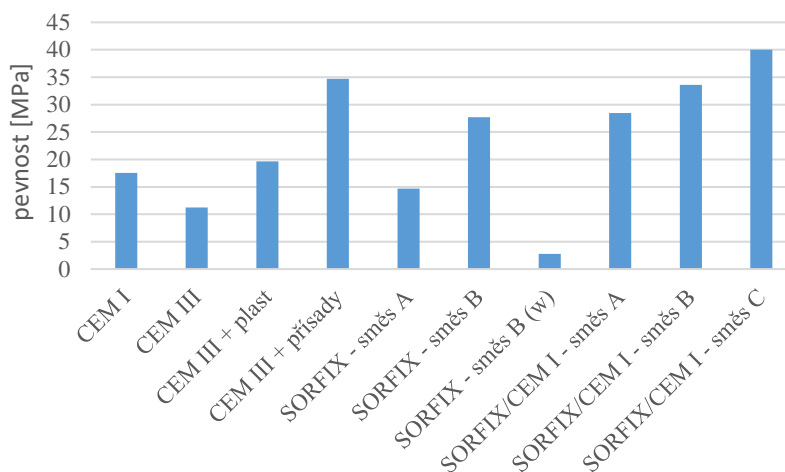
uloženého kameniva, což dokazují i průměrné hodnoty u jednotlivých použitých směsí viz graf 1. Z té je patrné, že nejvyšších hodnot dosahují dvě vítězné směsi, a to CEM III + přísady, přibližně 2 260 kg/m<sup>3</sup>, a SORFIX/CEM I ,C', přibližně 2 320 kg/m<sup>3</sup>. Objemová hmotnost obyčejného betonu se v normálním případě pohybuje v rozmezí 2 000 až 2 500 kg/m<sup>3</sup>, při použití technologie dvoufázového betonu se vyhotovený vzorek tedy může s prostým betonem rovnat, což je při jeho plánovaném užívání jakožto zatěžovacího prvku důležité.

### 7.1.2 Pevnost v tlaku

Po zkouškách čerstvých maltových směsí byla nejdůležitější zkouškou pevnost v tlaku, a to konkrétně krychlená pevnost v tlaku po 28 dnech, a to dle ČSN EN 12390-3 [24]. Tato zkouška byla prováděna na vyhotovených zkušebních tělesech o rozměrech  $200 \times 200 \times 200$  mm.

Graf 2 - průměrná krychlená pevnost

Před samotným testováním byly všechny vzorky změřeny a zváženy (viz 7.1.1). Po zmáčknutí všech kostek a přepočtení tlačené plochy a užití síly byly vypočteny a zprůměrovány výsledné pevnosti, viz graf 2. Opět, stejně jako



v případě objemové hmotnosti, je i zde patrný vliv procentuálního prolití uloženého kameniva maltovou směsí, a tedy nejvyšších hodnot dosahují vzorky ze směsí CEM III + přísady (34,7 MPa) a Sorfix/CEM I ,C' (40,0 MPa). Naopak nejhůře dopadla tělesa ze směsi Sorfix B vložené do vodní lázně, u kterých průměrná pevnost dosahuje hodnoty 2,7 MPa.

### 7.1.3 Odolnost proti působení vody

Další důležitou zkouškou bylo stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek dle ČSN 73 1326 [25]. Pro tuto zkoušku byla vybrána tělesa vyhotovená ze směsí, které jsem vyhodnotil jakožto nejvhodnější (CEM III + přísady a Sorfix/CEM I ,C'). Podstatou této zkoušky je vystavení povrchu zkušební tělesa zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům při současném působení chemické rozmrazovací látky, v tomto případě 3% roztok NaCl. V rámci jednoho cyklu, který trvá 45 až 50 minut, se změnila teplota působící na povrch z  $+20$  °C na  $-15$  °C, přičemž daná teplota se udržuje vždy minimálně 15 minut. V mém případě byla zkušební tělesa vystavena celkem sto cyklům, přičemž po každých 25 cyklech byla tělesa ze zkušební klimakomory vyjmuta a byly vždy smyty proudem vody uvolněné částice ze zkušební povrchu do připravené Petriho misky a po vyschnutí byly zváženy.

Na konci měření byla vyhodnocena celková hmotnost uvolněných částic u jednotlivých vzorků a přepočtena na hmotnost odpadu na jednotku plochy  $\rho_a$ , viz tabulka 10.

U všech zkušebních těles byla tato vypočtená hodnota menší než  $50 \text{ g/m}^2$ , což odpovídá stupni porušení 1 – nenarušený. Jedná se o nejmenší z celkem pěti stupňů porušení, tedy označující vzorek jako nejvíce odolný.

Tabulka 10 - výpočet odpadu na jednotku plochy

směs	hrana zkušebního tělesa [mm]	suma odpadu [g]	plocha A [ $\text{m}^2$ ]	$\rho_a$ [ $\text{g/m}^2$ ]
SORFIX/CEM I – směs C	150	0,30	0,0225	<b>13,3</b>
SORFIX/CEM I – směs C	200	0,20	0,0400	<b>5,00</b>
CEM III + přísady	200	1,50	0,0400	<b>37,5</b>
SORFIX/CEM I – směs B	150	1,00	0,0225	<b>44,4</b>

#### 7.1.4 Průsak tlakovou vodou

V rámci výzkumu dvoufázového betonu jsem se rozhodl ověřit dokonalé prolití všech mezer v hrubém kamenivu a schopnost propojení tohoto kameniva a maltové směsi za pomoci použití normované zkoušky ČSN EN 12390-8 [26]. Ta se normálně využívá ke zjištění maximálního průsaku vodou, při níž se nechává působit tlaková voda na povrch ztvrdlého betonu po 28 dnech. Tlak v tomto případě činí  $500 (\pm 50) \text{ kPa}$  po dobu  $72 (\pm 2)$  hodin. Poté se zkušební vzorek zlomí přibližně v polovině kolmo k povrchu, na který působil vodní tlak, a změří se maximální hloubka průsaku. V tomto případě však byl cíl zkoušky jiný, a to posoudit, zda se voda v tělese bude šířit především po povrchu hrubého kameniva a vytvářet tak průsakové cesty, či se bude chovat jako u tradičního betonu a bude se šířit klasicky, tedy průsaková čára bude mít tvar paraboly a voda se bude šířit rovnoměrně po celé ploše vzorce. K této zkoušce bylo vybráno zkušební těleso vyhotovené ze směsi SORFIX/CEM I ,C'.

Po uplynutí požadované doby za působení tlakové vody bylo zkušební těleso vyjmuta ze zkušebního stroje a pomocí hydraulického lisu zlomeno v půlce a po dostatečném oschnutí lomové plochy byla označena hranice průsaku. Z ní bylo jasně patrné, že voda nesledovala primárně stykové plochy mezi zrny kameniva, ale postupovala tělesem rovnoměrně a průsaková čára skutečně připomínala svým tvarem parabolu.



Obrázek 24 - zkušební těleso s čarou průsaku

### 7.1.5 Řez vzorkem

Při posuzování jednotlivých maltových směsí se postupovalo pouze vizuální kontrolou, která byla schopna posoudit pouze prolití na povrchu vyhotovených vzorků. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl, že jeden vzorek, konkrétně tedy vzorek vyhotovený s použitím maltové směsi Sorfix/CEM I ,C', bude rozříznut pro prozkoumání kvality prolití vzorku uvnitř. Tento řez byl proveden na kamenické pile a vzorek zde byl nejprve rozpuhlen a poté byla rozpuhlená ještě jedna ze vzniklých polovin.



Z řezů bylo patrné (viz obr. 25), že i uvnitř maltová směs dokonale vyplnila uložené kamenivo, a to nejen „velké“ kaverny mezi kamenivem, ale i menší prostory. Přeříznutý vzorek tedy skutečně připomínal beton vyhotovený tradiční metodou.

Obrázek 25 - řez vzorkem

### 7.1.6 Zkouška vodonepropustnosti – směs 4 reálný vzorek

Z důvodu způsobu provádění technologie dvoufázového betonu panovaly obavy z nedokonalého prolití všech mezer v uloženém kamenivu při výrobě větších vzorků, popřípadě ze vzniku velkých trhlin, které by měly za následek prakticky volný pohyb vody skrz tento materiál. Cílem tohoto experimentu tedy bylo otestovat vyhotovenou desku (viz 6.1.4), tedy tento technologický postup na vodonepropustnost. Kvůli rozměrům desky, zvolených z důvodu otestování směsi a technologického postupu v reálnějších podmínkách a rozměrech, však nebylo možné použít normovanou zkoušku dle ČSN EN 12390-8, která se tradičně provádí na vzorku o velikosti 150 × 150 × 150 mm, a z tohoto důvodu byla vybrána zcela inovativní zkouška za pomoci katedry



Obrázek 26 - reálný vzorek (pohled na připravenou zkušební nádrž)

K250 Vodohospodářské experimentální centrum. Principem tohoto experimentu bylo vystavit plochu desky kolmému tlaku vodního sloupce o různých velikostech. V úvahu přicházely dvě varianty tohoto experimentu, a to s deskou v pozici vertikální či horizontální. Tyto dvě varianty se od sebe lišily způsobem rozložení tlaku vodního sloupce po desce. Zatímco v případě uložení desky svisle, by zatěžovací obrazec působící na desku byl ve tvaru pravoúhlého trojúhelníku,

tedy u spodní hrany desky by byl tlak nejvyšší a s klesající hloubkou by tlak postupně klesal až k hodnotě nula, tak při uložení vzorku vodorovně by zatěžovací obrazec měl tvar obdélníku a na každou část desky by tak působila síla o stejné velikosti a vzorek by byl tedy rovnoměrně zatížen. Protože cílem experimentu bylo zjistit nepropustnost po celé ploše desky za co možná nejvyššího tlaku, byla zvolena druhá varianta z důvodu rovnoměrného rozložení sil, neboť využití maximálního možného tlaku vodního sloupce pouze u spodního okraje desky by bylo značně nevýhodné. Z důvodu možnosti využití již vyhotovených desek užívaných pro hydrotechnické a hydraulické experimenty, bylo nejvhodnější experiment provést pro dvě výšky vodního sloupce, a to 80 cm a 180 cm, přičemž první z těchto zatěžovacích výšek měla být kontrolní, pro objevení větších kaveren či trhlin a po ověření absence těchto imperfekcí, měl být otestován vzorek na nejvyšší možné zatížení, tedy tlak vodního sloupce o výšce 180 cm.

Při běžné pokojové teplotě 20 °C má voda hustotu 998,2 kg/m<sup>3</sup> a při výšce vodního sloupce 100 cm, tedy dle níže uvedeného vzorce, vzniká hydrostatický tlak o velikosti 9 792,3 Pa, tedy v přepočtu 9,8 kPa.

Výpočet hydrostatického tlaku **p** [Pa]:

$$p = \rho \times g \times h$$

Přičemž:

$\rho$	hustota voda [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	tíhové zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]
$h$	hloubka vody [m]

Výpočet hydrostatického tlaku při hloubce 80 cm:

$$p = 998,2 \times 9,81 \times 0,8 = 7\,833,87 \text{ Pa} \rightarrow 7,9 \text{ kPa}$$

Výpočet hydrostatického tlaku při hloubce 180 cm:

$$p = 998,2 \times 9,81 \times 1,8 = 17\,626,22 \text{ Pa} \rightarrow 17,6 \text{ kPa}$$



Dle výpočtů tedy hydrostatický tlak působící rovnoměrně na plochu desky při prvním zatěžovacím stavu pro hloubku 80 cm vodního sloupce vytváří tlak na vzorek 7,9 kPa a při druhém zatěžovacím stavu pro hloubku 180 cm vodního sloupce vytváří tlak 17,6 kPa. V porovnání se zkouškou dle ČSN EN 12390-8 – Hloubka průsaku tlakovou vodou, při které se na zkušební těleso nechává působit vodní tlak 500 kPa, se při tomto experimentu jedná o tlaky výrazně nižších velikostí, ale jak již bylo uvedeno v textu, primárním cílem této zkoušky nebylo ověřit hloubku průsaku, ale to, zda maltová



Obrázek 27 - reálný vzorek (pohled do zkušební nádrže na připravený vzorek)

směs dokáže v dostatečné míře vyplnit veškerý prostor v připraveném hrubém kamenivu a to i při výrobě větších těles (neboť při výrobě dvoufázového betonu hraje rozsah betonáže významnou roli, kvůli nemožnosti vibrování směsi) a zamezit tak tlakové vodě pronikání konstrukcí.

Zkouška probíhala v laboratořích katedry K250 Vodohospodářského experimentálního centra. Vzorek – deska zde byla uložena na ocelový podstavec, a to z důvodu potřeby kontroly spodní plochy a pro možnost měření průniku vody deskou. Kolem desky byla následně vytvořena stěna z desek z tvrzeného plastu o rozměrech 1 × 1 m a všechny spáry byly utěsněny sanitárním tmelem pro zamezení úniků vody v okolí desek. Vzorek byl tedy připraven na první zkušební zalití.

Experiment měl probíhat tak, že postupně měla být naplněna nádrž do hloubky přibližně deset centimetrů vody a v případě netěsnosti dotěsněny všechny vzniklé spáry a trhliny mezi bedněním a vzorkem před plným napuštěním. Bohužel již po prvních několika litrech vody se projevilo, že oblast vzorku, která nebyla v dostatečné míře prolita maltovou směsí, jak je zmíněno výše (6.1.4), vytváří kavernu přes celou šířku desky a voda tímto otvorem mohla volně proudit. Jednalo se o plochu o rozloze přibližně poloviny desky a při bližším prozkoumání bylo zřejmé, že maltová směs v této oblasti částečně či zcela úplně chybí. Z tohoto důvodu, protože nebylo možné dosáhnout maximální požadované hloubky vody, musel být experiment přerušeno. Variant dalšího postupu bylo několik.



Obrázek 28 - reálný vzorek (zkušební zalití vzorku po utěsnění části desky)

Jako první možnost se nabízelo dodatečné dobetonování neprobetonovaných částí vzorku. To by však bylo technologicky obtížné, neboť část maltové směsi již v nedokonale prolitých částech byla a nová maltová směs by pravděpodobně nedokázala efektivně deskou protéct a všechny kaverny vyplnit. Zároveň se zde nacházelo nepatrné množství menších kaveren, do kterých by maltovou směs nebylo možné vůbec vlévat. Dalším negativem tohoto postupu by bylo vytvoření pracovní spáry mezi původní a novou maltovou směsí, kterou by nebylo možné v tomto případě utěsnit a voda by tudy mohla pronikat. Tento postup byl tedy zamítnut jako nevhodný. Nabízela se však možnost efektivnější a technologicky proveditelnější, a to vyřazení chybné části vzorku z experimentu.

Nápad spočíval v utěsnění nedokonale prolité části desky, a to za pomoci vrstvy epoxidu, čímž by došlo k vytvoření vodonepropustné vrstvy, přičemž by tudy již zcela jistě neunikala voda a experiment by tedy mohl probíhat na druhé polovině vzorku, té, která byla prolita maltovou směsí naprosto ideálně. Při této variantě by tedy byly stále sledovány vlastnosti dvoufázového betonu při požadovaném tlaku vodního sloupce (díky stejnému tlaku vody po celé ploše desky), ale na menší ploše, než bylo původně zamýšleno. Z tohoto důvodu byla tedy vybrána pro pokračování experimentu tato varianta. Z důvodu ušetření množství užitého epoxidu byly největší vzniklé kaverny nejprve vyspraveny cementovou kaší a až následně byla vybraná polovina desky zalita vrstvou epoxidu. Po jeho vytvrdnutí se mohlo pokračovat v experimentu.

Na řadě bylo opět zkušební zalití, tedy s hloubkou vody přibližně dvacet centimetrů. Tentokrát však voda ve velkém neodtékala skrz desku a po dosažení kóty hladiny dvacet centimetrů se objevily pouze nepatrné netěsnosti mezi vzorkem a deskami nádrže. Ty byly dodatečně utěsněny a mohlo se v experimentu přejít k dalšímu kroku. Tím bylo navýšení hladiny na maximální možnou úroveň osmdesáti centimetrů. Voda byla postupně napouštěna a po krátké chvilce dosáhla požadované úrovně. Po ustálení vody byla deska ze spodní části důkladně prohledána a nebyly na ní objeveny žádné průsaky vody. Vzorek byl takto ponechán přesně deset dní a v pravidelných intervalech byl vizuálně kontrolován, zda se u něj neobjeví průsaky vody. V průběhu těchto deseti dní skutečně k žádnému viditelnému průsaku vody nedošlo a první část tohoto experimentu byla úspěšně splněna.



Obrázek 29 - reálný vzorek (pohled na napuštěnou nádrž, úroveň vody 80 cm)

Následovala tedy druhá část spočívající v navýšení hladiny vody nad vyhotoveným vzorkem a to na 1,8 m. Navýšení bylo možné díky přidání jedné řady desek, opět o rozměru  $1 \times 1$  m. Ještě předtím však byla stávající voda vypuštěna, aby mohl vzorek vyschnout a experiment tak začínal na nule. Vzorek byl tedy ponechán v suchu čtrnáct dní a až poté byl navýšen a opětovně utěsněn. Plnění nádrže probíhalo opět postupně, tedy nejprve bylo dosaženo úrovně hladiny 80 cm, obdobně jako v předchozí části. Poté byla hladina navýšena o přibližně 20 cm pro ověření těsnění mezi jednotlivými výškovými úrovněmi a po ověření nulových průsaků byla hladina navýšena na maximální možnou hodnotu, tedy 1,8 m. V tento okamžik se v nádrži nacházelo  $1,8 \text{ m}^3$  vody a celková hmotnost nádrže (deska + voda) dosahovala téměř 2 500 kg. Po dosažení maximální hodnoty byla odpočítávána opět doba deseti dní, při nichž byla deska v pravidelných intervalech vizuálně kontrolována a zároveň byla udržována konstantní úroveň hladiny, jež klesala kvůli výparu z plochy.

Po deseti dnech byl vzorek naposledy důkladně prohlédnut a bylo zřejmé, že ani při navýšení působícího tlaku vodního sloupce se neprojevily žádné netěsnosti a vady, neboť deska byla ze spodní části zcela suchá.



*Obrázek 31 - reálný vzorek (nádrž pro úroveň vody 180 cm)*



*Obrázek 30 - reálný vzorek (pohled do nádrže pro úroveň vody 180 cm)*

## 8 Vyhodnocení a shrnutí vlastního výzkumu

Na závěr mého výzkumu dvoufázového betonu bych rád shrnul a vyhodnotil jednotlivé fáze a etapy mé práce. Na prvním místě byla volba technologického laboratorního postupu, tedy v mém případě gravitační plnění. Po vyzkoušení dvou typů plnicího potrubí, jedním s perforací a s druhým bez perforace bylo zřejmé, že vhodnější metodou je užívání potrubí druhého typu a tím byla úspěšně vyřešena otázka jakým způsobem v mém výzkumu vyhotovovat zkušební vzorky.

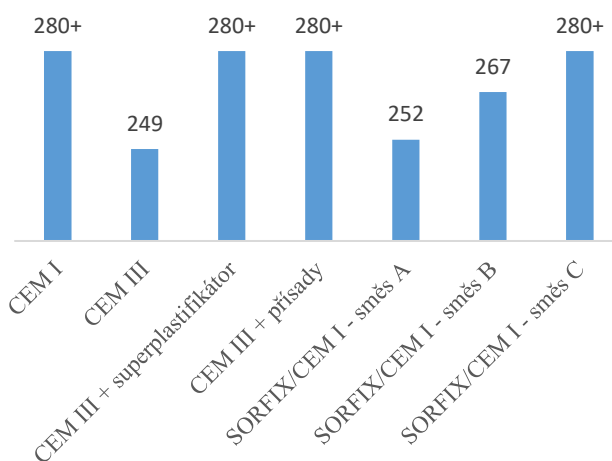
V rámci dalšího výzkumu přišla na řadu volba kameniva. Po teoretickém vyhodnocení všech možných typů a frakcí kameniv mi zbyla volba mezi frakcemi 16/32 a 32/63. Tyto frakce byly podrobeny praktickému výzkumu na reálných fyzikálních vzorcích a jako vhodné pro mou práci se ukázalo užívání kameniva lomové frakce 32/63. Tím byla splněna první část mé práce a následoval výzkum maltových směsí.

### 8.1.1 Vyhodnocení čerstvých směsí

Po navržení a ozkoušení technologického postupu a vhodného kameniva jsem se v mé práci věnoval hledání vhodné maltové směsi, která by byla vhodná pro využití v technologii dvoufázového betonu. Celkem jsem testoval devět směsí využívajících různé druhy cementu, přísad a poměrů a z nich jsem celkem

dvě vyhodnotil jako vhodné. Posuzování těchto směsí probíhalo na základě jejich vlivu na průběh betonáže, například z hlediska rychlosti prolití celého vzorku, ochoty kameniva prolévat či dobu zpracovatelnosti a zároveň, a to především, na schopnost dokonale vyplnit všechny mezery v uloženém kamenivu a vytvořit tak

Graf 3 - rozlivy maltových směsí [mm]



jednu monolitickou strukturu s minimálním počtem kaveren a jiných imperfekcí. U vybraných směsí byla zároveň provedena zkouška stanovení konzistence čerstvé malty dle ČSN EN 1015-3 [22]. Výsledné hodnoty jsou zaneseny do grafu 3 a je z nich patrné, že nejvyšších hodnot, tedy nejvyšších rozlivů, dosahovaly nejen směsi vybrané jako vhodné, ale zároveň i směs CEM I a CEM III + plastifikátor. Z tohoto měření je zřejmé, že ne všechny směsi, které

dosahovaly nejvyšších rozlivů dokázaly vyplnit prostory v hrubém kamenivu, a to i přes jejich vysokou tekutost.

Jako vhodné tedy byly vybrány dvě směsi, a to směs č. 4 s označením ‚CEM III + přísady‘ a směs č. 6C ‚Sorfix/CEM I‘. Obě tyto směsi byly nejen velice účelné v průběhu betonáže, ale zároveň dokázaly zajistit ideální prolití celého kameniva a vytvořit tak dokonalý zkušební



Obrázek 32 - zleva: první vzorek, vzorek CEM III + přísady, vzorek Sorfix/CEM I "C"

vzorek, viz výzkum maltových směsí 6.1.3. Z tohoto důvodu bych tyto dvě směsi doporučil v případě budoucího vývoje technologie dvoufázového betonu pro využití na vodních dílech.

### 8.1.2 Vyhodnocení zkoušek ztvrdlého betonu

Nakonec bych chtěl shrnout a vyhodnotit provedené zkoušky ztvrdlého betonu z hlediska jejich výsledků pro možné využití technologie dvoufázového betonu v praxi. Těchto zkoušek bylo provedeno celkem šest. Na prvním místě bylo vyhodnocení objemové hmotnosti. Cílem bylo dosáhnout hodnoty odpovídající tradičnímu betonu, tedy objemové hmotnosti v rozmezí 2 000 až 2 500 kg/m<sup>3</sup>. Tohoto rozmezí dosáhly téměř všechny zkoumané maltové směsi, přičemž nejlepších hodnot opět dosahovala směs 4 a směs 6C, konkrétně tedy hodnot 2 260 a 2 320 kg/m<sup>3</sup>. Lze tedy říci, že této požadované hranice se zadařilo úspěšně dosáhnout.

Další provedenou zkouškou bylo otestování zkušebních vzorků na krychelnou pevnost v tlaku po 28 dnech. V tomto případě nebyla přesně stanovena cílová hodnota, přičemž pomyslnou spodní hranicí byla hodnota alespoň 5 MPa. Po otestování všech vzorků však bylo jasné, že této hranice se téměř ve všech případech podařilo úspěšně dosáhnout, a dokonce ji i dalece překonat. V tomto případě nejlepšího výsledku dosahovala směs 6C, která dosahovala hodnoty 40 MPa, čímž dalece překonala má očekávání a zároveň rozšířila možnosti využití této technologie na vodních stavbách.

Po pevnosti v tlaku přišla na řadu zkouška ověřující odolnost cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Z důvodu plánovaného využití této technologie na vodních stavbách, tedy v prostředí s vlivem vody a jiných látek, byla zvolena právě tato zkouška. Tělesa při ní byla vystavena neustálému střídání teplot s vlivem rozmrazovacích látek, v tomto případě solným roztokem. Zkoušeny byly opět dvě finální směsi, a to směs 4 a 6C. V obou případech bylo provedeno celkem 100 cyklů. Po dokončení této zkoušky a vyhodnocení výsledků byly obě směsi zařazeny do kategorie 1 – neporušený. Z hlediska odolnosti se tedy jedná o materiály nejvíce odolné. Zkouškou tedy úspěšně tyto dvě směsi prošly.

Následovalo ověření, zda v průběhu betonáže dojde k dokonalému propojení maltové směsi a hrubého kameniva, a zda při vystavení zkušebnímu tělesu tlakovou vodou se voda nebude šířit po stykových plochách a nebude tak docházet k přílišnému pronikání vody skrz konstrukci. V tomto případě bylo využito zkušební těleso o hraně 200 mm obsahující směs 6C, které bylo vystaveno tlaku vody 500 kPa po dobu tří dnů, po jejichž uplynutí bylo těleso rozpůleno. Po oschnutí povrchu bylo patrné, že voda se tělesem skutečně šířila rovnoměrně, že neupřednostňovala stykové plochy a průsaková křivka měla obdobný tvar jako u tradičního betonu.

Na předposledním místě byl řez vzorkem. Kvůli ověření dokonalého prolití uloženého kameniva i uvnitř vzorku bylo jedno zkušební těleso obsahující směs 6C rozříznuto kamenickou pilou. Po rozříznutí bylo jasně patrné dokonalé prolití maltou a vzorek připomínal klasickou monolitickou konstrukci. Malta je tedy schopna protéci nejen po površích vzorku, ale i jejich středem.

V průběhu předchozích zkoušek probíhala souběžně zkouška vodonepropustnosti na reálném vzorku. Jejím cílem bylo ověřit dokonalé prolití všech mezer mezi hrubým kamenivem i v případě většího vzorku než klasických zkušebních krychlí. K ověření této skutečnosti byla vytvořena inovativní zkouška s využitím síly vodního sloupce, a to především z důvodu velikosti testovaného vzorku. Zkušební těleso mělo v tomto případě tvar desky o hraně 1 m a tloušťce 20 cm a bylo vystaveno tlaku vodního sloupce o výšce 180 cm po dobu několika dní. Po ukončení experimentu byla deska detailně prohlédnuta na průsakové trhliny, které se však nikde nevyskytovaly a tento experiment jsem vyhodnotil jako úspěšný.

Po vyhodnocení všech provedených zkoušek mohu tedy konstatovat, že výzkum nové technologie provádění betonových konstrukcí s využitím na vodních stavbách se zdařil

a skutečně se dle provedených testů podařilo objevit a ověřit vhodnou kombinaci technologického postupu a užitých materiálů pro možné budoucí využití v praxi.



## 9 Využití na vodních stavbách

Již na počátku mé bakalářské práce jsem si stanovil požadované vlastnosti pro dvoufázový beton a to tak, aby mohl nalézt své využití na vodních stavbách. Jednalo se především o vodonepropustnost, minimální krychelnou pevnost v tlaku, odolnost vůči agresivnímu prostředí a omezení hydratačního tepla z důvodu možnosti rozsáhlých betonáží velkoobjemových konstrukcí. Vyhodnocení těchto požadavků na základě provedených laboratorních zkoušek je uvedeno výše, viz 8, ale v souhrnu lze říci, že se požadovaných vlastností podařilo docílit.

Jak jsem psal výše, i ten nejužasnější materiál bez možnosti využití v praxi postrádá svůj význam, a proto bych se ve zbytku mé bakalářské práce věnoval možnému využití dvoufázového betonu na vodních stavbách, jak v rámci výstavby nových, tak při rekonstrukcích, sanacích atd.

### 9.1 Porovnání se současně užívaným betonem

Možnosti užití prostého betonu a železobetonu na vodních stavbách jsem již popsal v rámci rešeršní práce. Jedná se o nepřeberné množství všech možných typů konstrukcí, objektů či staveb, u nichž se s tradičním betonem můžeme setkat, a to jak u novostaveb, tak v rámci rekonstrukcí a sanací. Zároveň jsem u požadavků na vlastnosti ztvrdlého betonu nastínil problematiku přejímání technických norem a zbytečně velké nároky z hlediska náběhu a finálních pevností v tlaku u konstrukcí, které nejsou namáhány odpovídajícími silami k požadované pevnosti. Z tohoto důvodu nelze zcela jednoznačně porovnat technologii dvoufázového betonu s tradičně užívanými betony, neboť bez úprav ČSN využívaných pro navrhování konstrukcí pro kontakt s vodou tak, aby více odpovídaly požadavkům pro použití na vodních stavbách, nelze v případě nutnosti jejich dodržení v rámci výstavby ve spoustě případů tuto technologii používat a aplikovat. Z tohoto důvodu lze v současných podmínkách uvažovat užití dvoufázového betonu na většině staveb pouze v případě, že investor či projektant nebude podmiňovat výstavbu užíváním ČSN.

### 9.2 Nahrazení betonu

Primárním cílem studie dvoufázového betonu bylo nahrazení prostého betonu, a to hned z několika důvodů. Na prvním místě byla úspora dopravy, která vychází z hmotnostního rozdělení prostého betonu, neboť přibližně 60 % hmotnosti tvoří hrubé kamenivo, a právě tato

část betonu je v tomto případě ukládána před samotnou betonáží do připraveného bednění. Z toho plyne, že betonová směs připravovaná v betonárnkách sníží svou hmotnost právě o tyto procenta a tím se sníží i přepravní nároky na tuto surovinu. Kamenivo tedy nemusí být dováženo z kamenolomu do betonárky a poté společně jako součást betonu do prostoru staveniště. Nabízí se zde tedy víc možností, jakým způsobem a odkud hrubé kamenivo na stavbu dopravit.

Nejméně ekologická varianta s ohledem na dopravu je využití kamene přímo z kamenolomu. Výhodou tohoto způsobu (oproti ostatním možnostem, nikoliv tradiční betonáží) je ulehčení prací přímo na stavbě, neboť kamenivo přijede prakticky připravené pro uložení do bednění. Největší nevýhodou je však právě využití kamenolomu. Ne vždy je možno mít stavbu v blízkosti vhodného kamenolomu a dovážet kamenivo z větších vzdáleností by mohlo být nerentabilní a neekologické, i když ve spoustě případech, a to i v naší republice, se kamenivo dováží ze skutečně velkých dálek. Další variantou je využití zdrojů kamene přímo na stavbě či v jeho blízkém okolí. Lze téměř s jistotou říci, že většina vodních staveb se nachází v blízkosti vodních toků, které jsou bohaté právě na výskyt kamenů a s jejichž využitím počítá právě druhá varianta. V jejím případě se do připraveného bednění ukládá omyté říční kamenivo o vhodné velikosti zrn/frakci. S tím se tedy pojí potřeba třídění vybraného kameniva z koryta toku na stavbě do jednotlivých frakcí a vyřazení těch nevhodných. Otázkou je však vhodná velikost frakce kameniva, neboť v rámci mé práce jsem zkoumal pouze užití frakce 32/63, přičemž kamenivo větších rozměrů, či jejich mix by teoreticky bylo taktéž možné použít, avšak podmínkou by bylo zajištění homogenních materiálových vlastností v celém objemu konstrukce. Zároveň by se mohlo stát, že v korytě či jeho okolí nebude dostatečně vhodný materiál pro použití v betonu. Poté by muselo být kamenivo dováženo odjinud.

V rámci této varianty, tedy při užití říčního kameniva, by bylo taktéž možné uvažovat při rozměrově nevhodných kamenech z lokálních zdrojů s použitím drtírny kamene, přičemž by vytěžená surovina byla rozdracena na požadované rozměry. S drcením materiálu počítá i poslední možnost, jak získat hrubé kamenivo pro dvoufázový beton, a to možnost s využitím recyklovaného betonu. Postup by byl obdobný jako v případě drcení kameniva, avšak v tomto případě by na vhodnou frakci byl zpracováván již ztvrdlý prostý beton. Tato varianta, zřejmě neekologičtější ze všech výše uvedených, by byla nejvhodnější v případě rekonstrukcí či sanací již zbudovaných objektů, přičemž by se užil beton právě z původních konstrukcí. Tím by se snížily nejen náklady na dovoz hrubého kameniva na stavbu, v běžném případě již ve formě čerstvého betonu, ale i náklady na odvoz a uložení na skládce prostého betonu a železobetonu z původních konstrukcí.

Sekundárním cílem dvoufázového betonu bylo odstranění problému vzniklého při betonování objemnějších konstrukcí, a to problému s vytvářením hydratačního tepla. Jak je zmíněno výše, využití dvoufázového betonu má teoreticky pozitivní vliv právě na vývoj hydratačního tepla, z důvodu využití hydraulických pojiv s pomalým nárůstem pevnosti (pomalejší nárůst hydratačního tepla – konstrukce má čas na to snížit svoji teplotu) a z důvodu užití kameniva větších frakcí a jeho uložení před samotnou betonáží než v případě běžného betonu (větší zrna kameniva jsou schopna pojmout více tepla), přičemž v případě ochlazení kameniva před samotným proléváním maltovou směsí můžeme vývoj hydratačního tepla v konstrukci ještě více snížit. Z tohoto důvodu se užití dvoufázového betonu jeví jako vhodné pro využití na vodních dílech, u nichž se s mohutnými, co se objemu i velikosti týče, konstrukcemi můžeme setkat, neboť by bylo možné provádět betonáže ve větších objemech bez dodatečného ochlazování materiálu (například vnitřním oběhovým chlazením), čímž by se snížily náklady nejen na toto dochlazování, ale celá konstrukce by obsahovala i méně pracovních spár (technologicky složité části, u nichž je důkladné provedení velice důležité z hlediska funkčnosti a bezpečnosti celého objektu, například vodotěsnosti) a došlo by i ke zkrácení doby výstavby a tím i celkových nákladů na stavbu.

### **9.2.1 Technologický postup dvoufázového betonu**

Jak jsem již zmiňoval v rámci technologického postupu (6.1.1) u dvoufázového betonu, cílem mé práce bylo ověřit, zda je možné tuto technologii provádět i bez použití veškeré mechanizace, a to pouze s využitím gravitační síly z důvodu, aby při provádění technologie dvoufázového betonu s přispěním mechanizace byl výsledek již tak dostačující, zaručený a vždy úspěšný. Z tohoto důvodu by se při reálné betonáži na stavbě již nespolehalo pouze na využití přírodních gravitačních sil, ale i na moderní technologie. Betonáž za využití dvoufázového betonu v rámci nahrazení tradičního prostého betonu by tedy vypadala následovně. Do připraveného bednění by se uložilo/vsypalo vhodné očištěné a omyté kamenivo (viz výše) s předem rozmístěnými vertikálně uloženými potrubími náležitého průměru, a to dle předepsaných minimálních horizontálních vzdáleností (v tomto případě by záleželo na užití technologii, a to tak, aby byl s dostatečnou účinností vyplněn maltovou směsí prostor kameniva mezi jednotlivými prolévacími body. Do takto rozmístěných potrubí by se po příjezdu domíchávače betonu (v případě dovážení maltové směsi) tlakově vháněla připravená směs a po jejím prolití celé konstrukce (vizuální kontrola povrchu objektu) by bylo potrubí vyjmuta a zbylé otvory by po vytažení potrubí byly dodatečně zalaty. Jelikož je v tomto případě maltová

směs vháněna od spodku bednění směrem vzhůru, je zde větší pravděpodobnost a lepší kontrolovatelnost účinnosti této technologie.

Celý technologický postup připomíná tryskovou injektáž, avšak při této technologii by nebylo zapotřebí tak velkých vháněných tlaků, neboť mezerovitost v uloženém kamenivu a reologie užitě směsi by měly zajistit dokonalé prolití celého objemu kameniva i při užití minimálního tlaku. Jak jsem již psal výše, využití vyššího vhánějícího tlaku by pouze zvýšilo účinnost celého procesu. V případě betonování vyšších objektů, řádově od výšky několika metrů, by bylo pravděpodobně zapotřebí postupné vytahávání plnicího potrubí, z důvodu přetlačení již uložené maltové směsi.

Stejně jako v případě standardního betonu, i v tomto případě by bylo nutné umístit v rámci konstrukce dilatační spáry. Ty obvykle prostupují celou šířkou objektu a slouží k volnému rozpínání a smršťování betonu, vlivem teplotního kolísání s tím, že nadále zajišťují celistvost celé konstrukce, například z hlediska vodotěsnosti. Obvykle, například při výstavbě přehradních těles, se užívají těsnicí pryžové pásy. Uložení by bylo stejné jako v případě standardního betonu, avšak před vsypáním kameniva. Při užití technologie dvoufázového betonu, tedy z důvodu použití větších frakcí, by však bylo vhodné před samotným uložením kamenů dilatační pásy ochránit a kamenivo v jejich okolí vsypávat opatrně, ideálně ručně, bez mechanizace, z důvodu možného poškození a protržení.

Nedílnou součástí každé betonové konstrukce, tedy užitého betonu, jsou i účinky smršťování tohoto materiálu v průběhu tuhnutí a tvrdnutí. Dochází přitom ke zmenšování objemu betonu (velice záleží na použité směsi a druhu hydraulického pojiva) a tím i ke vzniku mikrotrhlin. Ty mají neblahý vliv na vodotěsnost celého objektu a obzvláště na vodních stavbách jsou zcela nežádoucí. V případě průniku vody navíc mohou při výkyvech teplot narušit strukturální integritu betonu a může dojít i ke kolapsu díla. Z tohoto důvodu se pod povrch konstrukce, do dostatečné hloubky z důvodu krytí výztuže proti korozi betonářské oceli, umísťuje smršťovací výztuž ve tvaru rastru, nejčastěji s využitím ocelových pletiv, která by měla účinky smršťování pojmout a zabránit tak v popraskání betonu. Při použití technologie dvoufázového betonu by na povrchu konstrukce mohlo docházet k obdobnému jevu a z tohoto důvodu by bylo možné posledních několik centimetrů ponechat bez hrubého, předem uloženého, kameniva a na něj připravit smršťovací výztuž, přičemž maltová směs by byla vytlačena až nad tuto výztuž, popřípadě by tato zakončovací vrstva byla před zatuhnutím dodatečně vybetonována. Podmínkou je samozřejmě dodržení minimální krycí vrstvy.

### 9.2.1.1 Jezy

První možnost využití technologie dvoufázového betonu v rámci nahrazení obyčejného betonu vidím v případě jezových objektů. Výskyt betonových konstrukcí u těchto staveb jsem popsal v rámci využití betonu na vodních stavbách (4.2) a z tohoto důvodu se zde budu věnovat pouze možnému využití při výstavbě spodní stavby jezu, včetně vývaru. Tyto dva konstrukční prvky jsou součástí téměř každého jezového objektu (můžeme se setkat i se staršími typy jezů, například dřevěnými či kamennými, či jezy bez betonového vývaru, například využívajících těžký kamenný zához v podjezí) a to jak u nově budovaných pevných, tak pohyblivých jezů. Z důvodu hydraulického proudění vody přes tento typ objektu se nejčastěji používá spodní stavba typu Jamborův práh. Tento tvar zaručuje ideální hydraulické podmínky pro převod vody, avšak zároveň se jedná o konstrukci s velkým objemem použitého betonu.

Jednalo by se tedy o objekt ideální pro využití technologie dvoufázového betonu z důvodu velké mohutnosti celé konstrukce a nízkému silovému namáhání. V rámci práce jsem však nestudoval odolnost materiálů na abrazi způsobenou tekoucí vodou a z tohoto důvodu nelze zcela posoudit odolnost proti energii proudící vody přes objekt, obzvláště v prostoru vývaru. Pokud by však technologie dvoufázového betonu nezaručila dostatečnou odolnost vůči zmiňované abrazi, nabízí se varianta vytvoření sendvičové konstrukce, obdobně jako v případě betonových tížných hrází, tedy objekt, jehož výplň by byl dvoufázový beton (jádrový beton) a na jehož povrchu by byl beton odolnější (obalový beton). Pokud by se však jednalo o jezy pohyblivé, například jezy klapkové, u kterých je zapotřebí přenášení sil z hradic klapky do spodní stavby, bylo by užití technologie dvoufázového betonu v oblastech se zvýšeným výskytem zatěžovacích sil nevhodné. V těchto případech by bylo možné tuto technologii využít například v prostoru nadjezí, či v podjezí například ve formě vývarové desky.

### 9.2.1.2 Přehrady

V rámci výstavby těles hrází přehrad, by technologie dvoufázového betonu byla nevhodnější v případě výstavby betonových tížných přehrad. Jak jsem již popisoval výše (4.2), tak těleso hráze v příčném řezu je rozděleno na dvě materiální vrstvy tvořené betonem, a to na obalový beton, jenž tvoří povrchovou vrstvu a který má vlastnosti vhodné pro odolnost vůči účinkům působící vody (například mechanická odolnost, chemická odolnost či ochrana proti pronikání vody do konstrukce a skrz ní) a na beton jádrový, který u tohoto typu použití je množství betonu přes 90 % celého objemu a slouží zde pouze jako tížný prvek, vytvářející

protiváhu proti působící vodě v nádrži a vůči vodě podzemní působící na konstrukci vztlačovými silami. Jádrový beton z hlediska pevnosti má nízké požadované vlastnosti, pevnost v tlaku se obvykle pohybuje řádově v jednotkách, maximálně v nižších desítkách megapascalů. Kupříkladu jádrový beton užitý při výstavbě vodního díla Orlík měl krychelnou pevnost v tlaku po 28 dnech C8/10. Protože tento typ betonu nepřichází v normálním případě ke styku s vodou, nejsou na něj kladeny nároky z hlediska fyzické a chemické odolnosti vůči vnějším vlivům.

Právě v případě jádrového betonu by využití dvoufázového betonu bylo nejvhodnější. Hlavním z důvodů je velký objem betonovaných částí, který má za následek jednak vysoké nároky na nízký vývoj hydratačního tepla a zároveň na dovoz materiálu – betonu. U některých větších staveb se využívaly například mobilní betonárky, byla tedy možnost míchat betonovou směs přímo na stavbě, přičemž i v těchto případech by se užíla jedna z variant dvoufázového betonu, a to využití vhodného typu kameniva z blízkého okolí či jeho namletí anebo využití recyklovaného betonu.

### 9.2.1.3 Ostatní vodní stavby

Nejenom u jezových konstrukcí a přehradních hrází by bylo možné využít technologii dvoufázového betonu pro nahrazení tradičního betonu. Mohlo by se jednat například o plavební komory, kanály či přehrázky, přičemž technologický postup a řešení by zde bylo obdobné jako v případě využití na jezových konstrukcích a přehradních hrázích. Buď by se tedy jednalo o celkové nahrazení tradičního betonu, či využití sendvičové konstrukce z důvodu potřeby odolného betonu na povrchu konstrukce, například z důvodu průtoku vody přes daný objekt.

## 9.2.2 Železobeton

I na vodních stavbách se setkáme s konstrukcemi namáhanými jak na ohyb, tak na tlak a v těchto případech se jako vždy využívá železobeton, tedy kombinace prostého klasického betonu s určitým množstvím betonářské oceli. Jedná se například o konstrukce opěrných zdí stabilizujících koryto toku, které jsou zatíženy z jedné strany nejčastěji zeminou po celé své výšce, či u kombinovaných typů hrází (tížná – klenbová). I zde, v těchto případech, by technologie dvoufázového betonu mohla najít své využití. Postup by byl obdobný, jako v případě klasické betonáže železobetonových konstrukcí, avšak s drobnou úpravou, bohužel lehce zpomalující dobu výstavby. V normálním případě se před betonáží vyváže výztuž, poté se upevnění bednění, a to se následně proleje betonem. Při využití technologie dvoufázového betonu by však v průběhu vázání výztuže byly jednotlivé již vyvázané části postupně

vysypávají hrubým kamenivem až po vrchol konstrukce. Předpokladem je tedy ukrytí ocelové výztuže mezi uložené kamenivo, tedy s tím předpokladem, že maltová směs v dostatečné míře prostoupí celou konstrukcí a spojí jednotlivé ocelové pruty a prvky. Tento způsob by však bylo nejprve zapotřebí vyzkoušet v laboratorních podmínkách a otestovat schopnost propojení výztuže, hrubého kameniva a maltové směsi.

## 10 Závěr

Cílem práce je vývoj nové technologie nazvané dvoufázový beton, vycházející z práce Self-compacting grout to produce two-stage concrete, jejíž autorem je tým vedený Hakimem S. Abdelgaderem z University of Tripoli v Libii z roku 2019 [3]. Tato technologie je zaměřena na možnosti výstavby betonových konstrukcí na vodních stavbách s využitím lokálních zdrojů kameniva.

V rámci studie byla vyzkoumána ideální maltová směs pro co nejvhodnější prolití hrubého kameniva v kombinaci s vývojem technologického postupu a byly vyhotoven zkušební vzorky, které byly dále úspěšně prověřeny náležitými zkouškami. Ty úspěšně prověřily jejich objemovou hmotnost, pevnost v tlaku, odolnost vůči působení vody a schopnost propojit a vyplnit jednotlivá zrna hrubého kameniva.

Další možné pokračování výzkumu technologie dvoufázového betonu:

- Výzkum abraze materiálu způsobené prouděním vody
- Měření vývoje hydratačního tepla v průběhu tuhnutí
- Ověření mechanizace technologie provádění v praxi
- Výzkum možného provázání této technologie s betonářskou výztuží
- Laboratorní simulace betonáže pod vodní hladinou
- Betonáž vyšších a objemnějších vzorků



## 11 Literatura

- [1] Beton z recyklovaného kameniva ECOCRETE® R | TBG Metrostav. *TBG METROSTAV* [online]. 4. květen 2021 [vid. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.tbg-metrostav.cz/produkty/beton-z-recyklovaneho-kameniva-ecocrete/>
- [2] ONDŘEJ ZOBAL / LUBOMÍR KOPECKÝ / PAVEL PADEVĚT / VÍT ŠMILAUER / ZDENĚK BITTNAR. Analýza betonu z tělesa přehrady Orlík po padesáti letech. *EARCH.CZ* [online]. 7 2014 [vid. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.earch.cz/technologie/clanek/analyza-betonu-z-telesa-prehrady-orlik-po-padesati-letech>
- [3] HAKIM S ABDELGADER, ALI S. EL-BADEN, KRZYSTOF WILDE, MARZENA KURPINSKA, FARZAM OMIDIMOAF, ALI M. RAJABI. Self-compacting grout to produce two-stage concrete. In: *9th International RILEM Symposium SELF-COMPACTING CONCRETE (SCC9)* [online]. 2019. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/338215305\\_Self-compacting\\_grout\\_to\\_produce\\_two-stage\\_concrete](https://www.researchgate.net/publication/338215305_Self-compacting_grout_to_produce_two-stage_concrete)
- [4] *Vltavská vodní cesta | pvl.cz* [online]. [vid. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vltavska-vodni-cesta/plavebni-kanal-vranany---horin>
- [5] IGNACIO ESCOBAR, JOSÉ LUIS FIGUEROA, RODRIGO RIVERA. Design and Construction of a 70m High RCC Dam in Chile. *Internation Jurnal of Hydropower & Dams*. 2017.
- [6] RAFAT SIDDIQUE, PAULO CACHIM. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*. 1. vyd. B.m.: Woodhead Publishing, 2018. ISBN 978-0-08-102157-6.
- [7] T.W. OVERTON. Large Dams in Latin America: A Study in Social Costs. *University of Pittsburgh Press*. 1986.
- [8] BAO-CHANG SHI, WEN-HUI SUN A SHI-JIE YU. Concrete Temperature Control for the Three Gorges Projec. *Journal of Materials in Civil Engineering*. nedatováno, **2022**.
- [9] ELIZABETH MANN, ALAN WITSCHONKE. *The Hoover Dam: The Story of Hard Times, Tough People and The Taming of a Wild River*. B.m.: Mikaya Press, 2001. ISBN 1-931414-13-0.
- [10] DOC. ING. LADISLAV SATRAPA, CSC. PROF. ING. VOJTĚCH BROŽA, DRSC. ING. MIROSLAV BROUČEK, PH.D. *VODOHOSPODÁŘSKÁ VÝSTAVBA A BETON | Ebeton* [online]. 15. prosinec 2016 [vid. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2016-6-02-vodohospodarska-vystavba-a-beton/>

- [11] PROF. ING. VÍT ŠMILAUER, PH.D., DSC. ING. ONDŘEJ ZOBAL PROF. ING. ZDENĚK BITTNAR, DRSC. PROF. ING. RUDOLF HELA, CSC. ING. ROMAN SNOPIŇ. PAVEL DONÁT. VYUŽITÍ ÚLETOVÝCH POPÍLKŮ PRO BETONÁŽ MASIVNÍCH KONSTRUKCÍ | Ebeton. *ebeton* [online]. 15. duben 2014 [vid. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2014-2-60-vyuziti-uletovych-popilku-pro-betonaz-masivnich-konstrukci/>
- [12] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN 206+A2 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. B.m.: Česká agentura pro standardizaci. 2021
- [13] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN P 73 2404 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace. B.m.: Česká agentura pro standardizaci. 2021
- [14] PROF. INŽ. DR. STANISLAV KRATOCHVÍL DR. SC. *Vodní nádrže a přehrady*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [15] Balený portlandský cement CEM I 42,5 R. *HeidelbergCement Czechia* [online]. [vid. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r>
- [16] Balený vysokopecní cement CEM III/B 32,5 L - LH/SR, síranovzdorný cement, s nízkým vývinem hydratačního tepla. *HeidelbergCement Czechia* [online]. [vid. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemIIIb325llhsr>
- [17] ING. MARTINA ŠÍDLOVÁ, PH.D. Malty a cementy - Ústav skla a keramiky. *sil.vscht.cz* [online]. [vid. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://sil.vscht.cz/cem>
- [18] DOC. ING. RADOMÍR SOKOLÁŘ, PH.D. Vlastnosti fluidních elektrárenských popílků s ohledem na jejich použitelnost ve výrobě pálených staviv. *TZB-info* [online]. 31. prosinec 2018 [vid. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/18458-vlastnosti-fluidnich-elektrenskych-popilku-s-ohledem-na-jejich-pouzitelnost-ve-vyrobe-palenyh-staviv>
- [19] WWW.FG.CZ, 2016, FG Forrest, a s. Ekologické pojivo Sorfix | Úvod. *ČEZ Energetické produkty - CZ* [online]. [vid. 2023-03-22]. Dostupné z: <http://webcms.cezdata.corp/cs/aktuality/ekologicke-pojivo-sorfix-141806>
- [20] MasterGlenium SKY 504 | Superplastifikační přísada k výrobě tekutých betonů. *CZ/SK* [online]. [vid. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.master-builders-solutions.com/cs-cz/produkty/mastergleniumsky/masterglenium-sky-504>
- [21] *STABILAN 300 F* [online]. [vid. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/produkty/stabilizacni-prisady:c4/stabilan-300-f:p271.htm>
- [22] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 1015-3 Zkušební metody malt pro zdívo - část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku. B.m.: Český normalizační institut, Praha. 2000

- [23] ING. VLADIMÍR VESELÝ. Beton a voda | Ebeton. *Ebeton* [online]. 16. březen 2021 [vid. 2023-04-08]. Dostupné z: [https://www.ebeton.cz/clanky/2021\\_1\\_22-beton-a-voda/](https://www.ebeton.cz/clanky/2021_1_22-beton-a-voda/)
- [24] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha. 2020
- [25] ÚŘAD PRO NORMALIZACI A MĚŘENÍ, PRAHA. *ČSN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. B.m.: Český normalizační institut. 1985
- [26] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha. 2020
- [27] PROF. INŽ. MOJMÍR CIGÁNEK, DRSC. *Betonové konstrukce pro vodní stavby*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. Díl 1 - část 1 Mechanické a konstrukční vlastnosti betonu, obecné zásady navrhování a vyztužování, 1.
- [28] PROF. ING. VOJTĚCH BROŽA, DRSC., ING. LADISLAV SATRAPA, CSC. *Navrhování přehrad*. Praha: ČVUT, 1996.