

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

NÁVRH TECHNOLOGIE VODOPROUSTNÝCH  
BETONŮ  
TECHNOLOGY DESIGN WATERTIGHT CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Michal Skřivánek

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2017





# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
PRACOVNÍŠTĚ	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Michal Skřivánek
NÁZEV	Návrh technologie vodopropustných betonů
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

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

Vedoucí ústavu

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

Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Odborné zahraniční i tuzemské časopisy, sborníky z odborných symposií a konferencí, internetové zdroje odborných publikací z daného oboru.

Diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2012 – 2015.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

V současné době začíná ve světě poptávka po vodě a s tím velmi souvisí systém hospodaření s vodou. V hustě obydlených aglomeracích se zvětšují plochy, které jsou tvořeny nepropustnými materiály (beton, asphalt) a současně se vylepšují kanalizační systémy pro rychlý odvod dešťových vod do řek či čističek. Tímto se výrazně snižuje akumulace dešťových vod do podloží, čímž se výrazně snižují zásoby spodních vod.

Cílem vaší diplomové práce bude navrhnout speciální typ betonů s vysokou vodopropustností, které budou dosahovat běžných pevností v tlaku do cca 40 MPa, budou odolné povětrnostním vlivům a bude možné je použít pro pochůznou či pojižděnou komunikace.

V teoretické části proveďte podrobnou rešerši dostupných odborných publikací ze zahraniční odborné literatury. Následně navrhnete vhodné receptury pro pevnostní třídy C20/25 až C30/37 s výraznou schopností vodopropustnosti, ale současně odolnými proti působení prostředí XF. Pokuste se navrhnout vhodnou metodu zkoušení vodopropustnosti betonů, která bude aplikovatelná i v praxi

V praktické části pak laboratorně zhotovte sady vzorků pro testování vlastností zatvrdlých betonů – pevnosti v tlaku, odolnosti proti působení mrazu a zejména vodopropustnosti.

Rozsah práce minimálně 70 stran.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Vedoucí diplomové práce

## **Abstrakt**

Práce se zabývá návrhem technologie vodopropustných betonů (PC). Obsahem teoretické části jsou rešerše zpravidla zahraničních autorů o výzkumech těchto betonů. Obecně je zde řešena problematika složení PC, křivka zrnitosti kameniva, která je ve věci vodopropustnosti rozhodující, chování betonu v čerstvém stavu, ukládání a hutnění betonu. Ve stavu ztvrdlém se řeší výsledné vlastnosti, uplatnění betonu v praxi například jako součást vodopropustného povrchu a nedostatky spojené s užitím betonu v reálných konstrukcích. Podstatnou kapitolou této práce je vývoj zkoušky vodopropustnosti, která chybí a v oblasti zkoušení PC je zcela nepostradatelnou. V praktické části je zpracována škála receptur s výčtem naměřených a pozorovaných vlastností (pevnost v tlaku, mrazuvzdornost a vodopropustnost). Závěr obsahuje zhodnocení výsledků a možnosti směru vývoje tohoto betonu.

## **Klíčová slova**

Vodopropustný beton, mrazuvzdornost, křivka zrnitosti, plastifikační přísada, provzdušňovací přísada, vodopropustný systém, zkouška vodopropustnosti.

## **Abstract**

My work describes technology design of pervious concrete. The theoretical part contains a research about this kind of concrete usually from foreign authors. In general, I focused on the composition of the PC, aggregate grading curve, behaviour of concrete in fresh state, storing and compaction of concrete. A critical part is the aggregate grading curve – it plays the main role in the final level of water permeability. Further, we will go through the real world scenarios where we can use this type of concrete and also through the associated drawbacks. A substantial part of this work is about development of water-permeability test. The practical part shows variety of recipes with a list of measured and observed characteristics (compressive strength, frost resistance and water-permeability). The conclusion includes evaluation of the results and suggestions for future development in this area.

## **Key words**

Pervious concrete, frost resistance, grading curve, plasticizer, additive for aerated concrete mixture, water-permeability, water-permeability test.



### **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Michal Skřivánek *Návrh technologie vodopropustných betonů*. Brno, 2016. 89 s., 10 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.





**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10.1.2017

.....

podpis autora

Bc. Michal Skřivánek



## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval zejména mému vedoucímu práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc., za poskytnutí odborných rad a studijních materiálů a dále pak vybraným pracovníkům ústavu THD při VUT FAST v Brně, za pomoc při zpracování praktické části diplomové práce. Velice významnou roli v mém vysokoškolském studiu sehráli rodiče, kterým taktéž velmi děkuji. Tato diplomová práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.



## Obsah

<b>Úvod</b> .....	<b>17</b>
<b>Teoretická část</b> .....	<b>19</b>
1 Obecně o vodopropustných betonech .....	19
1.1 Potřeba vodopropustnosti.....	19
1.2 Použití PC jako součást vodopropustného systému .....	21
1.3 Požadavky na vodopropustné betony .....	23
2 Betony s podobnou technologií.....	24
2.1 Mezerovitý beton .....	24
2.2 Válcované betony (RCC) .....	25
3 Složení vodopropustného betonu .....	28
3.1 Cement, přísady, příměsi .....	28
3.2 Kamenivo .....	30
4 Ukládání a hutnění v závislosti na aplikaci PC .....	33
4.1 Lisování a vibrolisování čerstvého PC .....	33
4.2 Válcování čerstvého PC.....	34
5 Předpokládané vlastnosti PC .....	36
5.1 Mezerovitost a pevnosti PC.....	36
5.2 Obrusnost .....	37
5.3 Mrazuvzdornost a odolnost vůči CHRL.....	38
5.4 Smrštění a dotvarování.....	38
5.5 Další vlastnosti PC.....	39
6 Nedostatky PC spojené s provozem .....	40
7 Zkouška vodopropustnosti PC .....	41
<b>Praktická část</b> .....	<b>43</b>
8 Cíl praktické části .....	43
9 Metodika práce.....	44

10	Vstupní suroviny .....	47
10.1	Cement.....	47
10.2	Kamenivo .....	47
10.3	Příspěvy.....	48
10.4	Voda .....	49
11	Vyhledávací receptury - I. fáze .....	50
11.1	Tvorba receptur .....	50
11.2	Vlastnosti PC v čerstvém stavu .....	50
11.3	Vývoj zkoušky vodopropustnosti .....	50
11.4	Vlastnosti PC ve ztvrdlém stavu .....	51
11.5	Zhodnocení výsledků I. fáze .....	51
12	Optimalizované receptury – II. fáze .....	52
12.1	Možnosti provzdušnění vodopropustných betonů.....	52
12.2	Finální podoba optimalizovaných receptur .....	52
12.2.1	Křivky zrnitosti kameniva optimalizovaných receptur .....	52
12.3	Vlastnosti PC ve ztvrdlém stavu .....	52
12.3.1	Stanovení obrusnosti .....	53
12.3.2	Mrazuvzdornost .....	53
12.3.3	Souhrn naměřených výsledků.....	54
12.3.4	Studium makrostruktury.....	54
12.3.5	Vizuální kontrola povrchu .....	54
13	Závěr.....	55
14	Seznam použitých zdrojů .....	56
14.1	Použitá literatura .....	56
14.2	Použité normy a právní předpisy .....	57
14.3	Použité obrázky.....	58
15	Seznam tabulek, grafů, obrázků, příloh a zkratk.....	59
15.1	Seznam tabulek.....	59

15.2	Seznam grafů .....	59
15.3	Seznam obrázků.....	60
15.4	Seznam příloh .....	60
15.5	Seznam zkratk a symbolů .....	60
16	Přílohy.....	61





## Úvod

Moderní doba, ve které žijeme, s sebou přináší různá úskalí, jež bude potřeba dříve nebo později efektivně řešit. Jeden takový problém zaznamenáváme ve spojitosti s pitnou vodou a zásobou vody vůbec. Rozvoj měst a vznik zastavěných prostor částečně zabraňuje dešťové vodě jednoduché vsáknutí do půdy a dále do podzemních vod, aby fungoval přirozený hydrologický cyklus. Člověk tento přírodní systém narušil, respektive ovlivnil a možná i proto se nevypočitatelně a nepříznivě mění klima na určitých místech planety. Důkazem toho jsou enormně teplé jarní a letní měsíce a s tím spojené nezvyklé sucha a logický pokles hladiny spodních vod, který zaznamenáváme mimo jiné i v České republice.

Cílem vývoje vodopropustných betonů je navrhnout nejen složení, ale i technologii zpracování a ukládání betonové směsi tak, aby se dala použít jako vrchní pojízdná vrstva vozovek, parkovišť či pochozích ploch. Tento povrch by měl splňovat požadavky právě pro zmíněné aplikace, a tedy by měl dosáhnout pevnosti více jak 40 MPa a s tím spojenou odolností vůči otěru a oděru. Zároveň musí odolávat vlivům působení mrazu, bez i včetně přítomnosti chemických rozmrazovacích látek (dále CHRL). V neposlední řadě musí beton propouštět množství vody tak, aby docházelo k plynulému prostupu této vody skrz beton do spodních vrstev systému, kterého bude vodopropustný beton součástí.

Samotný vývoj takových betonů již započal v severských zemích Evropy (Finsko) a dále pak v USA a Japonsku. Česká republika s vývojem tohoto druhu betonu nemá výraznější zkušenosti. Probíhá pouze výroba a zpracování vodopropustných betonů jako podkladní vrstvy, tzn. bez nutnosti odolávat enormním požadavkům, jaké jsou kladeny na finální vrchní vrstvy. Skutečnost, že se v ČR s betonem tohoto typu ještě nepracovalo, potvrzuje i fakt, že neexistuje zkouška na propustnost vody betonem, což bude další z úkolů tohoto vývoje.



# **Teoretická část**

## **1 Obecně o vodopropustných betonech**

Vodopropustný beton je téma budoucnosti a proto i historie tohoto typu betonu není nikterak rozsáhlá. Ze zahraniční literatury přebíráme název pervious concrete čili propustný beton respektive vodopropustný beton z čehož vyplývá zkratka PC, která je zpravidla použita s tímto materiálem. Mezi průkopníky a tvůrce této technologie v Evropě patří vědci a „betonáři“ severovýchodních států a to konkrétně Finska. Právě zde mají problémy s nedostatkem podzemních vod. Jejich oficiální výzkumný projekt započal v roce 2012 a o zásadních výsledcích se začalo psát v odborných publikacích v letech 2014 a 2015.

S trochou nadsázky se dá říci, že vodopropustný beton je vlastně mezerovitým betonem, který už známe mnoho let. Tímto betonem může neomezeně protékat kapalina, při zachování vlastností betonu jako takového v maximální možné míře. Požadavky na vodopropustný beton jsou ale mnohem větší v porovnání s mezerovitým betonem, což je dáno jeho složitější aplikací.

### **1.1 Potřeba vodopropustnosti**

Jak již bylo zmíněno v úvodu, množství zastavěné plochy neustále narůstá. Z potřeb civilizace vychází nutnost stavět prostory k bydlení (megalomanské developerské projekty), nakupování (rozsáhlé nákupní centra a přidružené prostory), parkování (dnešní rodina vlastní průměrně dva automobily) a zábavě. Zejména problematika parkování a tvorby velkých parkovišť je rozhodující. Existují sice možnosti vytvoření patrových parkovacích domů nad zemí i pod ní, ale stále levnější variantou je záběr velké plochy, následně pokryté asfaltem či betonovou dlažbou a vytvoření otevřeného parkoviště. Hodně podobná je situace u pochozích ploch v podobě náměstí, chodníků v parcích či na ulicích.

V letech 2000 – 2013 se zvýšil podíl zastavěné plochy v ČR o 3,5 %, což odpovídá výměře cca 28,7 tisíc hektarů. Podíl zastavěné plochy u nás tedy přesáhl 10 %. Meziročně se zastaví 2,9 tisíc hektarů.[2] Tento trend výrazně nezměnila ani ekonomická krize v roce 2008, která se velmi negativně dotkla právě stavebnictví. Změnu rázu a potenciálu krajiny lze

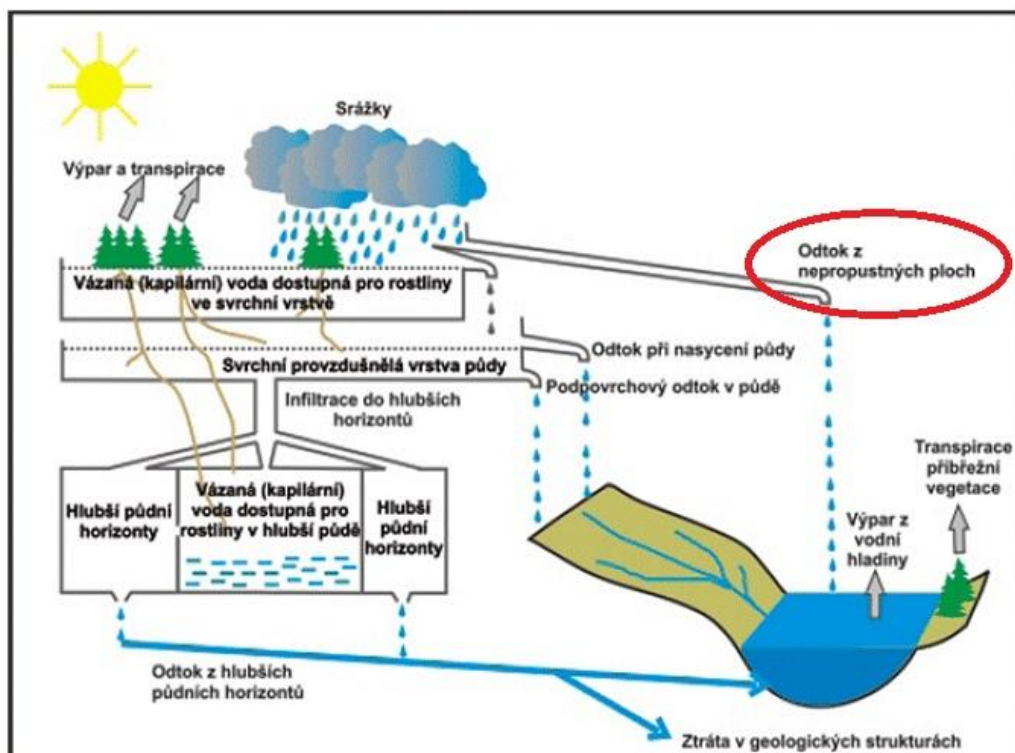
sledovat na následujícím obrázku (obr. 1.1), který mapuje oblast, kde vzrostlo v minulých letech nákupní centrum s přílehlými plochami pro potřeby centra a jejich návštěvníků.



Obr. 1.1 Příklad změny rázu krajiny z důvodu výstavby nového nákupního centra v městě Hodoníně o rozměrech cca 400x250 metrů [O1]

Takto zastavěné plochy jsou odkanalizovány a dešťová voda, která na povrch dopadne, je odvedena přes kanalizační vpusti a stokový systém dále do řek. Je tedy zřejmé, že dešťová voda opustí území ČR během několika málo hodin bez toho, aby prošla spodními

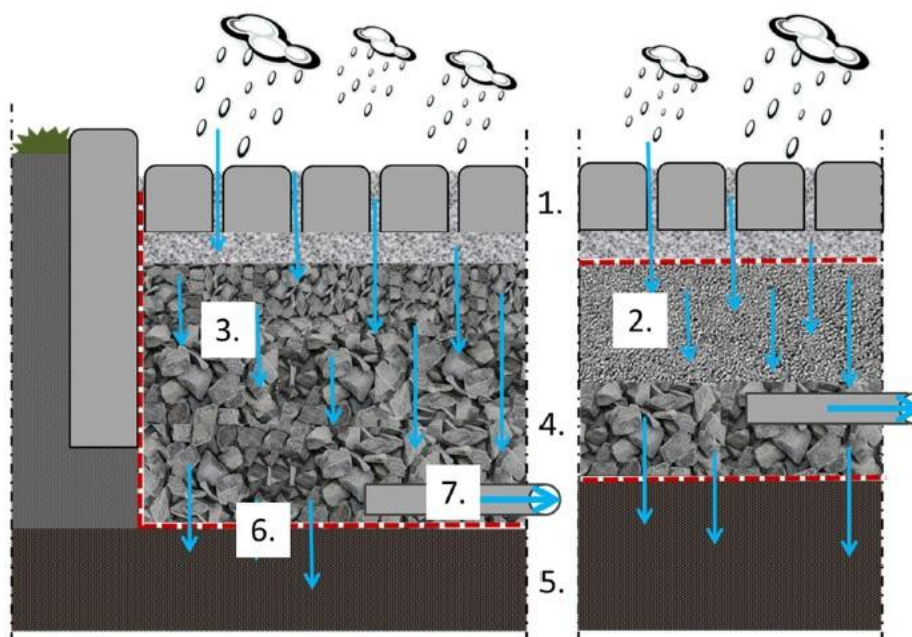
vodami. Odpadá tedy možnost, aby se voda dostala do spodních vod, jejichž hladina neustále klesá. Člověk tímto výrazně narušuje koloběh vody znázorněný na obrázku (obr. 1.2).



Obr. 1.2 Zobrazení hydrologického cyklu [O2]

## 1.2 Použití PC jako součást vodopropustného systému

Z výše uvedeného je patrné, jak velký problém by pomohl vodopropustný beton respektive povrchový systém vyřešit. Nejedná se totiž pouze o jednu vrstvu, ale o skladbu či souvrství, skrz které bude voda plynule procházet. Spodní vrstvy jsou reálně vyřešeny v podobě různých násypů z frakcí hrubého kameniva, případně stmelené cementem, takzvané KSC, v případě potřeby vylepšení kvality podkladu. Součástí může být i geotextilie a drenážní trubky pro případ, že se celý systém zahltí vodou při dlouhodobém dešti nebo tzv. bleskové bouře o extrémní intenzitě. Příklad takového vodopropustného systému můžeme vidět na následujícím obrázku (obr. 1.3), přičemž zde tvoří vrchní vrstvu dlažba, která by v budoucnu mohla být také lisována z vodopropustného betonu.



Obr. 1.3 Příklad skladby vodopropustného povrchu [O3]

(1. dlažba – v budoucnu PC, 2. vrstva podkladního vodopropustného betonu, 3. cementem stmelené kamenivo, 4. vrstva kameniva hrubé frakce, 5. podloží, 6. geotextílie, 7. drenážní trubka)

Velice podstatnou záležitostí bude stavební dokonalost prováděných prací. Vodopropustný systém vozovek či pochozích ploch bude fungovat pouze v případě, že budou při výstavbě dodrženy zásady, jako je překonání, respektive založení, stavby pod úrovní tzv. nezámrazné oblasti a s tím spojené dodržení tloušťky násypu vrstev, které jsou součástí systému. Pokud bude kterákoliv z podmínek porušena, je velká šance, že systém nebude plnit svou funkci nebo bude zkrácena jeho životnost.

Aplikace tohoto systému zlepší i komfort pro řidiče a chodce. Na takto vytvořeném povrchu totiž nebude „stát“ voda a zamezeno tak bude smyku vozidel, případně uklouznutí chodců. V zimních měsících by neměla vznikat ledovka na tomto povrchu, protože je předpoklad, že povrch bude stále „suchý“.

Další nespornou výhodou by přinesl tento systém v oblastech se smíšeným odvodem dešťových a splaškových vod. Tato směs vod musí všechna procházet přes čističku odpadních vod, i když dešťová voda byla na vstupu do kanalizace „čistá“. Výrazně se tak navyšuje množství vody, které musí ČOV zpracovat. Druhý fakt potvrzující nevýhodu tohoto mísení je platba stočného za každý čtverečný metr odkanalizované plochy státního pozemku právě za

činnost ČOV. Vodopropustný systém by tedy zaručil vyřešení i této finanční zátěže pro obce a města a také by ulevil zátěži čističkám odpadních vod.

### **1.3 Požadavky na vodopropustné betony**

Jedinou technologicky nevyřešenou vrstvou vodopropustného systému je tedy horní vrstva vodopropustného betonu, která bude přímo ovlivňována faktory vzniklými vlivem provozu. Prvním požadavkem na vodopropustný beton bude pevnost, které je úzce spjata s vodopropustností respektive porozitou betonu. Stále platí zásada, že čím více pórů beton obsahuje, tím horší budou jeho fyzikálně mechanické vlastnosti. S tím je spojena i odolnost proti obrusu. Uspokojivé vlastnosti musí PC splňovat i v případě působení mrazu za přítomnosti chemických rozmrazovacích látek. Tím, že bude struktura PC velmi otevřená a pórovitá, očekává se tato odolnost menší. Řešením by ovšem mohlo být použití provzdušňující přísady, která by zajistila vznik účinných pórů a mrazuvzdornost by tak mohla být vylepšena.

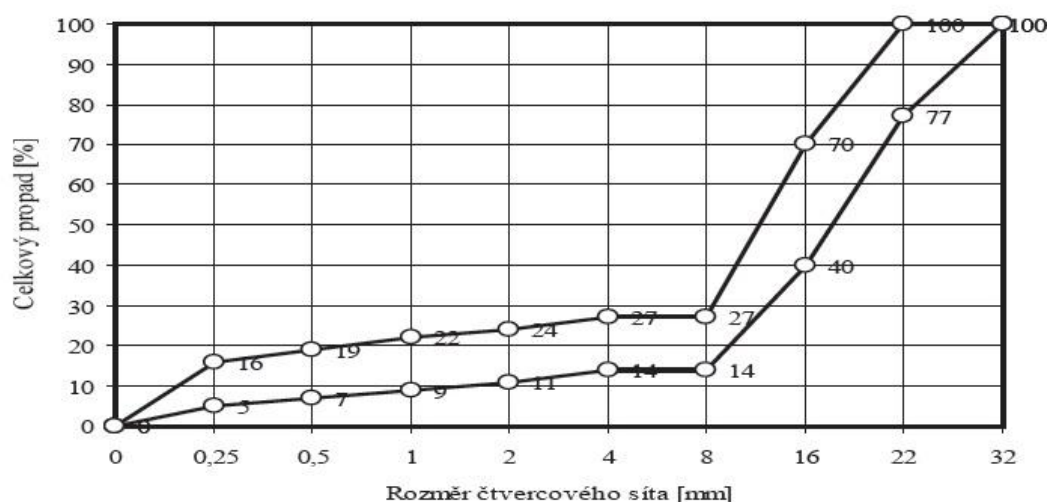
Problémy a z toho pramenící požadavky budou vznikat i v provozu. Poletující prachové částice, písek a další nečistoty budou postupně zanášet pórovou strukturu PC, což by mohlo vést až k jeho ucpání. Tomuto jevu zabrání pravidelná údržba v podobě odsávání nečistoty z povrchu betonu.

## 2 Betony s podobnou technologií

Protože je výroba vodopropustných betonů v našich podmínkách velkou neznámou a vývoj je na samém začátku, je potřeba si najít betony s obdobnou technologií, od kterých je možné se prakticky odrazit a převzít část již známých a ověřených informací. Mezi ty známé a obdobné patří bezesporu mezerovitý beton, který sám o sobě také vodu propouští, ovšem jeho pevnosti a odolnost vůči mrazu či CHRL jsou horší. Co se týče ukládání a hutnění vodopropustného betonu, zde budeme čerpat z technologie takzvaných silničních betonů nebo lépe válcovaných betonů (RCC).

### 2.1 Mezerovitý beton

Mezerovitý nebo také drenážní beton slouží zpravidla jako podkladní část konstrukce, ze které usnadňuje odtok vody skrze svou strukturu. Jedná se o beton složený tradičně z cementové kaše a kameniva, přičemž křivka zrnitosti směsi kameniva je přetržitá a frakce kameniva jsou míchány tak, aby došlo k vytvoření mezerovité, nikoli hutné struktury. Množství cementu je dáno požadovanou pevností, ale zpravidla se jedná pouze o minimální množství potřebné k obalení hrubých zrn kameniva. Maximální zrno kameniva těchto betonů je dáno aplikací, ale není výjimkou, že dosahuje velikostí až 32 mm. Příklad křivky zrnitosti dokumentuje následující obrázek (Graf 2.1).



Graf 2.1 Příklad křivek zrnitosti mezerovitého betonu [O5]

Z důvodu vylehčení pro speciální aplikace lze použít i umělé lehčené kamenivo, kupříkladu Liapor a nebo lze napěnit cementovou matici pro další vylehčení. Míchání a



doprava mezerovitého betonu je prakticky totožná, respektive platí zde stejné zásady jako u tradičního hutného betonu. Ukládání a hutnění je odlišné v tom, že nesmí dojít k dodatečnému přidání zásadního množství záměsové vody a tedy naředění směsi, protože by mohlo dojít k odtoku této vody a části cementu do spodní části konstrukce. Čerstvá směs mezerovitého betonu je zpravidla pouze zavlhlá a proto probíhá hutnění pomocí válcování či dusání. Vzhledem k otevřenosti struktury je mezerovitý beton citlivý na odpaření záměsové vody ze směsi a proto musí být směs zrající na přímém slunečním svitu přikrytá. [3]

Použití mezerovitého betonu je úzce spojeno, jak již bylo výše zmíněno, s odvodem vody z konstrukce či z jejího okolí. Předností tohoto betonu je jeho drenážní schopnost. Slouží tedy jako podkladní vrstva vozovek či parkovišť.

## **2.2 Válcované betony (RCC)**

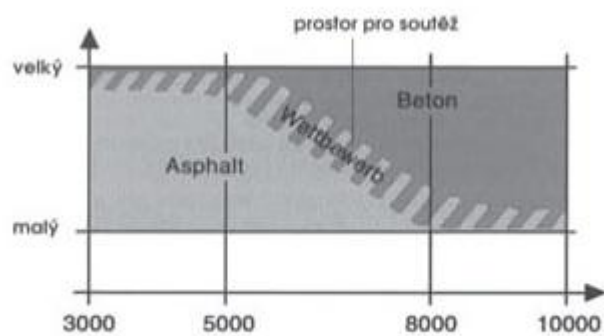
Jak již bylo zmíněno v úvodu, technologie ukládání a hutnění tohoto betonu je velmi podobná betonům vodopropustným. Taktéž vybrané vlastnosti a výhody jsou podobné u obou druhů betonů. Válcovaný beton je míchán ze směsi cementu vody a kameniva, přičemž hlavním rozdílem oproti tradičnímu betonu je obsah jemných podílů a písku, čili frakce 0-4 mm. Tato frakce je zastoupena ve větší míře, aby bylo dosaženo těsnější struktury, u které se předpokládá delší životnost a odolnost. Zároveň je třeba, aby hrubé kamenivo, tedy frakce větší jak 4 mm, bylo co nejkvalitnější, aby nedošlo k jeho rozdrčení při hutnění. Kvalita kameniva má zásadní vliv na mechanické vlastnosti výsledné směsi. Po namíchání je směs dovážena na stavby a vsypávána do finišeru, jehož prostřednictvím je směs ukládána. Tloušťka vrstvy takto pokládáné je až 250 mm. Finišer jako takový pracuje na obdobném principu jako při ukládání asfaltové směsi. Pohled na finišer při pokládce betonové směsi ukazuje obrázek (Obr. 2.2). Následné hutnění betonu je prováděno pojezdem silničními tandemovými válci. Při tomto válcování, respektive hutnění, dojde k přiblížení zrn kameniva k sobě, tak že mezi zrny je pouze malá vrstva cementového tmele, což zlepšuje pevnostní charakteristiky. Výhodou je i možné snížení dávky cementu, kterého je potřeba díky tomuto typu hutnění méně.



Obr. 2.2 Pokládka betonové směsi finišerem [O6]

Výsledné vlastnosti tohoto betonového krytu vozovek jsou bezesporu trvanlivost, mrazovzdornost, odolnost vůči CHRL. Pevnostně se pohybujeme od 30 do 50 MPa dle požadavku a dávky pojiva. Z finančního pohledu je RCC velmi zajímavým. Zatímco náklady na pokládku jsou shodné s náklady na pokládku tradičních asfaltových vozovek, následná úspora přichází posléze. Cementobetonové kryty disponují mnohem menšími náklady na údržbu a opravy. Například vznik vyjetých kolejí, není u tohoto typu vozovek možný v porovnání s asfaltovými. Dlouhodobé náklady na údržbu tak klesají až o 30 %. [4]

Oblíbenost použití betonových vozovek nadále roste s hustotou provozu. Aplikace betonového povrchu je nutná v místech s vysokým výskytem těžkých nákladních vozidel, u kterých je předpoklad, že vytvoří zmíněné vyjeté koleje u asfaltových povrchů. O některých hlavních tazích lze mluvit dokonce jako o přetěžovaných a proto bylo v Německu v roce 2001 vytvořeno a uvedeno do praxe tzv. rozhodovací schéma pro výběr konstrukce vozovky (obr. 2.3). Toto rozhoduje o použití buď asfaltového, nebo betonového povrchu na základě průměrného počtu těžkých nákladních vozidel, které projely za den. [6]



Obr. 2.3 Schéma rozhodování pro výběr konstrukce vozovky [O9]

Některé technologické postupy a výsledné vlastnosti tohoto typu betonu budou podobné i u betonu vodopustného a proto je možné čerpat zkušenosti nabyté z tohoto odvětví.

### 3 Složení vodopropustného betonu

Z výše popsaných požadavků na vodopropustný beton pramení návrhy různých receptur tohoto materiálu. Důležitým aspektem je smíchání různých frakcí kameniva, respektive vytvoření vhodné křivky zrnitosti tak, aby byl beton zároveň propustný pro kapaliny, ale zároveň nesmí být struktura příliš pórovitá, aby nedocházelo k enormním ztrátám pevnosti. Nabízí se varianta použít drcené kamenivo s horším tvarovým indexem. Zvláště citlivá bude směs na dávkování vody. Předpokládá se, že směs bude pouze zavlhlá a nesmí dojít k předávkování vodou, což by vedlo k následné segregaci, případně rozmísení. Konkrétně hovoříme o vodním součiniteli 0,27 – 0,33. Vedle cementu lze použít i různé přísady, či příměsi pro upravení vlastností směsi. Směs vodopropustného betonu je velmi citlivá na dávkování vody za použití plastifikační přísady i bez ní. Předávkování směsi vodou bude znamenat odloučení části příliš tekuté cementové kaše/mléka od zrn kameniva a usazení ve spodních částech vytvořené konstrukce. Tento jev výrazně zhorší nebo úplně zabrání vodopropustnosti ve ztvrdlém stavu. Příklad oddělení cementového mléka lze pozorovat na následujícím obrázku (Obr. 3.1) z laboratorního prostředí, kde došlo k usazení cementového mléka na dno formy.



Obr. 3.1 Příklad usazení cementového mléka na dno formy při předávkování směsi vodou [O3]

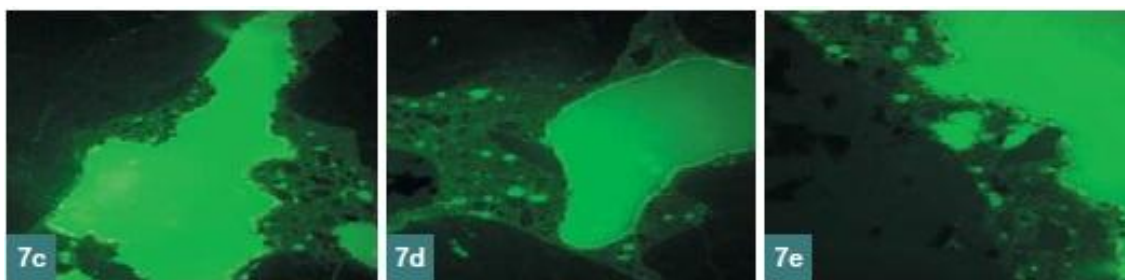
#### 3.1 Cement, přísady, příměsi

Ve finském výzkumu pracovali s cementy spadající do II. Skupiny, tedy portlandské směsné, konkrétně CEM II s vápencem a struskou. [1] V našich podmínkách je rozšířeno použití spíše CEM I s možností přidání příměsí přímo do míchané směsi v dávce dle potřeby.

Vzhledem k tomu, že cementová matrice bude muset odolávat účinkům mrazu a chemických rozmrazovacích látek, které budou navíc působit na mnohem větší ploše na tuto matici a to skrze mezerovitou strukturu, bude vhodné vytvořit matici ze směsi cementu a popílku a využít tak mikroskopického utěsnění struktury matrice, vlivem vznikajících druhotných C-S-H gelů, reakcí silikátů z popílku a produktů hydratace cementu. Použití popílku je výhodné i z důvodu toho, že vzroste množství jemných podílů (do 0,25 mm), které jsou zapotřebí k obalení zrn hrubého kameniva a slepení těchto zrn k sobě. Z dalších příměsí lze použít například mikrosiliku, u které předpokládáme podobný efekt jako u popílku. Po finanční stránce je ovšem mikrosilika méně vhodná.

Použití přísad do směsi vodopropustného betonu je taktéž možné. Nabízí se použití plastifikační přísady, která docílí snížení množství použité záměsové vody. Reálně se dostáváme až na hodnoty vodního součinitele  $w = 0,27$ . Podstatné je použít pouze takové množství vody, aby byla spotřebována na navlhčení kameniva a hydrataci cementu. Přebytečná voda by dle známých teorií odcházela ze směsi během hydratace a narušila by tak strukturu cementové matrice vytvořením podlouhlých mikropórů směřujících až k povrchu. Do těchto pórů by při užívání vnikala voda a při mrazovém zatížení by mohlo dojít k destrukci. Nevýhodou je i pokles pevností při vzniku těchto kapilárních mikropórů.

Další přísadou, u které se předpokládá vylepšení vlastností směsi vodopropustného betonu, je provzdušňující přísada. Použití této přísady zaručí vytvoření účinných mikropórů (póry do velikosti 0,3 mm) v cementové matici, které se skrze viskózní vlastnosti vody zaplaví pouze do 60 %. I přes to, že dojde k zamrznutí vody, v pórech je dostatek prostoru pro nárůst objemu při přeměně vody v led a nedojde k destrukci. Cementová matrice je tak více odolná respektive mrazuvzdorná. Platí ovšem různé zásady při použití této přísady. V první řadě by mohlo dojít k ovlivnění funkčnosti přísady přidáním některé příměsí, proto je nutné vyloučit ze směsi popílek, i když je výše popsáno jeho kladné působení. V druhé řadě je problém s poklesem pevnosti vlivem vytvoření mikropórové struktury cementové matrice. Pevnost klesá lineárně, s 1 % provzdušnění 5 % pevnosti. Přítomnost účinných mikropórů v PC lze sledovat na následujícím obrázku (Obr. 3.2) pod mikroskopem (osvětlení UV – světlo).



Obr. 3.2 PC s provzdušněnou cementovou matricí pod mikroskopem (osvětlení UV – světlo) [O4]

Velmi důležitým technologickým krokem při použití provzdušňovací přísady je etapa míchání. Vzhledem k tomu, že betonová směs neobsahuje příliš velké množství vody, předpokládá se, že reakce přísady a tudíž vytvoření vzduchových účinných pórů bude trvat delší dobu. Co se týče konkrétních postupů tak nejprve do míchačky dávkujeme kamenivo, tradičně od hrubého po jemné, následně přidáme menší množství záměsové vody tak, aby bylo kamenivo ovlhčeno. Poté přidáváme cement případně příměsi a zbylou záměsovou vodu včetně přísad. Nastává fáze míchání, která může trvat až 5 minut, aby provzdušňovací přísada účinně zareagovala a vytvořila směs s vylepšenou mrazuvzdorností [1].

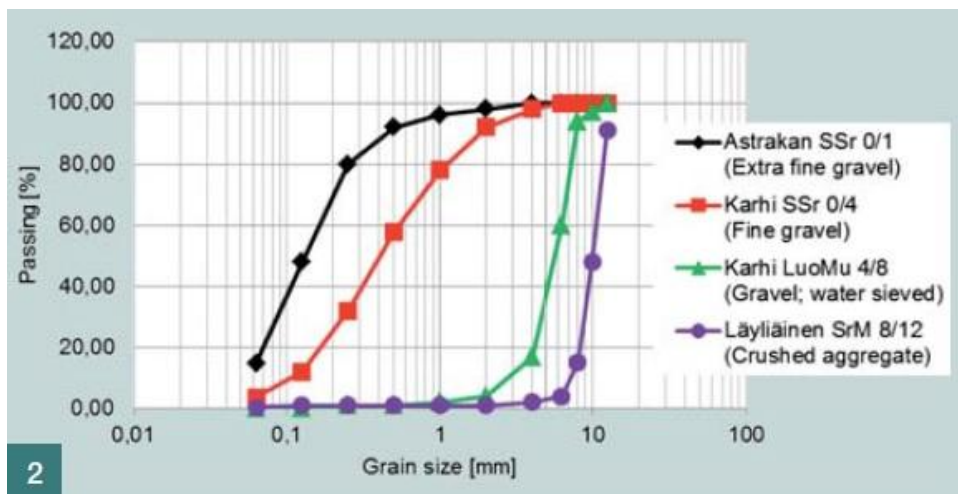
Použití dalších přísad a příměsí případně jiných druhů cementů není vyloučeno, vždy záleží na konkrétním požadavku při dané aplikaci.

### 3.2 Kamenivo

Do receptur vodopropustného betonu lze použít jak drcené, tak i těžené kamenivo. O výběru zpravidla rozhoduje dostupnost kameniva v dané lokalitě. Z dostupných výzkumů ovšem vyplývá, že zřejmě lepší volbou bude kamenivo drcené. Horší tvarový index kameniva v porovnání s těženým kamenivem zaručuje vznik mezerovité struktury, což je žádoucí. Výhodou jsou i jeho fyzikálně mechanické vlastnosti. Naopak nevýhodou je jeho členitý povrch vzniklý při drcení, tento je potřeba obalit cementovou kaší, které je spotřebováno víc, než na obalení zrn kameniva těženého. Posledním parametrem mírně negativním je vyšší cena tohoto kameniva.

Nejpodstatnější záležitostí je optimalizovat křivku zrnitosti pro vodopropustný beton tak, aby kamenivo vytvářelo propustnou, mezerovitou kostru. Co se týče rozsahu použitých frakcí kameniva, tradičně použijeme frakce 0-4 mm, 4-8 mm a 8-16 mm. Ve finském výzkumu byla použita ještě frakce 8-12 mm na místo 8-16 mm, ovšem v českých podmínkách

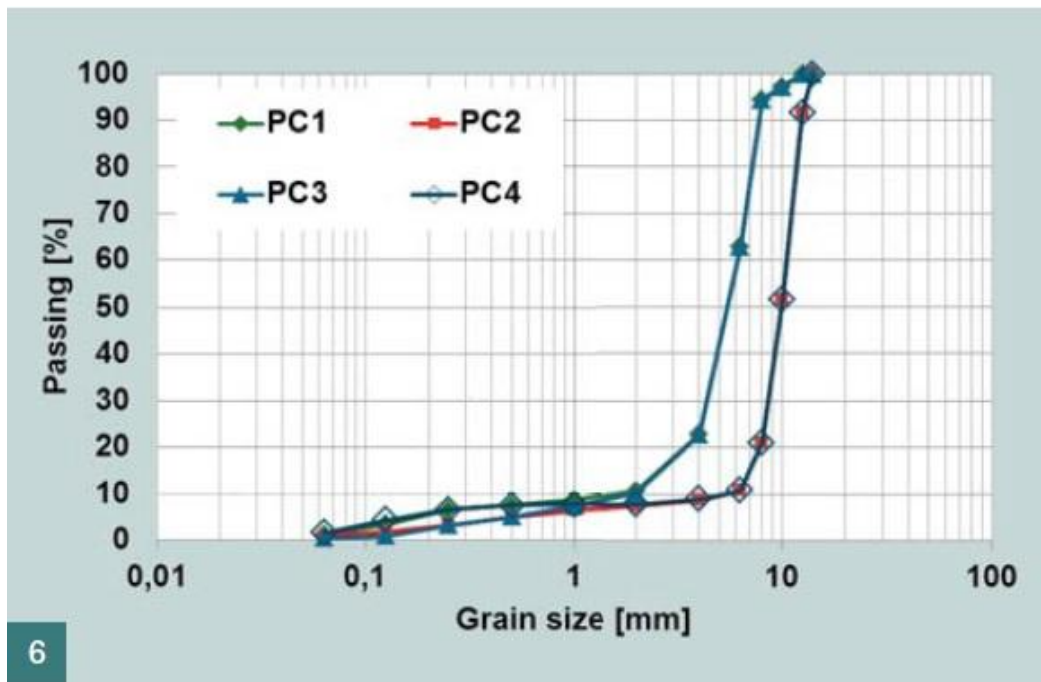
není tato frakce rozšířenou a proto se prosazují receptury s kamenivem o rozsahu zrnitosti 0-8 mm nebo 0-16 mm. Příklady křivek zrnitosti jednotlivých frakcí kameniv použitých ve finském výzkumu dokumentuje následující graf (Graf 3.3).



Graf 3.3 Křivky zrnitosti kameniv použitých ve finském výzkumu [O4]

Následné smíchání frakcí kameniv probíhá tak, aby došlo k vytvoření již zmíněné mezerovité struktury. Absolutně zde odpadá možnost použití vzorců pro míchání kameniva jako je Fuller nebo EMPA I či EMPA II, které pracují na principu vytvoření maximálně hutné struktury bez mezer což je v tomto případě nežádoucí.

Následující graf, respektive křivka zrnitosti (Graf 3.4), zobrazuje optimalizované křivky zrnitosti z finského výzkumu, které se podařilo vytvořit. Při použití kameniva s těmito křivkami zrnitosti se podařilo vytvořit betonovou směs s nejlepšími parametry jak pevnostními, tak mrazuvzdornými s odpovídající vodopropustností.



Graf 3.4 Optimalizovaná křivka zrnitosti kameniva použitá ve Finsku [O4]



## 4 Ukládání a hutnění v závislosti na aplikaci PC

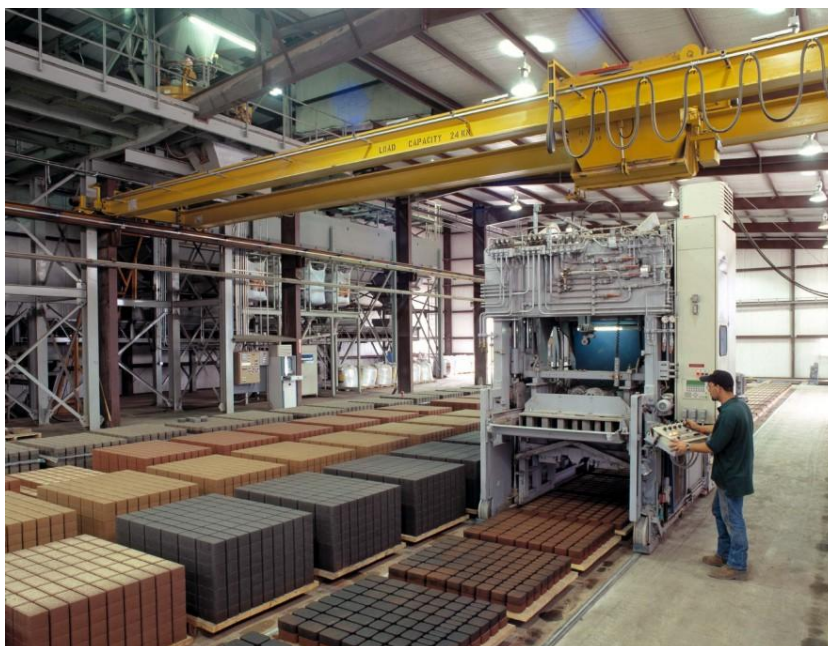
Tak jako tradiční výrobky z betonu se dá dle druhu respektive místa výroby i výrobky z vodopropustných betonů rozdělit na dílce vyráběné v prefabrikované výrobě, které se na stavbu dodají jako již hotové, nebo naopak konstrukce, vyráběné až na stavbě, čili v in-situ. Podle tohoto se bude lišit i způsob ukládání a hutnění betonové směsi. Právě ukládání a hutnění má zásadní vliv na výsledné vlastnosti tohoto betonu. Směs nebude nikterak tekutá, předpokládá se vodní součinitel okolo 0,27 – 0,40, proto bude potřeba vyvinout větší množství energie na hutnění.

Ve výrobě prefabrikovaných dílců lze beton hutnit lisováním případně vibrolisováním podobně jako sortiment zámkových dlažeb či dlažebních dílců obecně. Na stavbě to bude zejména tvorba povrchů za použití finišeru s následným válcováním.

### 4.1 Lisování a vibrolisování čerstvého PC

Tímto druhem ukládání a hutnění lze vyrobit sortiment dlažeb v prefabrikovaných výrobcích. Použití tohoto druhu betonu pro tento sortiment je rozhodně pozitivní, protože lze využít předností PC v kombinaci s podkladním systémem. Samotné lisování betonových prvků je prováděno například na karuselovém lisu nebo je lisování obvyklé v kombinaci s vibrováním. Tento způsob hutnění je vhodný u zavlhých směsí, kterou PC rozhodně je. Betonová směs je dopravena do forem zpravidla pásovým dopravníkem a množství směsi je odměřeno objemově při samotném dávkování do forem. Směs je následně lisována do forem za současné vibrace. Kmitá nejen forma, ale i razník, kterým je směs lisována. Amplitudy vibrace razníku a formy se nesmí překrývat tak, aby nedošlo k vyrušení vibrace. Zároveň nesmí být lisovací tlak tak veliký, aby nedošlo opět k anulaci vibrace. Reálné lisovací tlaky se pohybují do 0,2 MPa. Zvýšení lisovacího tlaku je možné, ovšem toto již nemá větší vliv na hutnost výrobku. Snižuje se tím porozita cementového tmele, což vede ke zvýšení pevností a naopak ke snížení vodopropustnosti [5].

Vibrolis může být statický nebo mobilní dle požadavků a uspořádání výroby. Mobilní vibrolis pro výrobu dlažby je zobrazen na následující obrázku (Obr. 4.1).



Obr. 4.1 mobilní vibrolis pro výrobu dlažby [O7]

Výhodou takto vyrobených prvků je jejich vysoká počáteční, respektive manipulační pevnost, díky které lze výrobek přemístit do zracího pole bez rizika jeho poškození.

## 4.2 Válcování čerstvého PC

Válcování čerstvého vodopropustného betonu bude probíhat zejména na stavbě a tomuto procesu hutnění bude předcházet několik dalších přípravných procesů. Po namíchání betonové směsi opět s nízkým vodním součinitelem do  $w=0,4$  přepravujeme na stavbu. Směs je pouze zavlhlá a proto není možné využít autodomíchávače, ale obyčejný sklápěč pro převoz sypkých látek s možností zakrytí korby. Hrozí pouze odpaření části záměsové vody ze směsi, rozmísení nebo krvácení nehrozí. Na stavbě je směs přesypána do násypky finišeru, který směs uloží na požadované místo v požadované tloušťce na předem připravený podklad. Velmi důležitou a tudíž nutnou technologickou operací je následné hutnění válcováním. Toto probíhá silničními tandemovými válci podobně jako v technologii hutnění asfaltových povrchů. Tandemové válce hutní povrch působením vlastní hmotnosti, která dle typu stroje dosahuje až 20 tun. Během tohoto procesu dojde k přiblížení zrn kameniva a jeho spojení s cementovou kaší za použití co nejmenšího množství této kaše. Výsledkem operace je zvýšení pevnosti ztvrdlého betonu. Technologie vychází ze znalosti ultra vysoce pevnostních betonů, kde dosažení pouze minimální tloušťky cementového kamene (tranzitní zóna) mezi

zrny kameniva vede ke zvýšení pevnosti a to proto, že cementový kámen je kritickým, méně pevným bodem ve struktuře betonu v porovnání s kamenivem. I v případě válcovaných vodopropustných betonů dojde k výše zmíněnému přiblížení zrn kameniva a zároveň tak ke zmenšení tloušťky tranzitní zóny ve struktuře. I proto je potřeba upravit dávku cementu tak, aby sloužila pouze k primárnímu obalení povrchu hrubých frakcí kameniva. Ukázkou válcování betonové směsi lze sledovat na následujícím obrázku (Obr. 4.2).



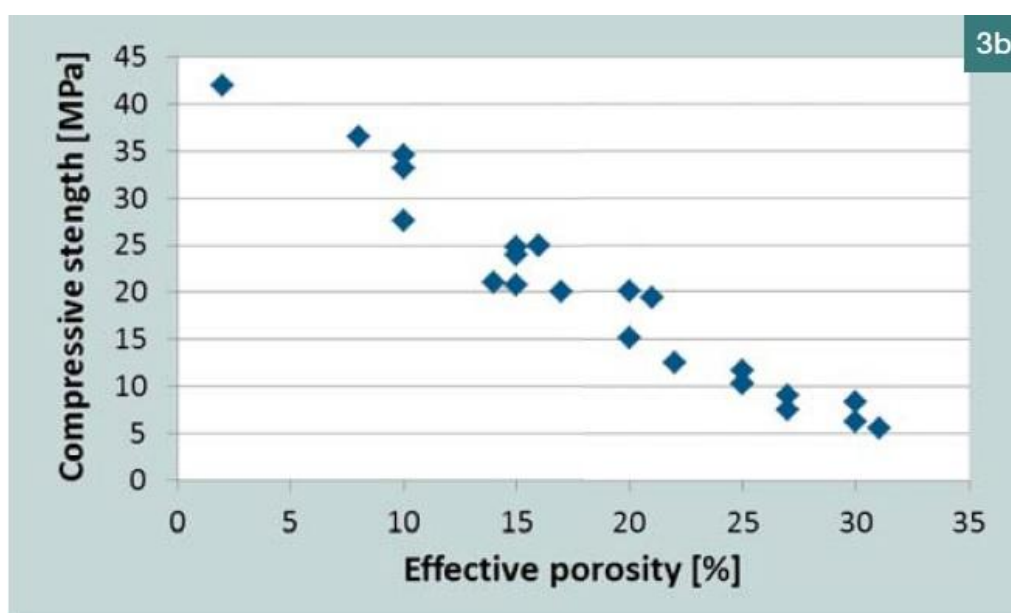
Obr. 4.2 Válcování betonové směsi jako druh hutnění [08]

## 5 Předpokládané vlastnosti PC

Vodopropustný beton je svou mezerovitou strukturou zásadně odlišný a proto i výsledné fyzikálně mechanické vlastnosti budou zcela odlišné v porovnání s tradičním betonem. Nově vzniklou vlastností u tohoto druhu betonu bude vodopropustnost kapaliny. Doposud české normy nemají zkoušku či přepis jak tuto vlastnost zkoušet a proto bude třeba tyto postupy vytvořit a normalizovat – viz kapitola 6.

### 5.1 Mezerovitost a pevnosti PC

Mezerovitost vodopropustných betonů je zcela zásadní pro prostup kapaliny tímto betonem. Z již známých výzkumů je ovšem patrné, že se stoupající mezerovitostí, respektive vodopropustností, klesá pevnost betonu, což je zcela logické. Efektivní pórovitost pro uspokojivou vodopropustnost je 15 – 30 %. Mezery ve struktuře jsou od 1 do 8 mm. S touto porozitou je úzce spojena i objemová hmotnost, která činí okolo 70 % v porovnání s tradičním hutným betonem, konkrétně se tedy dostáváme k hodnotám 1600 – 2000 kg/m<sup>3</sup> [1]. Vliv pórovitosti na pevnosti v tlaku dokumentuje následující graf (Graf 5.1).



Graf 5.1 Pevnost v tlaku PC v závislosti na efektivní pórovitosti [O4]

Pokles pevnosti v tlaku bude znamenat i pokles dalších parametrů, které jsou úměrné. Mezi tyto patří pevnost v tahu za ohybu a taktéž moduly pružnosti. Modul pružnosti závisí na množství cementu, respektive jemných podílů a vzduchových mezer. Již z teoretické části víme, že zastoupení výše vyjmenovaných bude veliké a proto modul pružnosti bude nízký. Na

druhou stranu modul pružnosti v obyčejném betonu roste s použitím kvalitního kameniva v co největší dávce zejména hrubé frakce, což by mělo být splněno.

Pro dosažení lepší mrazuvzdornosti lze aplikovat provzdušňovací přísadu, která zajistí vytvoření efektivní mikropórů v cementové matrici.

## 5.2 Obrusnost

Zásadní vlastností u vodopropustných betonů bude obrusnost. Tento druh betonu bude tvořit finální vrstvu pojížděných a pochozích povrchů, proto bude denně namáhán právě na o brus. Povrch vodopropustného betonu je členitý a to z důvodu nutnosti otevřené struktury pro prostup kapaliny. Předpokládá se, že při zkouškách obrusnosti by mohlo docházet k vytržení zrn kameniva z cementové matrice, což je nežádoucí. Členitý povrch betonu dokumentuje následující obrázek (Obr. 5.2).



Obr. 5.2 Povrch vodopropustného betonu

Kladnou vlastností u vodopropustných betonů je adheze mezi vytvořeným povrchem a kolem automobilu. Přílnavost nebo také adheze by měla být lepší, protože povrch vodopropustného betonu je drsnější. Pozitivní je i vyloučení tvorby vodních ploch (louží) na povrchu a tedy zabránění aquaplaningu čili smyku vzniklém v důsledku jízdy na mokřém povrchu.

### 5.3 Mrazuvzdornost a odolnost vůči CHRL

Diskutovanou vlastností u PC je mrazuvzdornost a také odolnost vůči chemickým rozmrazovacím lákám. Požadavky jsou stanoveny normou a je nutné jim vyhovět. V první řadě je zásadní, aby celkově vodopropustný systém byl navržen tak, aby nedocházelo k jeho destrukci vlivem mrazového zatížení. Zejména se jedná o dodržení hloubky založení pod úroveň, do které mráz již nezasáhne. Dále je nutné zajistit dobrou drenážní schopnost systému tak, aby v něm nezůstávala voda, která by mohla zamrznout. V extrémních případech se dokonce počítá s možností, že se celý systém při zamrznutí nadzvedne [1]. Samotný vodopropustný beton, jakožto horní vrstva systému, by neměla být zaplavena vodou, která by se následně změnila v led, což ohrožuje beton jako takový.

Vodopropustný beton má skrze mezerovitost velký měrný povrch a proto má voda přístup do celého průřezu. Nasycení cementové matrice vodou tedy hrozí v celém objemu betonu, proto je nutné ho technologicky ochránit proti možné destrukci způsobené mrazem. Jednou z možností je provzdušnění matrice jak se popisuje v kapitole 3.1.

Odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám bude další problematickou záležitostí. Ochranu před těmito látkami technologicky zajistíme utěsněním cementové matrice. Toto by se v reálu mohlo podařit použitím popílku či mikrosiliky, což je opět popsáno v kapitole 3.1.

### 5.4 Smrštění a dotvarování

Smrštění vodopropustného betonu bude záležet na množství použitých jemných podílů a vody. Protože k docílení potřebných pevností bude dávka cementu zřejmě vyšší (uvažuje se více jak  $300 \text{ kg/m}^3$ ), má tato směs sklon k většímu smršťování při zrání a tudíž k tvorbě trhlin v cementové matrici. Na druhu stranu smrštění je menší se snižujícím se vodním součinitelem, který se bude reálně pohybovat pod hodnotami  $w = 0,4$  a tím se smrštění eliminuje.

Vzhledem k tomu, že se dotvarování betonu týká zejména betonů stále zatížených (předpjaté prvky atd.), což tento typ betonu nebude, dotvarování se neuvažuje.

## 5.5 Další vlastnosti PC

Další nespornou výhodou povrchu tvořeného vodopropustným betonem v porovnání s asfaltovým povrchem je v jeho barvě. Světle šedá barva betonu je výhodnější z hlediska světelné emisivity, což znamená, že odrazivost světla z povrchu je větší a okolí je tedy více osvětlené. Tohoto lze využít jak u komunikací, tak u parkovacích či skladovacích prostor, kde tudíž není potřeba tak silného umělého osvětlení. Dojde tak k možné úspoře energií.

Další významnou ovšem neověřenou vlastností tohoto betonu je jeho teplotní roztažnost a nutnost dilatovat plochy z něj vytvořené. Předpokládá se teplotní roztažnost betonu mírně nižší než u tradičního hutného betonu. V případě zvýšení teploty se beton roztáhne do mezer, které ve svém objemu skrývá, tudíž by dilatační celky mohly být výrazně větší.

## **6 Nedostatky PC spojené s provozem**

Jestliže budou pojízdny plochy a komunikace vytvořeny vodopropustným systémem včetně vodopropustného betonu, reálně hrozí řada problémů, které vyplynou v důsledku provozu. Tím prvním je zanášení mezer ve struktuře betonu prachem případně sypkými látkami malých frakcí, které se na povrch betonu dostanou. Druhým problémem podobného charakteru je nálet cizorodých částic rostlinného původu. V praxi to znamená, že mezerovitý, respektive vodopropustný beton, je výborným místem pro růst rostlin ze semínek přiletěných z okolí do této konstrukce. Kořeny rostlin mohou v určitých případech beton vnitřně porušit svým tlakovým růstem. Obdobný případ nastane, jestliže dojde k prorůstání kořenů stromů z okolí konstrukce do tohoto systému.

Krizové situace vznikající při použití vodopropustného systému mohou nastávat při haváriích na komunikacích. Jakmile dojde k úniku ropných produktů z havarovaných aut, nic nebrání jejich úniku do země skrze vodopropustný systém. Tento problém by měl být nadále řešen a rozebrán.



## 7 Zkouška vodopropustnosti PC

Velmi potřebnou zkouškou k porovnání kvality vodopropustných betonů je zkouška vodopropustnosti, která v ČR úplně chybí. Na tento nedostatek narazili i Finové ve svém výzkumu a proto zároveň vyvíjeli zkoušku, kterou by vodopropustné betony mohli testovat. Pro prvotní ověření, jestli je propustnost betonu možná, využili obyčejné PVC trubky spojené s povrchem betonu silikonem. Následně do tohoto prostoru nalévali množství vody a sledovali propustnost tak, jak to dokumentuje následující obrázek (Obr. 7.1). [1]



Obr. 7.1 Měření průsaku vody metodou prstenců [O4]

Tato metoda ovšem nepřináší plnohodnotné výsledky, protože nalévání vody na povrch betonu není rovnoměrné v celé ploše a není možné tuto vodu na povrch nalít vždy za stejný čas, tudíž měření na různých vzorcích je pouze orientační.



## Praktická část

### 8 Cíl praktické části

Cílem praktické části je navrhnout technologii vodopropustných betonů od prvopočátku. V praxi to znamená, že je potřeba navrhnout jak samotné směsi vodopropustných betonů, tak i ukládání a hutnění směsi do forem případně v in-situ. Takto vytvořené směsi betonu je nutné odzkoušet a zjistit fyzikálně mechanické parametry a tedy pevnosti v tlaku, mrazuvzdornost, případně obrusnost. Rozhodující bude vytvoření a aplikace metodiky zkoušení vodopropustnosti, která v ČR zatím není. S tím je spojeno i vytvoření fungujícího zkušebního zařízení. Co se týče konkrétních hodnot, tak je cílem navrhnout receptury pevnostních tříd C20/25 a C 30/37 s dostatečnou vodopropustností a za současné odolnosti vůči mrazovému působení dle požadavků ČSN EN 73 6124-1 *Stavba vozovek - Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění a kontrola shody* [N1].

## 9 Metodika práce

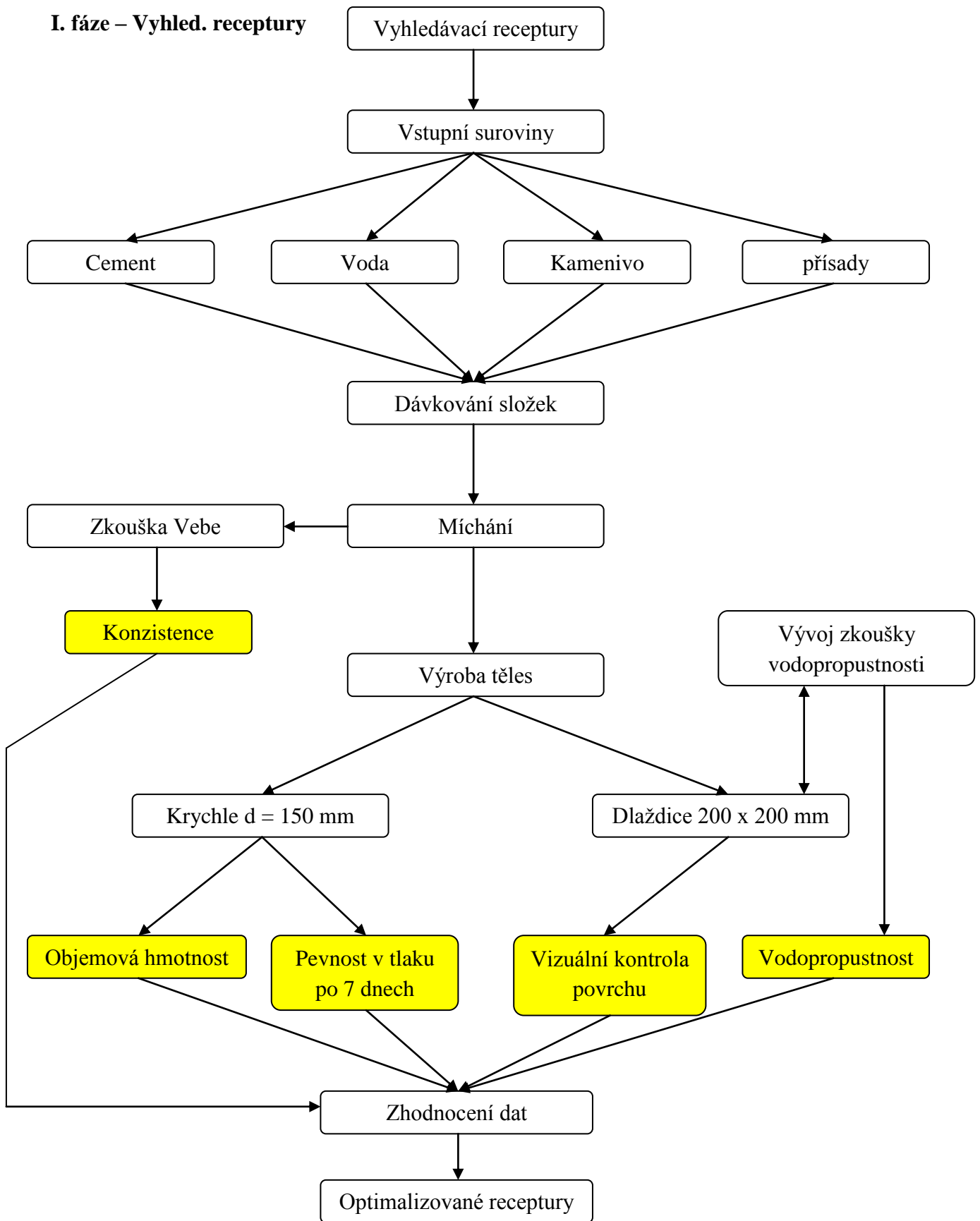
Metodika práce návrhu technologie vodopropustných betonů je rozdělena do dvou fází, které na sebe navazují. V I. fázi praktické části bude nutné vybrat vhodné vstupní suroviny a následně navrhnout tzv. „vyhledávací“ receptury, tyto namíchat a v čerstvém stavu změřit konzistenci, která bude velmi rozhodující v otázce chování směsi a následné vodopropustnosti. Dále je třeba vyzkoušet a rozhodnout a způsobu uložení a hutnění směsi do forem. Zpravidla se budou vyrábět tělesa na určení tlakové pevnosti a tedy krychle o hraně 150 mm a dále pak tělesa pro zkoušky vodopropustnosti a tedy „dlaždice“ o půdorysném rozměru 200 x 200 mm a tloušťce 100 mm. Ve ztvrdlém stavu je potřeba odzkoušet fyzikálně mechanické parametry tedy pevnost v tlaku. Tato bude měřena po 7 dnech zrání, což je pro prvotní představu dostačující. Současně bude zaznamenána objemová hmotnost. Dále pak bude provedena vizuální kontrola povrchů betonů s následným zhodnocením o použitelnosti. Na dlaždicích bude ověřována i schopnost vodopropustnosti.

Vývoj a sestavení zkušebního zařízení a celkové metodiky zkoušky vodopropustnosti je řešena v druhé polovině I. fáze této práce. Zařízení musí být sestaveno a použito tak, aby směsi o různých propustnostech byli měřitelné s uspokojivým průběhem a výsledkem, přičemž hodnoty musí být porovnatelné.

Výstupem z první fáze (pro přehlednější zobrazení posloupnosti prací – viz obr. 9.1) je vytvoření tzv. optimalizovaných receptur. Tyto receptury vzniknou na základě porovnání naměřených výše zmíněných parametrů. Rozhodující bude pevnost v závislosti na vodopropustnosti. Velkou váhu bude mít i kvalita povrchu a to skrze jeho možné následné použití. Takto porovnané a následně vybrané receptury budou vstupovat do další fáze.

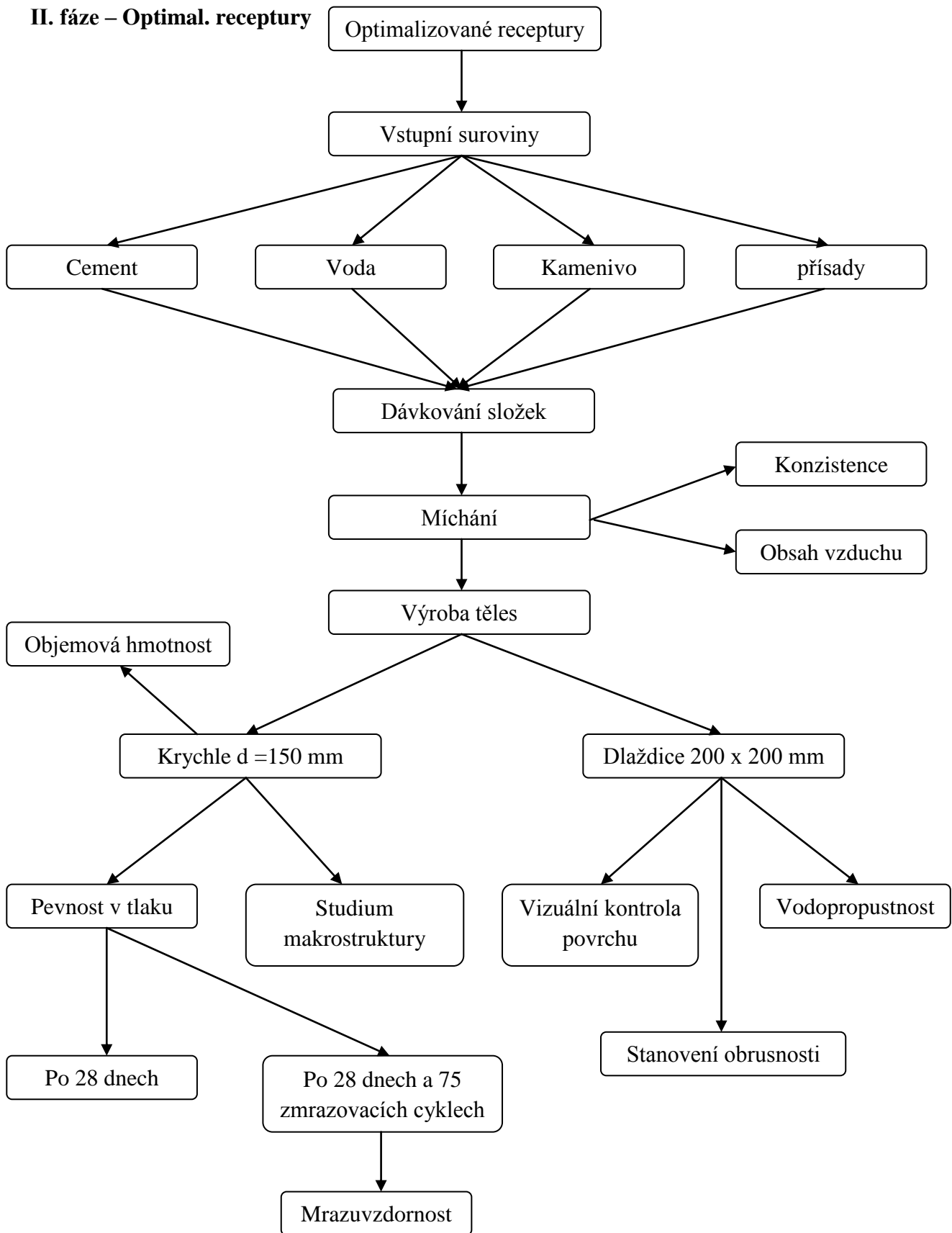
Ve II. fázi této práce se na vybraných recepturách ověří účinnost provzdušňovací přísady. Vzhledem k užití nízkých vodních součinitelů se předpokládá omezená funkčnost této přísady. Pokud bude vše fungovat správně, dojde ke zdvojení počtu receptur právě o receptury s provzdušněním pro zlepšení vlastností při mrazovém zatěžování. Zkušební tělesa budou stejná jako v I. fázi. Na ztvrdlém betonu se budou měřit hodnoty pevností v tlaku po 28 dnech zrání, procentuální vyjádření poklesu pevností v tlaku po 75 zmrazovacích cyklech, stanovení obrusnosti, objemové hmotnosti a vodopropustnosti. Pro lepší přehled vyjadřuje postup prací ve II. fázi následující schéma (obr. 9.2).

I. fáze – Vyhled. receptury



Obr. 9.1 Schéma metodiky práce v I. fázi praktické části této diplomové práce

## II. fáze – Optimal. receptury



Obr. 9.2 Schéma metodiky práce v II. fázi praktické části této diplomové práce

## 10 Vstupní suroviny

### 10.1 Cement

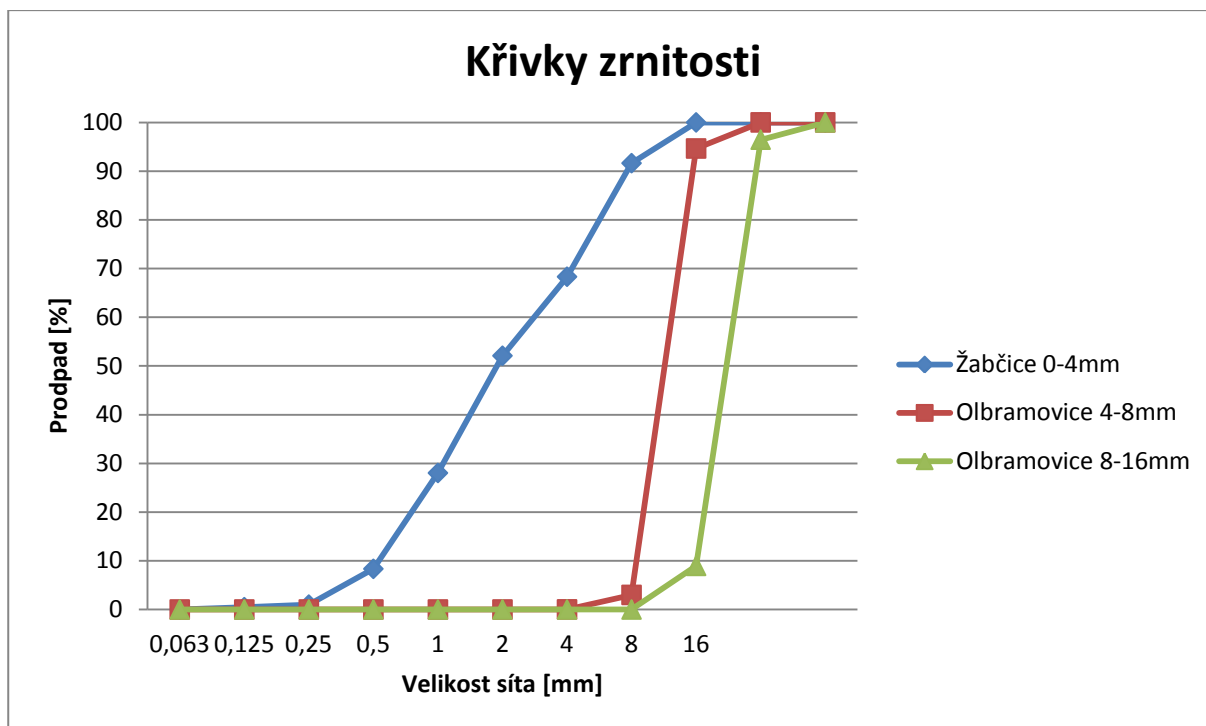
Ve všech recepturách vodopropustných betonů zpracovávané v této části diplomové práce byl použit cement CEM I. 42,5 R. Výrobcem je společnost Českomoravský cement, konkrétně závod Mokrá u Brna. Cement splňuje požadavky normy ČSN EN 197-1 *Cement – Část: Složení, specifikace a kritéria shody cement pro obecné použití* [N2]. Vybrané vlastnosti tohoto cementu lze pozorovat v následující tabulce (tab. 10.1).

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Pevnost v tlaku po 28 dnech	61	[MPa]
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech	9	[MPa]
Počátek tuhnutí	196	[min]
Konec tuhnutí	267	[min]
Měrný povrch	377	[m <sup>2</sup> /kg]
Velikost středního zrna	20	[μm]
Měrná hmotnost	3110	[kg/m <sup>3</sup> ]
Složení slínku:		
C <sub>3</sub> S	67	[%]
C <sub>2</sub> S	11	[%]
C <sub>3</sub> A	7	[%]
C <sub>4</sub> AF	11	[%]

Tab. 10.1 Vybrané vlastnosti použitého cementu CEM I. 42,5 R

### 10.2 Kamenivo

Navrhované směsi obsahovaly kamenivo frakce 0-4 mm z lokality Žabčice, jedná se o těžené, prané kamenivo. Kamenivo této frakce má kulové zrna a neobsahuje znečišťující jílový podíl, který by mohl ovlivnit chování směsi při tuhnutí. Tento druh kameniva byl vybrán skrze dostupnost v okolí Brna a již zmíněnou kvalitu. Další použité frakce konkrétně 4-8 a 8-16 mm byly z lokality Olbramovice. Jedná se o drcené kamenivo uspokojivého tvarového indexu. Důvodem volby tohoto kameniva byly jeho dobré fyzikálně mechanické vlastnosti a také fakt, že se jedná o drcené kamenivo, které dokáže vytvořit svým zaklesnutím do sebe množství mezer ve struktuře betonu, což je v tomto případě přínosem. Křivky zrnitosti vybraných frakcí kameniv lze sledovat v následujícím grafu (graf. 10.2).



Graf 10.2 Křivky zrnitosti použitých frakcí kameniva

Pro doplnění lze sledovat další naměřené parametry použitých frakcí kameniva v následující tabulce (tab. 10.3).

Frakce [mm]	Původ	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Sypná hmotnost - volně [kg/m <sup>3</sup> ]	Sypná hmotnost - setřeseně [kg/m <sup>3</sup> ]
0-4	Žabčice	2550	1270	1630
4-8	Olbramovice	2670	1340	1530
8-16	Olbramovice	2670	1350	1530

Tab. 10.3 Vybrané vlastnosti použitých frakcí kameniva

Prohlášení o vlastnostech udávajících výrobcem těchto kameniv jsou obsaženy v příloze této práce.

### 10.3 Přísady

Pro lepší reologické vlastnosti směsí a zároveň redukci množství záměsové vody byla do směsí přidána plastifikační přísada CHRYSO Plast 461. Jedná se o přísadu na lignosulfonované bázi. Výhodou je její nízká cena a dosažení uspokojivých vlastností. Nevýhodou je mírný retardační účinek, což ovšem u těchto vodopropustných betonů není



problémem. Dávka této přísady se pohybuje v rozmezí 0,25 – 0,8 % z hmotnosti cementu, obvykle 0,6 %.

Druhou použitou přísadou je provzdušňovací přísada CHRYSO Air A. Tato vytváří v betonu stabilní síť mikroskopických bublinek pro zlepšení odolnosti vůči mrazu. Lze ji kombinovat se všemi základními druhy plastifikačních přísad. Samotná provzdušňovací přísada má tendenci směs ztekucovat a redukovat tak další množství záměsové vody. Dávkování se pohybuje v rozmezí 0,04 – 0,2 % z hmotnosti cementu a to dle požadované míry provzdušnění, obvykle 0,1 %.

Důvodem použití této dvojce přísad je jejich vzájemná kompatibilita. Přísady splňují normu ČSN EN 934-2+A1 *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu – Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem* [N3]. Technické listy přísad jsou obsaženy v příloze této práce.

## **10.4 Voda**

Pro namíchání směsi betonu bylo užito klasické pitné vody z vodovodu areálu VUT Brno, fakulty stavební na Veveří a to konkrétně v laboratořích ústavu stavebních hmot a dílců. Dodavatelem jsou Brněnské vodovody a kanalizace a.s. a voda splňuje normu ČSN EN 1008 *Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu* [N4].

## 11 Vyhledávací receptury - I. fáze

Jak již samotný název napovídá, na počátku vývoje technologie vodopropustných betonů se postupovalo metodou pokus omyl, respektive dle nepodložených spekulací o pravděpodobné funkčnosti tohoto nového druhu betonu. Částečně se vycházelo z informací již zveřejněných výzkumů ve Finsku. Propustnost je dána vytvořením mezerovité struktury betonu a tyto mezery jsou vytvořeny zejména mezi zrny hrubého kameniva. Z tohoto faktu se vycházelo, tudíž křivky zrnitosti kameniv, které byly zcela odlišné od známých ideálních křivek dle Fullera či EMPA. Dle nich je zastoupení písku, tedy frakce 0-4 mm v porovnání se zbytkem frakcí velmi četné. V případě vodopropustných betonů se situace obrací a právě zastoupení hrubých frakcí kameniva je naopak vyšší. Zároveň je důležité udržet přípustný poměr mezi cementovou kaší a hrubým kamenivem tak, aby stále docházelo k propustnosti a nedošlo k zalepení prostoru mezi zrny kameniva. Třetím podstatným aspektem je konzistence betonu. Při ukládání a hutnění nesmí dojít k oddělení vody a cementu od zrn hrubého kameniva. Zároveň platí, že čím tekutější směs vytvoříme, tím hutnější zpravidla je, což je v této technologii také rozhodující.

### 11.1 Tvorba receptur

### 11.2 Vlastnosti PC v čerstvém stavu

V čerstvém stavu se u vodopropustných betonů sledoval zejména vliv vodního součinitele na konzistenci. Jak již bylo výše zmíněno, nesmí dojít k segregaci cementové kaše. Konzistence směsí byla proto pouze zavhlhá a měřena zkouškou VeBe dle normy ČSN EN 12 350-3 *Zkoušení čerstvého betonu – část 3: Zkouška VeBe* [N5]. Druhou ověřovanou vlastností byla funkčnost plastifikační přísady u těchto zavhlhlých směsí. V neposlední řadě bylo rozhodující vyřešit druh ukládání a hutnění, respektive hlavně hutnění. Konkrétní postupy prací jsou rozepsány v následujících kapitolách a výsledky uvedeny v kapitole 11.5.

### 11.3 Vývoj zkoušky vodopropustnosti

Jednou z potřeb a také bodem zadání bylo vyvinout zkoušku na testování vodopropustných betonů. Výsledkem zkoušky má být množství vody, které je schopno protéct betonem v určitém čase. Celé množství by mělo být ideálně vztaženo na jednotku plochy.

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

#### **11.4 Vlastnosti PC ve ztvrdlém stavu**

Ve ztvrdlém stavu se na krychlich o hraně  $d = 150$  mm získávaly hodnoty jako objemová hmotnost, dle ČSN EN 12 390-7 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu* [N7]. Tato byla dle předpokladů nižší než u hutného betonu, ovšem nikterak zásadně. Dále pak pevnost betonu v tlaku dle ČSN EN 12 390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles* [N8]. U vzorku popisovaných vyhledávacích receptur byla získávána hodnota pouze pevnosti v tlaku po 7 dnech. Tyto hodnoty sloužili pouze k porovnání jednotlivých receptur, výsledné pevnosti po 28 dnech nebyly rozhodující a navíc se daly orientačně dopočítat.

Na vytvořených dlaždicích se provedlo měření vodopropustnosti betonu dle výše popsané zkoušky a v neposlední řadě se vizuálně hodnotil povrch betonu. Zmiňované hodnoty jsou vyobrazeny v následujících tabulkách a grafech.

#### **11.5 Zhodnocení výsledků I. fáze**

Výstupem z I. fáze praktické části bylo zhodnocení naměřených hodnot a výběr optimálních receptur s co nejlepšími vlastnostmi v ideální rovnováze.

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

## **12 Optimalizované receptury – II. fáze**

### **12.1 Možnosti provzdušnění vodopropustných betonů**

Funkčnost provzdušňovací přísady při použití ve směsi vodopropustných betonů nebyla předem známa stejně jako v případě plastifikační přísady. Nízké množství vody ve směsi mohlo zapříčinit vznik nedostatečného množství efektivních pórů, proto se tato problematika ověřila.

Důkaz správné respektive dostatečné tvorby efektivních pórů po přidání provzdušňovací přísady proběhl v čerstvém stavu při měření zkouškou pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu tlakovou metodou dle ČSN EN 12350-7 *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody* [N9]. Na základě výsledků měření byla navržena část optimalizovaných receptur, jejíž podobu zobrazuje kapitola 12.2.

### **12.2 Finální podoba optimalizovaných receptur**

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

#### **12.2.1 Křivky zrnitosti kameniva optimalizovaných receptur**

Křivky zrnitosti jsou velmi odlišné od tradičních hutných betonů. Jejich skutečnou podobu zobrazuje následující graf 12.6.

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

### **12.3 Vlastnosti PC ve ztvrdlém stavu**

Na vzorcích optimalizovaných receptur vodopropustných betonů se prováděly zkoušky pro získání hodnot objemových hmotností, pevnosti v tlaku po 28 dnech, vodopropustnosti a to dle zkoušek popsanych v I. fázi této práce. Zpracované výsledky jsou vyobrazeny v tabulkách v kapitole 12.3.3. Navíc se u vzorků optimalizovaných receptur

stanovovala ohrusnost, mrazuvzdornost betonu a v neposlední řadě došlo na studium makrostruktury betonu mikroskopem a byl pro představu změřen průměr pórů, kterými teče voda.

### **12.3.1 Stanovení ohrusnosti**

Protože bude beton v budoucnu používán jako horní pojízdná vrstva skladeb vozovek případně parkovišť, bylo třeba stanovit, jak moc bude beton odolávat účinkům spojených s provozem a to tzv. ohrusnost. Jako metoda byla vybrána zkouška ohrusnosti dle Bohma, která je popsána v příloze H normy ČSN EN 1338 *Betonové dlažební bloky – měření ohrusnosti metodou Bohme* [N10].

Vzorek betonu podléhá 16-ti brousícím cyklům a samotné broušení je prováděno na styku betonu a ocelového talíře zkušebního stroje, přičemž na styku těchto materiálů koluje korundový prášek. Výsledkem zkoušky je hodnota odbroušeného objemu betonu v  $\text{mm}^3$  na ploše  $5000 \text{ mm}^2$ . Průběh broušení a povrchy obroušených vzorků dokumentují následující obrázky (obr. 12.7 a 12.8) a naměřené hodnoty jsou zobrazeny v souhrnu naměřených výsledků, kapitola 12.3.3.

### **12.3.2 Mrazuvzdornost**

Stanovení mrazuvzdornosti tohoto typu betonu má opět své opodstatnění vyplývající z aplikace. Mrazuvzdornost betonu byla stanovena jako procentuální pokles pevností betonu v tlaku po mrazovém zatěžování. Jedná se o způsob stanovení mrazuvzdornosti odlišný od normy ČSN 73 1322 *Stanovení mrazuvzdornosti betonu* [N11], která preferuje pevnosti betonu v tahu za ohybu a výpočet zmíněného procentuálního poklesu.

Zkušebním tělesem byly krychle o hraně  $d = 150 \text{ mm}$ , mrazové zatížení probíhalo dle normového postupu ve zkušebním zařízení a dle algoritmu: 2 hodiny zmrazování na teplotu  $-15$  až  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ , následně výdrž 2 hodiny na této teplotě a pak zaplavení těles vodou, což způsobí jejich ohřátí na teplotu  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  a opět 2 hodiny výdrž (jeden cyklus = 6 hodin). Počet zmrazovacích cyklů byl převzat z normy ČSN 73 6124-1 *Stavba vozovek - Vrstvy ze směsí stmelovaných hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění a kontrola shody* [N1]. Tato nařizuje při stanovení mrazuvzdornosti betonů podobných struktur jako je vodopropustný počet cyklů 75, přičemž pokles pevností betonu po zmrazování nesmí být větší jak 15 % v porovnání

s referenčním, nezmrazovaným betonem. Konkrétní hodnoty jsou vyobrazeny v souhrnu naměřených výsledků v kapitole 12.3.3.

### **12.3.3 Souhrn naměřených výsledků**

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

### **12.3.4 Studium makrostruktury**

Součástí druhé fáze praktické části bylo také studium makrostruktury, konkrétně tzv. efektivních pórů z hlediska vodopropustnosti (viz obr. 12.16). Toto proběhlo na mikroskopu s maximálním přiblížením 250x, přičemž výsledkem pozorování bylo vytvoření celkové představy o velikosti pórů (viz obr 12.17).

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

### **12.3.5 Vizuální kontrola povrchu**

V neposlední řadě proběhla v rámci II. fáze praktické části vizuální kontrola vytvořených povrchů optimalizovaných receptur.

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

## 13 Závěr

V praktické části proběhlo seznámení se s chováním prvotních směsí vodopropustných betonů. Postupným zkoumáním byla zjištěna optimální konzistence směsi a způsob hutnění takto připravených směsí. Na vytvořené škále vyhledávacích receptur byla zjištěna pevnost v tlaku, objemová hmotnost a vodopropustnost betonů. Právě k měření vodopropustnosti bylo potřeba vytvořit přístroj a zkušební postup, což bylo součástí první fáze praktické části. Na základě informací získaných zhodnocením poznatků z první fáze, byly vytvořeny tzv. optimalizované receptury, na kterých se ověřovala funkčnost plastifikační a provzdušňovací přísady. Ve ztvrdlém stavu pak proběhlo měření různých vlastností, jako jsou: pevnosti v tlaku po 28 dnech, objemová hmotnost, vodopropustnost, mrazuvzdornost a stanovení obrusnosti. Pro celkové doplnění byly vybrané receptury podrobeny studiu makrostruktury a u všech receptur proběhlo vizuální zhodnocení výsledného povrchu.

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

Vodopropustný beton je tedy materiálem, kterým by se lidstvo mělo zajímat, aby mohl být v brzké době použit v reálných konstrukcích pro jeho příznivý dopad na ekologii zejména pak na hospodaření s vodou. Z technologického hlediska je potřeba se zajímat možnostmi vylepšení chování v prostředí XF. Zjistit jeho další fyzikálně mechanické vlastnosti jako je pevnost v tahu za ohybu. Dále je potřeba zpracovat na možnostech ukládání a hutnění betonu v praxi v in-situ. V neposlední řadě je nutné vypracovat vhodný plán údržby, aby nedošlo k možnému zanesení a znehodnocení vodopropustného betonu potažmo povrchu.

Diplomová práce snad zvýšila míru poznání doposud neprobírané technologie vodopropustných betonů, které jsou nadále v procesu vývoje a jejich použití není od věci.

## 14 Seznam použitých zdrojů

### 14.1 Použitá literatura

[1] KUOSA, Hannele, Erika HOLT. *Vývoj trvanlivého vodopropustného betonu pro potřeby hospodaření s dešťovou vodou ve Finsku*. Espoo, 2014. VTT Technical Research Centre of Finland.

[2] GINTER. PRÁVO. *Z Česka se stává betonová placka*. [www.novinky.cz](http://www.novinky.cz) [online]. 2014 [cit. 2016-09-28]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/domaci/353989-z-ceska-se-stava-betonova-placka.html>

[3] BROŽOVSKÝ, Jiří, Rudolf HELA, Rostislav DROCHYTKA. *Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah*. Brno, 2013. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

[4] BENEŠ, Dalibor. *Válcovaný beton (Roller Compacted Concrete – RCC)*. Beton TKS, 4/2016.

[5] HELA, Rudolf. *Technologie stavebních dílců*. Brno, 2005. Skriptum. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

[6] STAVEBNICTVI3000. *Betonový povrch – nejvhodnější řešení pro přetěžované silnice a dálnice (II)*. [www.stavebnictvi3000.cz](http://www.stavebnictvi3000.cz) [online]. 2005 [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/betonovy-povrch-nejvhodnejsi-reseni-2/>

[7] METEO-RYCHNOV. *Meteorologické rekordy u nás (respektive v bývalém ČSSR) a ve světě*. <http://meteo-rychnov.cz> [online]. 2013 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://meteo-rychnov.cz/index.php/meteorologicke-rekordy>

[8] GAJANAN, M. Sabnis. *Green building with concrete. Sustainable design and construction*. Boca Raton: Taylor and Francis Group, LLC, 2012. ISBN 978-1-4398-1296-9.



## 14.2 Použité normy a právní předpisy

[N1] ČSN 73 6124-1 *Stavba vozovek - Vrstvy ze směsí stmelných hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění a kontrola shody*. Praha: ÚNMZ 2016.

[N2] ČSN EN 197-1 ed. 2. *Cement – Část: Složení, specifikace a kritéria shody cement pro obecné použití*. Praha: ÚNMZ, 2012.

[N3] ČSN EN 934-2+A1. *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu – Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem*. Praha: UNMZ 2012.

[N4] ČSN EN 1008. *Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: ÚNMZ, 2003.

[N5] ČSN EN 12 350-3 *Zkoušení čerstvého betonu – část 3: Zkouška Vebe*. Praha: ÚNMZ 2009.

[N6] ČSN 73 2578 *Zkouška vodotěsnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření 1982.

[N7] ČSN EN 12 390-7 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: ÚNMZ 2009.

[N8] ČSN EN 12 390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ 2009.

[N9] ČSN EN 12350-7 *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*. Praha: ÚNMZ 2009.

[N10] ČSN EN 1338, příl. H *Betonové dlažební bloky - měření obrusnosti metodou Bohme*. Praha: ÚNMZ 2005.

[N11] ČSN 73 1322 *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha: ÚNMZ 2003.

[N12] ČSN EN 480-11 *Přísady do betonu, malty, injektážní malty – zkušební metody – Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu*. Praha: ÚNMZ 2006.

### 14.3 Použité obrázky

[O1] MAPY. *Výřez mapy*. [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz) [online]. [cit. 2016-09-28]. Dostupné z: <https://mapy.cz/letecka?x=17.1181040&y=48.8526643&z=17>

[O2] ČHMI. *Průvodce informacemi Hlasné a předpovědní povodňové služby ČHMÚ pro povodňové orgány*. [www.portal.chmi.cz](http://www.portal.chmi.cz) [online]. 2014 [cit. 2016-09-28]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/hydrologicke\\_predpovedi\\_v\\_cr.htm](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/hydrologicke_predpovedi_v_cr.htm)

[O3] VTT TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND. *Class – Project climate adaptive surfaces*. Finland, 2014.

[O4] KUOSA, Hannele, Erika HOLT. *Vývoj trvanlivého vodopropustného betonu pro potřeby hospodaření s dešťovou vodou ve Finsku*. Espoo, 2014. VTT Technical Research Centre of Finland.

[O5] BROŽOVSKÝ, Jiří, Rudolf HELA, Rostislav DROCHYTKA. *Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah*. Brno, 2013. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

[O6] GOMACO. *RCC Success on an Ohio Industrial Loop Road*. [www.gomaco.com](http://www.gomaco.com) [online]. 2011 [cit. 2016-10-11]. Dostupné z: [https://www.gomaco.com/resources/worldstories/world39\\_2/complete.html](https://www.gomaco.com/resources/worldstories/world39_2/complete.html)

[O7] PERTA. *Zenith 940 – Equipamento para produzir artefactos de betao*. [www.perta.pt](http://www.perta.pt) [online]. 2012 [cit. 2016-10-11]. Dostupné z: <http://www.perta.pt/zenith-940-equipamento-para-produzir-artefactos-de-betao/>

[O8] CEMEX. *Válcovaný beton - Roller Compacted Concrete RCC*. [www.cemex.cz](http://www.cemex.cz) [online]. 2016 [cit. 2016-10-12]. Dostupné z: <http://www.cemex.cz/valcovany-beton.aspx>

[O9] STAVEBNICTVI3000. *Betonový povrch – nejvhodnější řešení pro přetěžované silnice a dálnice (II)*. [www.stavebnictvi3000.cz](http://www.stavebnictvi3000.cz) [online]. 2005 [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/betonovy-povrch-nejvhodnejsi-reseni-2/>

## 15 Seznam tabulek, grafů, obrázků, příloh a zkratk

### 15.1 Seznam tabulek

Tab. 10.1 Vybrané vlastnosti použitého cementu CEM I. 42,5 R

Tab. 10.3 Vybrané vlastnosti použitých frakcí kameniva

Tab. 11.1 Vyhledávací receptury s frakcí kameniva  $D_{\max} = 8$  mm

Tab. 11.2 Vyhledávací receptury s frakcí kameniva  $D_{\max} = 16$  mm

Tab. 11.8 Vlastnosti PC ve ztvrdlém stavu – Vyhledávací receptury –  $D_{\max} = 8$  mm

Tab. 11.11 Vlastnosti PC ve ztvrdlém stavu – Vyhledávací receptury –  $D_{\max} = 16$  mm

Tab. 12.1 Složení zkušební malty pro měření obsahu vzduchu včetně naměřených hodnot

Tab. 12.2 Zobrazení optimalizovaných receptur  $D_{\max} = 8$  mm bez provzdušňovací přísady

Tab. 12.3 Zobrazení optimalizovaných receptur  $D_{\max} = 8$  mm včetně provzdušňovací přísady

Tab. 12.4 Zobrazení optimalizovaných receptur  $D_{\max} = 16$  mm bez provzdušňovací přísady

Tab. 12.5 Zobrazení optimalizovaných receptur  $D_{\max} = 16$  mm včetně provzdušňovací přísady

Tab. 12.9 Výsledné vlastnosti optimalizovaných receptur PC –  $D_{\max} 8$  mm bez provzdušnění

Tab. 12.10 Výsledné vlastnosti optimalizovaných receptur PC –  $D_{\max} 8$  mm s provzdušněním

Tab. 12.12 Výsledné vlastnosti optimalizovaných receptur PC –  $D_{\max} 16$  mm bez provzdušnění

Tab. 12.13 Výsledné vlastnosti optimalizovaných receptur PC –  $D_{\max} 16$  mm s provzdušněním

### 15.2 Seznam grafů

Graf 10.2 Křivky zrnitosti použitých frakcí kameniva

Graf 11.9 Závislost propustnosti na OH PC – vyhledávací receptury -  $D_{\max} = 8$  mm

Graf 11.10 Závislost propustnosti na pevnosti v tlaku PC – vyhled. receptury -  $D_{\max} = 8$  mm

Graf 11.12 Závislost propustnosti na OH PC – vyhledávací receptury -  $D_{\max} = 16$  mm

Graf 11.13 Závislost propustnosti na pevnosti v tlaku PC – vyhled. receptury -  $D_{\max} = 16$  mm

Graf 12.6 Křivky zrnitosti kameniva zpracovávaných optimalizovaných receptur

Graf 12.11 Grafické znázornění hodnot pevností v tlaku společně s procentuálním poklesem po zmrazování receptury  $D_{\max} 16$  mm

Graf 12.14 Grafické znázornění hodnot pevností v tlaku společně s procentuálním poklesem po zmrazování receptury  $D_{\max} 16$  mm

Graf 12.15 Grafické znázornění hodnot vodopropustnosti betonů optimalizovaných receptur

### 15.3 Seznam obrázků

- Obr. 9.1 Schéma metodiky práce v I. fázi praktické části této diplomové práce
- Obr. 9.2 Schéma metodiky práce v II. fázi praktické části této diplomové práce
- Obr. 11.3 Hutnicí pěchy (vlevo pro dlaždice 0,2 x 0,2 m, vpravo pro krychle  $d = 0,15$  m)
- Obr. 11.4 Zkušební přístroj pro zkoušku vodotěsnosti povrchové úpravy stavebních k-cí
- Obr. 11.5 Finální verze zkušebního přístroje pro testování vodopropustnosti PC
- Obr. 11.6 Náčrt zobrazující problematiku průchodu vody přes zkušební vzorek
- Obr. 11.7 Zobrazení zkoušky vodopropustnosti na vzorku PC
- Obr. 11.14 Zobrazení povrchu nepropustných betonů vyhledávacích receptur Z 5 a Z 15
- Obr. 11.15 Povrch betonu receptury Z 6 s přítomnými krátery
- Obr. 11.16 Vylepšený povrch betonu receptury Z 6
- Obr. 11.17 Srovnání vyhledávacích receptur Z 18 a Z 21 (lepší povrch)
- Obr. 11.18 Dokonalé povrchy vyhledávacích receptur Z 14 a Z 16
- Obr. 12.7 Broušení vzorku PC na Bohmově přístroji
- Obr. 12.8 Obroušené vzorky – pozorování povrch (vlevo  $D_{\max} = 16$  mm, vpravo  $D_{\max} = 8$  mm)
- Obr. 12.16 Snímek vzorku receptury  $D_{\max} 16$  mm s bíle vyplněnými mezerami pro průtok vody
- Obr. 12.17 Snímek makrostruktury z optického mikroskopu – přiblížení 43x – vzorek receptury  $D_{\max} 16$  mm
- Obr. 12.18 Povrch optimalizované receptury F 1 -  $D_{\max} = 8$  mm
- Obr. 12.19 Povrch optimalizované receptury F 9 -  $D_{\max} = 16$  mm se vsypem frakce 8-12 mm

### 15.4 Seznam příloh

- Technický list cementu CEM I 42,5R
- Prohlášení o vlastnostech kameniva Žabčice frakce 0-4 mm
- Prohlášení o vlastnostech kameniva frakce 4-8 mm
- Prohlášení o vlastnostech kameniva frakce 8-16 mm
- Technický list plastifikační přísady CHRYSO Plast 461
- Technický list provzdušňovací přísady CHRYSO Air A

### 15.5 Seznam zkratk a symbolů

- |    |                     |
|----|---------------------|
| PC | vodopropustný beton |
| w  | vodní součinitel    |

PC	plastifikační přísada
CEM	Cement
$D_{\max}$	maximální zrno kameniva
$m_c$	hmotnost cementu
w	vodní součinitel
OH	objemová hmotnost
CHRL	chemické rozmrazovací látky
VUT	Vysoké učení technické
FAST	Fakulta stavební
THD	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## **16 Přílohy**