



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

VÝVOJ TECHNOLOGIE VODOPROPUSTNÝCH BETONŮ PRO POZEMNÍ KOMUNIKACE

DEVELOPMENT OF WATER-PERMEABLE CONCRETE TECHNOLOGY FOR ROADS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Ďurnek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	NPC-SIM Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jan Ďurnek
Název	Vývoj technologie vodopropustných betonů pro pozemní komunikace
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

1. Databáze internetových vědeckých časopisů Web of science, Scopus a další
2. Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých symposií
3. Skřivánek, M.: Návrh technologie vodopropustných betonů, diplomová práce VUT FAST Brno, 2017
4. VTT TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND. Class – Project climate adaptive surfaces. Finland, 2014.
5. KUOSA, Hannele, Erika HOLT. Vývoj trvanlivého vodopropustného betonu pro potřeby hospodaření s dešťovou vodou ve Finsku. Espoo, 2014. VTT Technical Research Centre of Finland.
6. GOMACO, RCC Success on an Ohio Industrial Loop Road. www.gomaco.com. Dostupné z: https://www.gomaco.com/resources/worldstories/world39_2/complete.html
7. PERTA, Zenith 940 – Equipamento para produzir artefactos de betao. www.perta.pt Dostupné z: <http://www.perta.pt/zenith-940-equipamento-para-produzir-artefactos-de-betao/>

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Celosvětově se městská prostředí zahušťují a narůstá procento horizontálních povrchů pokrytých konstrukcemi s pevnými a nepropustnými povrchy. V Evropě průměrně žije cca 70% obyvatel ve městech. V poslední zprávě EU Soil Sealing Guideline byla popsána ekologická rizika nadměrného živelného zastavování měst spojeného s nárůstem zabírání půdy s upozorněním, že uzavření zemského povrchu je jeden z hlavních degradačních procesů na Zemi. Právě uzavření povrchu zpevněných ploch či komunikací má negativní vliv na pronikání vody do podloží, a tím na záplavy a současně na zmenšení zelené infrastruktury a snižování retence podzemních vod. Zpevněné plochy jsou tvořeny nepropustnými materiály (beton, asfalt) a kanalizační systémy zajišťují 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 typy betonů s pevnostmi mezi 20 až 40 MPa, trvanlivostí proti působení CHRL a současně s vysokou vodopropustností. Všechny mechanické vlastnosti musí odpovídat použití pro pochůzně či pojízdně komunikace.

V teoretické části proveďte podrobnou rešerži stávajícího stavu problematiky vodopropustných betonů a i celkových skladeb konstrukcí pozemních komunikací pro různá provozní zatížení.

V praktické části navrhnete vhodné receptury pro pevnostní třídy C20/25 až C30/37. Hodnoty vodopropustnosti musí dosahovat 80 až 300 l/min/m². Betony musí vykazovat vyhovující odolnost proti obrusu a prostředí XF.

Dále navrhnete složení hydraulicky stmelěných podkladních vrstev s pevnostmi C5/6 až C8/10. Laboratorně ověřte fyzikálně-mechanické parametry navržených receptur, jejich trvanlivosti v závislosti na hodnotách vodopropustnosti. 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 DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou vývoje technologie vodopropustných betonů pro pozemní komunikace.

V teoretické části jsou shrnuty veškeré informace spojené s vodopropustnými betony (PC) a taktéž byly rozebrány konstrukční vrstvy vozovek s předpokládaným zamýšleným využitím PC u uvedených vrstev.

Praktická část zahrnující tři etapy byla zaměřena na vývoj receptur PC pro pozemní komunikace a to tak, aby vyhovovala nárokům kladenými na pozemní komunikace. První dvě etapy se zabývaly samotným PC, poslední etapa pak byla věnována výrobě vodopropustné směsi kameniva stmelené cementem tzv. KSC.

U receptur byly sledovány 7 a 28denní pevnosti v tlaku, odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám a odolnost proti obrusu. V závěru práce je provedeno zhodnocení naměřených výsledků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodopropustný beton, zkoušení vodopropustnosti, CB kryty, CHRL, srážky, eco-friendly, dlažba, skladba a vrstvy vozovek.

ABSTRACT

The Diploma thesis deals with the development of water-permeable concrete technology for roads. In theoretical part there are summarized all information associated with water-permeable concrete (PC) and there are also analyzed construction layers of roads with the expected intended use of PC in these layers. The practical part, including three stages was focused on the development of PC recipes for roads in order to meet the demands placed on roads. The first two stages dealt with only PC, the last stage includes production of a water-permeable aggregate mixture cemented with cement, so-called KSC. The recipe were monitored for 7 and 28 days compressive strength, resistance to chemical de-icing agents and abrasion resistance. The conclusion of the work contains an evaluation of the measured results.

KEYWORDS

Pervious concrete, water-permeable concrete, testing water permeability, CB covers, CHRL, rainfall, eco-friendly, pavement, road composition and layers.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jan Ďurnek *Vývoj technologie vodopropustných betonů pro pozemní komunikace*. Brno, 2021. 85 s., 13 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 O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14.1.2022

Bc. Jan Ďurnek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem s názvem zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14.1.2022

Bc. Jan Ďurnek
autor práce

Poděkování

V této části diplomové práce se jako první sluší poděkovat vedoucímu práce prof. Ing. Rudolfu Helovi CSc. za odborné vedení, poskytnutí odborných rad a studijního materiálu. Další poděkování směřuje do firmy Prefa Brno a.s., závod Strážnice, zejména pánům Ing. Jankovi a Ing. Náplavovi za umožnění výroby zkušebních vzorků v I. etapě praktické části diplomové práce a za využití surovin ze závodu.

Za pomoc při provádění praktické části diplomové práce děkuji celému technickému personálu ÚTHD při VUT FAST v Brně a taktéž i centru ADMAS při VUT v Brně.

Poslední, komu chci na tomto místě poděkovat je rodina, která mě podporovala po celou dobu mého vysokoškolského studia.

Obsah

Úvod	17
Teoretická část	19
1. Cíl teoretické části práce	19
2. Srážky	20
3. Vodopropustný beton	22
3.1. Hlavní funkce a princip vodopropustného betonu	22
3.2. Nároky kladené na vodopropustné betony z pohledu pozemních komunikací	23
3.3. Technologie výroby PC	24
3.4. Zkoušení vodopropustnosti betonu	26
3.5. Praktické ukázky vodopropustných betonů	32
4. Pozemní komunikace	34
4.1. Šířkové uspořádání silnic a dálnic	35
4.2. Členění konstrukce vozovky	35
4.3. Představení jednotlivých částí vozovky	36
4.3.1. Podloží	36
4.3.2. Ochranná vrstva vozovky	37
4.3.3. Podklad	37
4.3.4. Kryt	37
4.4. Vybrané pojmy ze skladby vozovky spojené s betonem	38
4.4.1. CB kryty	39
4.4.2. Mechanicky zpevněné kamenivo (MZK)	39
4.4.3. Kamenivo stmelené cementem (KSC)	39
4.5. Skladba vrstev pro kryty z dlažebních prvků a dílců	40
4.5.1. Skladba vrstev pochozích komunikací	40
Praktická část	42
5. Cíl praktické části	42
6. Metodika práce	43
7. Vstupní suroviny	48

7.1. Cement.....	48
7.2. Kamenivo.....	48
7.3. Voda.....	49
7.4. Přísady.....	50
7.5. Příměsi.....	50
8. I. etapa – Vývoj a prvotní zkoušení receptur.....	51
8.1. Vyhodnocení naměřených výsledků.....	52
8.2. Zhodnocení a komentář k výsledkům I. etapy.....	54
9. II. etapa – Optimalizování receptur z I. etapy a zkoušky trvanlivosti.....	56
9.1. Vyhodnocení naměřených výsledků.....	58
9.2. Fotodokumentace II. etapy.....	62
9.3. Zhodnocení a komentář k výsledkům II. etapy.....	66
10. III. etapa – Návrh složení hydraulicky stmelných podkladních vrstev.....	67
10.1. Vyhodnocení naměřených výsledků III. etapy.....	68
10.2. Zhodnocení a komentář ke III. etapě.....	71
11. Závěr.....	72
12. Seznam použitých zdrojů.....	74
12.1. Použitá literatura.....	74
12.2. Použité normy a právní předpisy.....	77
12.3. Použité obrázky v teoretické části.....	79
13. Seznam tabulek, grafů, obrázků, příloh a zkratk.....	82
13.1. Seznam tabulek.....	82
13.2. Seznam grafů.....	83
13.3. Seznam obrázků.....	83
13.4. Seznam příloh.....	84
13.5. Seznam zkratk.....	84
14. Přílohy.....	85

Úvod

Poslední dobou je ve světě často skloňovaný pojem globální oteplování planety Země. S tím plně souvisí i efektivní hospodaření s vodou. Každý stát a pomalu i každé město začíná tento problém řešit, snaží se najít cestu, jak efektivně hospodařit s vodou, jak ochladit ulice, náměstí, parkoviště, parky apod. Začíná se ukazovat, že tím, jak se k samotné planetě chováme, tak nám to planeta sama náležitě vrací.

Úvod diplomové práce si nedává za cíl stěžovat si na aktuální stav, ale poukázat na problémy, které se aktuálně vyskytují, jak v malém, tak i v globálním měřítku. Na akademické obci se již pomalu rýsují nápady, jak na tyto rozmazy počasí reagovat. Jakými prostředky se postarat o to, abychom mohli na planetě dále žít spokojený život.

Každý z nás si určitě udělal procházku svým bydlištěm nebo městem, kde aktuálně pobývá. Jako první kolem sebe vidí plně uzavřené plochy všech komunikací, které v létě odráží sluneční paprsky a přispívají k dalšímu oteplování vzduchu. Ochlazení, které si však většina obyvatel přeje, nepřichází, nemá kudy. Studiemi se prokázalo, že narůstá procento povrchů konstrukcí, které jsou tvořeny pevnými a nepropustnými povrchy komunikací. Studie prokázaly velký negativní vliv uzavřených povrchů na pronikání vody do podloží, v návaznosti na to jsou častější záplavy a tím pádem se míň vody naakumuluje do podzemního systému. Prakticky se svět omezil na fungující systém odvodu vody z těchto nepropustných povrchů do kanalizačních systémů, kdy voda dále putuje do čističek. Problém však spočívá jak v nedostatku ochlazování prostředí, tak i se sběrem a vsakováním vody do podloží.

Hlavním cílem této práce je seznámit odbornou i laickou veřejnost se speciálním typem betonových povrchů, které budou navrženy tak, aby propouštěly optimální množství vody do podloží a splnily tak požadované parametry na mechanické vlastnosti udávané normami pro pochůzná a pojížděná komunikace.

V teoretické části bude provedena podrobná rešerše vodopropustných betonů z dostupných informací výzkumů, jak na území ČR, tak zejména ze světa. Dále budou sděleny informace o typech pozemních komunikací a jejich skladbách.

V experimentální části budou provedeny návrhy receptur a odzkoušení mechanických vlastností těchto speciálních betonů.

Teoretická část

1. Cíl teoretické části práce

Teoretická část si dává za cíl shrnout problematiku vodopropustných betonů. Popsat jejich vznik, vlastnosti, cíl a využití těchto betonů. Popsat výrobu a další specifické aspekty tohoto typu speciálních betonů. V dalších kapitolách bude provedeno seznámení se se všemi typy pozemních komunikací pro motorovou dopravu, tzv. pojížděnými povrchy a pro chodce, tzv. pochůznými povrchy. Zejména se pak zaměření těchto kapitol bude věnovat celkovým skladbám s ohledem na různá provozní zatížení.

2. Srážky

Důležitou informací, kterou je potřeba vědět při zabývání se tématem vodopropustných betonů je, jaké typy srážek hydrologové či meteorologové rozeznávají. V této kapitole bude definován pojem srážky, jak se číselně vyjadřují a jaké typy dešťů existují.

Pojem srážky lze definovat jako proces v přírodě, který se skládá z různých částí. Vznik srážek lze popsat následovně. Jakmile se ovzduší ochlazuje, stoupá nasycenost vodními parami. Pak je potřeba říci, co je pojem teplota rosného bodu. Je to teplota, při které je vzduch určité měrné vlhkosti maximálně nasycen vodními parami. [1] Jakmile teplota ovzduší klesne pod tuto mez (pod zmíněnou teplotu rosného bodu), část páry se sráží kolem kondenzačních jader, tím pádem vznikají nepatrné kapičky vody nebo sněhové vločky, ty pak vytváří oblaka a mlhy. Za určitých vhodných podmínek se zvětšují a padají k zemi jako ovzdušné srážky. [2]

Odborná literatura rozeznává dva typy srážek, a to kapalné, což je zejména déšť a mlha, nebo tuhé, což v zimní období (teploty pod 0 °C) je sníh, zmrzlý déšť či v období bouřek kroupy. [2]

Charakteristickými vlastnostmi deště jsou jeho intenzita a doba trvání. Intenzita deště je množství vody vztažené na jednotku času. Vyjadřuje se v mm/min nebo v mm/hod, případně jako specifická vydatnost s jednotkou ve tvaru l/s/ha. [2]

S intenzitou deště jsou spojeny ještě pojmy jako přivalový déšť a regionální déšť. První jmenovaný pojem se definuje jako velmi vydatný krátkodobý déšť, který zasahuje malé plochy. Naproti tomu regionální déšť je charakterizován menší intenzitou, je dlouhodobější a pokrývá větší rozlohu. [2]

Srážky, přesněji jejich množství, se vyjadřuje pomocí veličiny nazývané úhrn H_s . Udává se v mm. Jedná o vrstvu, která by vznikla, kdyby déšť dopadal na vodorovnou nepropustnou bezodtokovou rovinu a bylo by zabráněno jeho výparu. [2]

Veškerá data úhrnů srážek sbírá pomocí hydrometeorologických stanic Český hydrometeorologický ústav. Ten každý rok vypracovává mapu (viz obr. č. 1), ve které je vyobrazen úhrn srážek a je vidět, ve které lokalitě přišlo hodně a ve které málo. Na obdobném principu funguje i portál Intersucho.

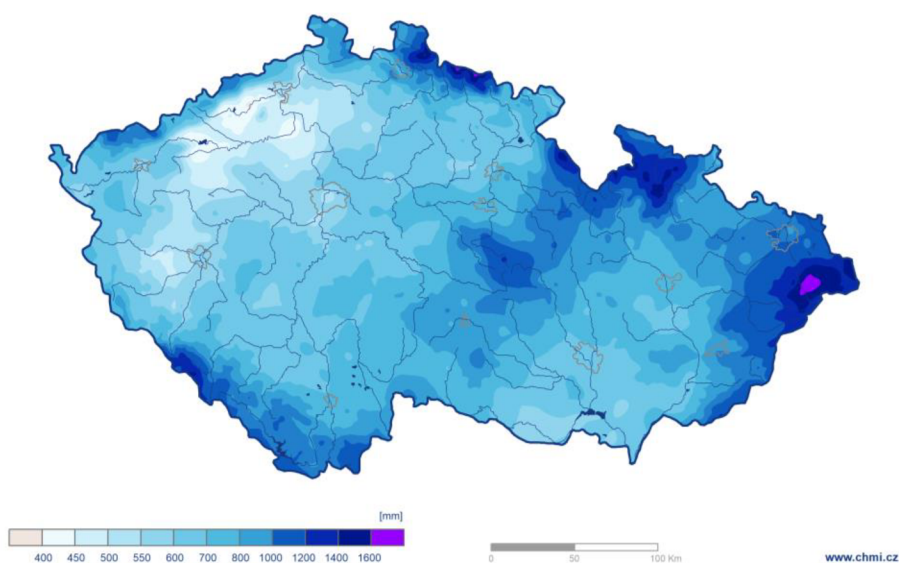
K idealizování a pro potřeby výpočtů návrhů kanalizací i vodopropustnosti betonů, byly vytvořeny tabulky, jejichž autorem je Josef Trupl a byly vydány v roce 1958. Ten dal do souvislosti vydatnost deště v určité periodicitě v závislosti na době trvání. Další tabulka pak zahrnuje celkový úhrn deště za čas při určité periodicitě. Tabulky jsou zpracovány pro více jak 90 měst v České republice. [2]

Pro maximální denní úhrny srážek pro změnu slouží aplikace ERCN 2.0, což je hydrologický model. Pravděpodobnost opakování je zde 2, 10, 20, 50 a 100 roků. [3]

Posledním definovaným pojmem v této kapitole je měření úhrnu srážek. Ke stanovení se využívají tzv. ombrometry. Jedná se o nádoby o ploše 500 cm². Tato varianta se používá zpravidla u amatérských stanic. U profesionálních stanic se zejména využívají ombrografy, které hodnoty rovnou zapisují na papír navinutý na bubnu. Posledním typem je impulsní srážkoměr. [2] Na obr. č. 2 je ukázka jednoduchého obrometru.

Úhrn srážek v roce 2020

Český
hydrometeorologický
ústav



Obr. č. 1: Mapa úhrnu srážek za rok 2020 [O1]



Obr. č. 2: Ukázka obrometru [O2]

3. Vodopropustný beton

Po seznámení se s dešťovými srážkami v předešlé kapitole se přesuneme ke stěžejnímu tématu, které nese název vodopropustný beton. V konečném důsledku to pouze o samotném betonu není. V dnešní době se již dá tvrdit, že se jedná o vodopropustný systém, který vodu propouští až do podloží. Na základě požadavků investora a po poradě s odborníky pak je definováno, zdali se voda z podloží odvede nebo se tam nechá.

Dokument od renomovaného výrobce stavební chemie Sika zmiňuje, že historie již nějaké nápady na podobném principu znala, avšak zatím ne pro pozemní komunikace. Tyto nápady se objevují kolem roku 1852. Použití dříve bylo pro pozemní stavby – domy a budovy o vícero podlaží. [4] [5] Spíše, než o vodopropustném betonu, se dá hovořit o mezerovitém betonu v pravém slova smyslu. Tyto principy se využívaly v poměrně dávné historii, dnešním požadavkům zdaleka nevyhovují. Taktéž se o této historii zmiňuje zpráva ACI 552R–10 z Amerického betonového institutu (ACI). [5] Pravdou však je, že průkopníky v této oblasti jsou zejména Spojené státy americké, v Evropě vládnou Finové, kteří provedli rozsáhlý výzkum spojený s touto problematikou a v Asii se tomuto tématu věnují zejména v Japonsku.

Ve vědeckých publikacích vyhledáváme vodopropustný beton pod anglickým překladem ve formě pervious concrete (PC).

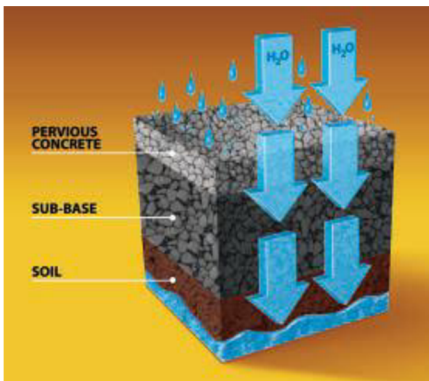
Při pohledu na vzorky z tohoto betonu se může zdát, že to je obyčejný mezerovitý beton. Jenže při samotném návrhu je důležité dodržet určitá pravidla a to tak, aby výsledný produkt byl ve všech sledovaných parametrech co nejvíce vyhovující.

3.1. Hlavní funkce a princip vodopropustného betonu

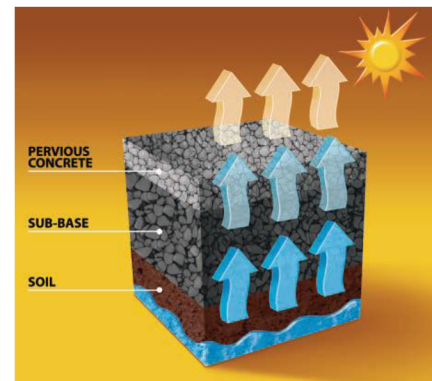
Kdyby byla pouze horní obrusná vrstva propustná a zbytek nepropustný, tak by systém buď zkolaboval nebo by se vytvářely na silnicích obří kaluže, v přírodě mokřady atd. První hlavní funkcí je propustnost celého systému z horní vrstvy až do úplně nejspodnější. Tímto krokem se docílí, jak zadržování vody v krajině, tak i to, že se voda nebude odvádět zbytečně do kanalizace. Druhou hlavní funkcí vodopropustného systému je pomocí výparů páry navrátit vodu do ovzduší, což zapříčiňuje následné ochlazovací vzduchu a znovuoobnovení koloběhu vody v přírodě. Tyto dvě funkce jsou nejvíce příznivé i z pohledu ekologů, zemědělců atd.

Na obr. č. 3 a č. 4 je vizuálně vysvětleno to, co bylo v předchozím odstavci uvedeno.

Taktéž hodně důležitou funkci tento systém má v porovnání s asfaltovými kryty, po dešti nezůstávají na povrchu kaluže.



Obr. č. 3: Ilustrace propustného systému [O3]



Obr. č. 4: Unikání páry do ovzduší pomocí systému [O4]

3.2. Nároky kladené na vodopropustné betony z pohledu pozemních komunikací

Při návrhu směsí pro vodopropustné betony, které využijeme jako vrstvy pozemních komunikací, je potřeba zohlednit spousty proměnných a zároveň splnit požadavky, které ukládají české normy a předpisy ředitelství silnic a dálnic ČR (ŘSD ČR) a Ministerstva dopravy (MD). Mezi hlavní požadavky patří pevnost v tlaku, odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám, odolnost proti obrusu, mrazuvzdornost. Aby vodopropustný beton byl považován za vodopropustný, musí taktéž být vyzkoušen, zdali vyhovuje požadavkům na propustnost určitého objemu vody, které zatím v ČR nejsou normově definovány. V kapitole 3.4. je proveden souhrn zkoušek, které se provádí, jak ve světě, tak i na území ČR. V ČR se vývojem této problematiky zabývá spousta vědeckých ústavů spolu s firmami vyrábějícími betonovou dlažbu.

Na co se musí ještě dát pozor, je údržba povrchu. Pokud se použije povrch s velkou mezerovitostí (frakce 8–16 mm a více) je potřeba provádět pravidelnou údržbu z pohledu zabránění zanesení struktury nepořádkem ve formě listí, tuhých částic. Otázkou je, zdali příroda formou deště dokáže systém vyčistit sama.

Jeden z nároků na tyto betony, který ještě nebyl nikde probírán je, jak vyčistit systém, pokud dojde k dopravní nehodě. Dokážeme v dostatečném časovém prostoru zamezit pronikání ropných látek a to tak, aby se povrch a systém neznehodnotil? Hasiči při haváriích tohoto charakteru zpravidla využívají sorbenty, pokud by byly až tak jemné, že by se dostaly do mezerovité struktury, je šance, že by se částice daly poté pomocí zametacích strojů správců komunikací vymést či tlakově vysát.

3.3. Technologie výroby PC

Již při návrhu receptur pro vodopropustné betony se setkáváme s rozdílnými přístupy k surovinám, zejména se to týká skladby kameniva, na kterém je celý systém propustnosti založen. Neuplatňují se zde křivky, které se využívají u obyčejných betonů, což jsou EMPA I, EMPA II a Fuller. Tyto křivky si dávají jiný cíl, než který my potřebujeme. Skladba kameniva tak, aby systém fungoval, je shrnuta v následujících řádcích. Při použití tří frakcí kameniva, zpravidla frakce 0–4 mm, 4–8 mm a 8–16 mm je snaha víc omezovat malá zrna kameniva. Frakci 0–4 mm je možné omezit maximálně na 30 % z celkového obsahu kameniva. Zbylé frakce je možné různě kombinovat. [6]

Na druhou stranu je potřeba brát v úvahu, že frakce kameniva 0–4 mm po smíchání s cementem a s vodou, spoluvytváří cementový tmel, který po zatvrdnutí vytváří cementový kámen, hlavní pevnostní spojení zrn kameniva.

Kromě toho, že se snažíme získat co největší propustnost, nesmí se zapomínat na získ požadovaných parametrů pevnosti betonu v tlaku. Pro tento typ betonů lze s výhodou využít zejména kamenivo drcené. Zrna kameniva se do sebe zaklesnou, vytvoří propustný prostor, který žádáme. S ohledem na výše uvedené se musí brát v úvahu větší plocha kameniva, tím pádem víc cementového tmelu na kontaktní zónu. [6]

Kromě výše uvedených frakcí se ve světě setkáváme i s frakcemi 4–10 mm a 10–14 mm v Portugalsku a ve Finsku pak frakce 8–12 mm. V ČR ani jednu z výše uvedených frakcí nepoužíváme, frakce 8–12 mm zde není dostupná. [6]

V řadě vědeckých výzkumných projektech je snaha začít do těchto betonů využívat i drcené recyklované kamenivo. V ČR je taktéž prováděn výzkum s využitím lehkého keramického kameniva Liaporu.

Další potřebnou surovinou je cement. Dávka cementu se u těchto betonů pohybuje v rozmezí od 300 do 360 kg/m³.

Vodní součinitel se pohybuje zpravidla mezi 0,3 až 0,4. Jedná se o zavlhlou směs. Při míchání je potřeba dávat pozor na dávkování vody, PC jsou velmi náchylné na předávkování. Jakmile je množství vody předávkováno, není možné, aby betony splnily svoji funkci.

Použití čerstvé betonové směsi je buďto přímo ve výrobě, přesunem pomocí podvěsných košů k výrobnímu stroji, který z dané směsi vyrobí dlažební prvky dle typu formy. Další variantou je přesun směsi na stavbu pomocí nákladních vozidel a lze danou směs použít jako kryt povrchu vozovky, parkovišť, cyklostezek atd.

Na obrázku č. 6 je ukázka stacionárního vibrolisu, který je vhodný pro výrobu dlažeb použit.



Obr. č. 5: Stacionární vibrolis [O5]

Na obrázku níže je pro změnu znázorněno ukládání čerstvé betonové směsi pomocí finišeru od firmy GOMACO pro kryt vozovky. Betony se následně válcují pomocí tandemových vibračních válců.

Na závěr lze konstatovat, že beton je konzistencí vhodný jak pro pěchování a lisování při malých tlacích, tak i pro válcování.



Obr. č. 6: Ukládání čerstvé betonové směsi finišerem [O6]

3.4. Zkoušení vodopropustnosti betonu

Ve světě se setkáváme s různými způsoby zkoušení vodopropustnosti. Ve Finsku se využívají metody založené na amerických normách. Německo pro změnu vymyslelo svou normu DIN. U nás se přístupy ke zkoušení liší. Tato kapitola si dává za cíl, učinit v tomto zkoušení řád a provést ucelený přehled norem a postupů využívaných v celém světě.

Jako první bude představena metoda dle normy ASTM C1701/C1701M-09 [N1] a zároveň dle normy ASTM C1781/C1781M-13 [N2]. [7] Obě normy jsou americké. Finský výzkum dle těchto norem postupoval. Nyní normy ASTM C1701 i C1781 jsou novelizovány ve formě M-17a [N3] pro C1701 a M-21 [N4] pro C1781. [8] [9]

Je na místě konstatovat, že po prostudování všech zkoušek je patrné, že všechny dále zmíněné zkoušky fungují na podobném principu, kde je vymezená určitá plocha, která je následně zatěžována různě daným množstvím vody.

V normě ASTM C1701/C1701M-09 [N1] je jako základním vymežovacím prostředkem definovaný PVC kruh o průměru 300 mm a minimální výšce 50 mm. Důležitým aspektem nejen u této zkoušky ale i v celkovém světovém zkušebnictví, je těsnost kolem PVC kruhu či trubky, která zajišťuje regulérnost zkoušky. Požadavkem je, aby voda protékla pouze přes vymezenou plochu. Povrch před samotným měřením musí být navlhčen a zkouška musí proběhnout do 2 minut od navlhčení. Postup zkoušky je takový, že povrch je zatěžován postupným nalíváním 19 l vody, zároveň se měří pomocí stopek čas. Výsledné hodnoty se pak dosazují do vzorců vycházejících z norem. Zkouška se nazývá jako single ring. [10]



Obr. č. 7: Ilustrativní obrázek ke zkoušení dle normy ASTM C1701/C1701M-21 [N4] [O7]

Další americkou, ale nenormovou zkouškou, je zkouška dle NCAT. NCAT je americká organizace, přesněji se jedná o národní centrum pro asfaltovou technologii. Tato metoda se ve vědeckých člancích zpravidla porovnává s hodnotami získanými z měření dle norem uvedených výše.

Při studiu této metody bylo objeveno vícero modifikací měřicího aparátu. Nejedná se pouze o jeden jednoduchý prstenec, jak bylo zmiňováno výše, ale je zde již nádoba, která obsahuje vícero válců o různé ploše. V thajsko – americké studii byly využity pouze dva válce nad sebou. [10] Oficiální produkt od NCAT obsahuje válce 4. Největší a nejspodnější válec má plochu 167,53 cm², následuje druhý s 38,32 cm² a postupně se to dál snižuje. [11] Množství vody, kterým zatěžujeme povrch, není ze studie ani z produktového listu této metody známo. Taktéž je možné tuto aparaturu vyhledat pod názvem Gilson permeameter. [11]



Obr. č. 8: Ilustrativní obrázek zkušebního zařízení dle NCAT [O8]

Další zkouška vychází opět z americké normy ASTM D3385-18 [N5], v ČR je známá pod označením ČSN EN ISO 22282-5 Geotechnický průzkum a zkoušení – Hydrotechnické zkoušky – Část 5: Vsakovací zkoušky [N6]. V Německu byla tato norma dříve taktéž platná, nyní je zrušená. [12] Zkouška je oproti výše uvedeným rozdílná v tom, že se využívá dvou válců v jedné rovině. Vnitřní válec musí mít průměr minimálně 200 mm, vnější pak dvojnásobek průměru vnitřního. Zkouška se využívá hlavně u propustnosti zemin. Výsledkem zkoušky je přítok do vnějšího a vnitřního prstence ke konci zkoušky, kdy dojde k ustálení přítoku vody. [13]



Obr. č. 9: Vsakovací dvouprstenec neboli double ring [O9]

V Portugalsku se vodopropustný beton zkouší dle normy NLT-327/00 [N7], v ČR je tato norma známá ve znění ČSN EN 12697-40 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 40: Propustnost in situ [N8]. Jedná o válec o objemu 5 l, který má na spodní části pryžové těsnění. Zkoušená plocha má průměr 48 mm. Po porovnání s metodami výše uvedenými, je na první pohled patrné, že zkoušená plocha patří k těm nejmenší ze všech. Výsledkem stanovování propustnosti je čas, který je potřebný k tomu, aby voda ve válci klesla z rysky 5 l na objem 1 l. Celkově by měl vzorek propustit vodu o objemu 4 l za určitý čas. Norma udává tuto veličinu jako dobu výtoku v sekundách. [14]



Obr. č. 10: Zkušební zařízení dle normy ČSN EN 12697-40 [O10]

Poslední variantou zkoušení vodopropustnosti betonových vzorků, která zde bude představena, je opět nenormová zkouška, kterou vymyslel a aplikoval vedoucí práce prof. Hela s Ing. Skřivánkem. Metoda je založena stejně jako výše uvedená norma ČSN EN 12697–40 [N8] na válci o určitém objemu. Místo zátky na konci válce je umístěn kulový kohout, válec má objem 1 l, objem použitý pro měření je však 900 ml. Měření spočívá tedy v měření času, kdy objem válce klesne z rysky 1000 na 100 ml. Měření se provádí dvakrát a výsledek se následně zprůměruje. [6] Vnitřní průměr těsnění pod kulovým ventilem je 32 mm.

Samotné vyhodnocení pak probíhá výpočtem dosazením do vzorce ve tvaru:

$$\text{vodopropustnost} = \frac{V_{\text{válce}}}{t_{90} \cdot a \cdot b} \left[\frac{l}{\text{min} \cdot \text{m}^2} \right]$$

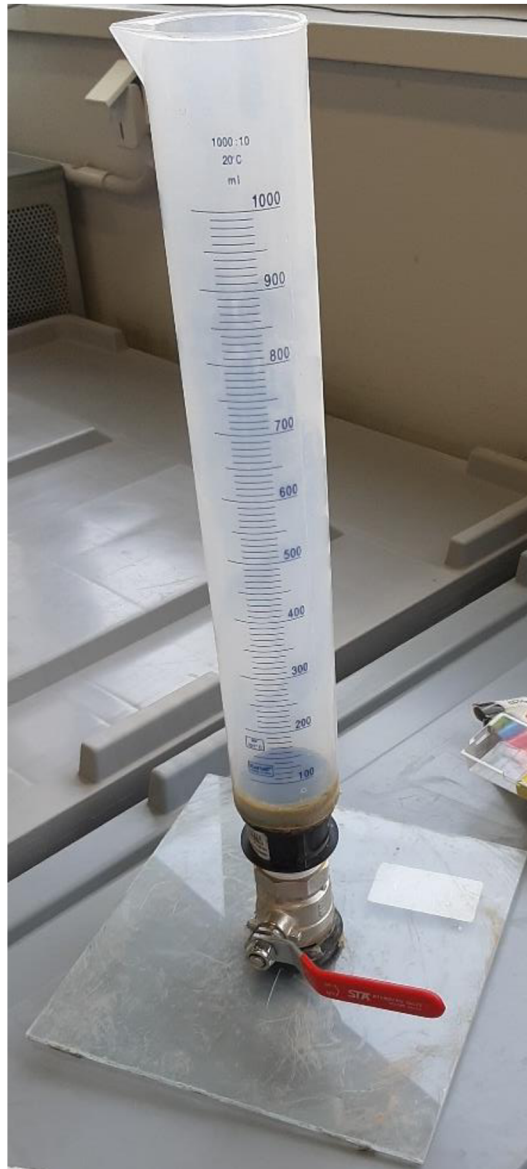
kde $V_{\text{válce}} = 0,9 \text{ l}$, což je množství vody potřebné pro měření

t_{90} = naměřený čas

a, b = představují rozměry zkoušeného vzorku (případně se může využít plocha S, pokud chceme pouze zatěžovanou plochu hned u ústní kohoutu). [6]

Problematické u této metody je zejména utěsnění spodní hrany zkušebního zařízení se zkoušeným vzorkem. Pro porovnání s americkou metodou je zde utěsnění náročnější. Po nasazení není možné se dále pod přístroj dostat a případně hmotou netěsnosti zacelit.

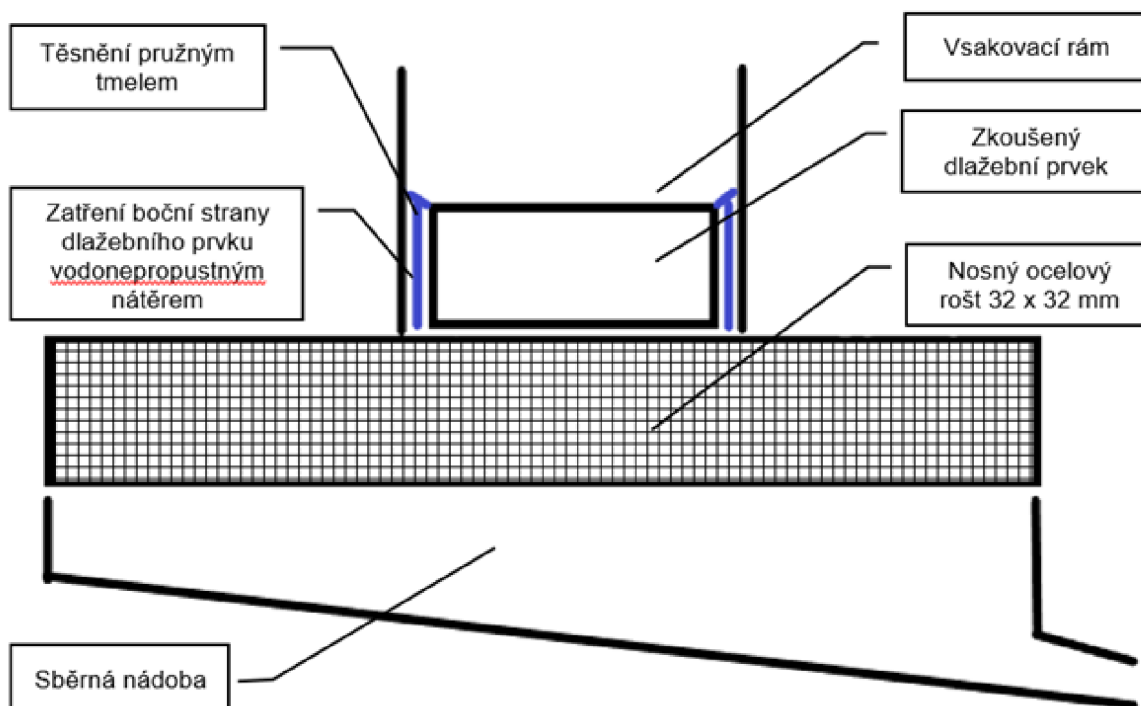
Metoda je tedy vhodná pro zkoušení dlažeb, kde je zajištěna rovinnost povrchu pro vodopropustný beton. Naproti tomu tam, kde je skladba kameniva postavena zejména na frakci 8–16 mm, je tato metoda z pohledu utěsnění neideální, z tohoto pohledu je lepší využít např. postup dle ASTM – single ring. Případně by se metoda mohla modifikovat. A to tak, že místo těsnění na spodní části zkušebního zařízení by se nainstaloval prstenec z PVC o stejném průměru, ale o větší výšce. Pro zajištění stability zkušebního zařízení by bylo možné nahradit desku z polymetylmethakrylátu trojnožkou, která by měla na konci přísavky.



Obr. č. 11: Zkušební zařízení navržené dle autorů prof. Hely a Ing. Skřivánka [O11]

Kromě prakticky jednoduché zkoušky uvedené výše se v České republice snaží prosadit Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p. (TZÚS Praha, s.p.) ve spolupráci s výrobcem dlažby BEST a.s. se svojí zkušební metodou, která je založena na sběru propuštěné vody dlažebním prvkem. [15] [16] Z volně dostupných informací není známo, po jakém intervalu se bude voda sbírat. Taktéž není definováno množství vody, kterým bude zkušební vzorek zatěžován. Při porovnání se všemi uvedenými zkouškami je tato jediná, kde se voda při zkoušce sbírá. Při pohledu na ilustrativní obrázek č. 12 je patrná částečná inspirace americkou normou ASTM C1701/C1701M-17a [N3], v tomto případně však je rám obdélníkového půdorysu. Dalším specifikem zkoušky navržené TZÚS Praha s.p. je zatírání bočních hran vodonepropustným nátěrem. U žádné ze zkoušek se toto

nepraktikovalo. Dle výše uvedeného lze soudit, že navržená metoda je v porovnání se všemi zmíněnými metodami v této práci nejsložitější jak na přípravu vzorků, tak i z pohledu samotného zkoušení vodopropustnosti.



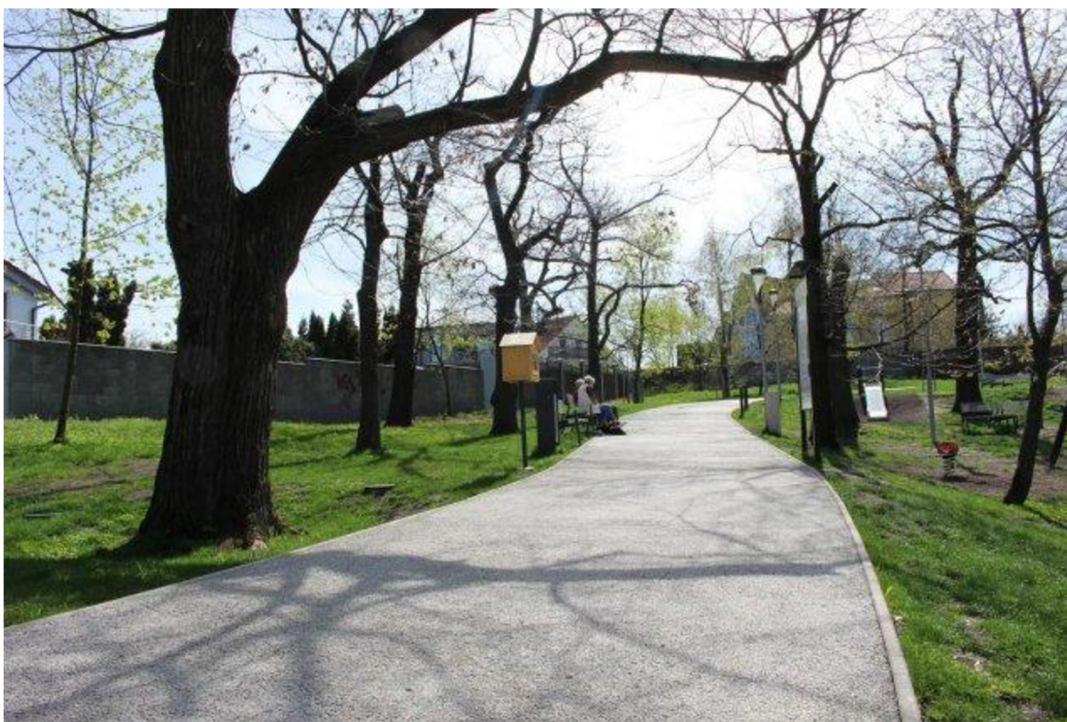
Obr. č. 12: Zkušební zařízení navržené TZÚS Praha s.p. [O12]

Na závěr kapitoly lze konstatovat, že ve světě stále ještě nejsou ustálená normativa na zkoušení vodopropustnosti betonů. Na přehledu je taktéž patrné, že se v každé zemi liší jak zkušební zařízení, tak zejména plocha, která je vodou zatěžována. Těžko zatím soudit, jestli jsou normy vzájemně porovnatelné. Je poměrně dost proměnných, které způsobují rozdílnost a následnou interpretaci výsledků.

3.5. Praktické ukázky vodopropustných betonů

Vodopropustný beton má spoustu využití z pohledu pozemních komunikací. Počínaje od chodníků, přes aleje, silnice, parkovací stání až po terasy. Na sportovištích je uplatnitelný jako povrch tenisového kurtu, povrchy kolem bazénů, dětská hřiště, hřiště pro venkovní basketball, závodní dráha pro cyklistické závody BMX. [17]

Na obr. č. 13 je první ukázka použití tohoto typu betonu na chodníky, přesněji se jedná o parkové chodníky. Lokalita, kde se tento povrch nachází je na Slovensku v Bratislavě. [18]



Obr. č. 13: Chodník v parku v Bratislavě, Slovensko [O13]

Další obrázek předkládá vodopropustný beton jako povrch parkovacího stání v Americe v Harrisburgu v Pensylvánii. [19]



Obr. č. 14: Parkovací stání z PC v USA, Pensylvánie [O14]

Z pohledu ukázky dětského hřiště taktéž zůstaneme v USA, přesněji v Tamien Park v San Jose. [20]



Obr. č. 15: Dětské hřiště a park z PC v USA, San Jose [O15]

Poslední ukázka využití je směřována na cyklostezky.



Obr. č. 16: Využití vodopropustného betonu pro cyklostezky [O16]

4. Pozemní komunikace

V české legislativě jsou pozemní komunikace ukotveny v zákoně č. 13/1997 Sb., Zákon o pozemních komunikacích v platném znění. Zákon definuje dělení pozemních komunikací na:

- a.) dálnice
- b.) silnice
- c.) místní komunikace
- d.) účelová komunikace. [21]

Z pohledu vytiženosti dopravního provozu je nejméně podstatná účelová komunikace. Účelová komunikace se využívá ke spojení jednotlivých nemovitostí pro potřeby spoluvlastníků těchto nemovitostí. Mezi účelovou komunikací patří lesní a polní cesty. Účelové komunikace nejsou přístupné veřejně. Jejich přístupnost je závislá od toho, jak to nadefinuje (stanoví) vlastník či provozovatel. [21] [22]

Místní komunikace je určena převážně k místní dopravě na území obce. Oproti účelové komunikaci je místní komunikace veřejná. Zákon místní komunikace rozděluje dle dopravního významu, určení a stavebně technického vybavení do čtyř tříd. [21] [22]

Předposlední rozlišovanou kategorií jsou silnice. Jedná se o veřejně přístupné pozemní komunikace určené k užití silničními vozidly a chodci. Vytváří silniční síť. Podle určení a dopravního významu se stejně jako místní komunikace dělí do tříd. Zpravidla se s vozidly pohybujeme po silnicích I., II. a III. třídy. Silnice I. třídy jsou stavěny jako rychlostní, jsou určeny pro dálkovou a mezinárodní dopravu. [21] [22]

Poslední kategorií pozemních komunikací je dálnice. Je určena zejména pro rychlou dálkovou a mezinárodní dopravu silničními motorovými vozidly. Je přístupná pouze vozidlům, jejichž nejvyšší povolená rychlost není nižší než 80 km/h. [21] [22]

Veškeré vozovky, které se v ČR navrhují, se řídí technickými podmínkami vydanými Ministerstvem dopravy (MD) a Ředitelstvím silnic a dálnic (ŘSD ČR), přesněji se jedná o TP 170 [N9]. V tomto dokumentu je uvedeno, že návrh vozovky se provádí dle katalogu vozovek a dle návrhové metody.

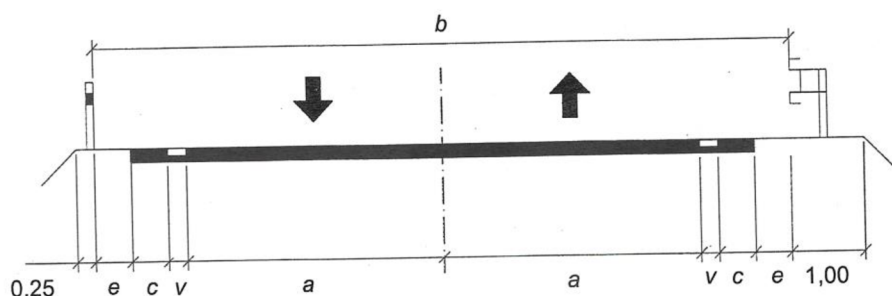
Jedním ze vstupních údajů pro návrh vozovky je návrhová úroveň porušení vozovky. Ve výše zmíněném dokumentu jsou rozeznávány tři úrovně. Do úrovně D0 jsou zahrnuty dálnice, rychlostní silnice, silnice I. třídy. Silnice II. a III. třídy se řadí do kategorie D1. Pro komunikace s minimálním dopravním zatížením je určena návrhová úroveň porušení vozovky D2. [23]

4.1. Šířkové uspořádání silnic a dálnic

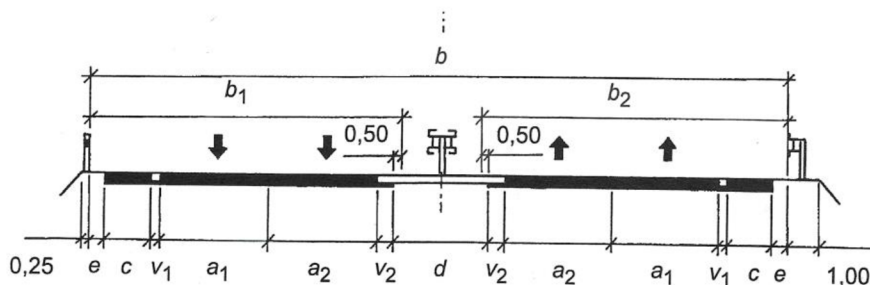
V silniční terminologii rozeznáváme silnice směrově rozdělené a směrově nerozdělené. Směrově rozdělené silnice v šířkovém členění obsahují střední dělicí pás, směrově nerozdělené nikoliv. [22]

Na obr. č. 17 a 18 je vidět rozdíl, který byl v odstavci výše popsán. Dvoupruhové komunikace se navrhují v šířce od 6,5 do 11,5 m. Jízdní pruh se pohybuje od 2,75 do 3,5 m. U jednopruhových komunikací je jízdní pruh o šíři 3 m a celková šířka komunikace 4 m. [22]

U směrově rozdělených komunikací, což jsou dálnice, rychlostní silnice a silnice I. třídy je šířka komunikace od 20,75 do 33,5 m. Jízdní pruh se navrhuje v šíři 3,25 až 3,75 m. [22]



Obr. č. 17: Ilustrativní obrázek směrově nerozdělené dvoupruhové silnice [O17]



Obr. č. 18: Ilustrativní obrázek směrově rozdělené silnice či dálnice (a_1 a a_2 = jízdní pruh) [O18]

4.2. Členění konstrukce vozovky

V předešlé části kapitoly o pozemních komunikacích bylo provedeno rozdělení komunikací dle užití a dle šířkového uspořádání. Kapitola 4.2. se bude věnovat konstrukci a stavbě vozovek. Budou zde představeny všechny konstrukční vrstvy vozovek a samotná technologie výroby a ukládky směsí.

Z technologického hlediska nevyužíváme pojem komunikace, ale nadefinovaný pojem vozovka. Vozovkou lze nazvat vícevrstvou konstrukci, která leží na pláni zemního tělesa a umožňuje svou únosností a rovným povrchem hospodárnou a bezpečnou dopravu návrhovou rychlostí po celou dobu své životnosti. Dle Zajíček a kolektiv se jedná o zpevněnou část pozemní komunikace, která se skládá z konstrukčních vrstev. [22] [24]

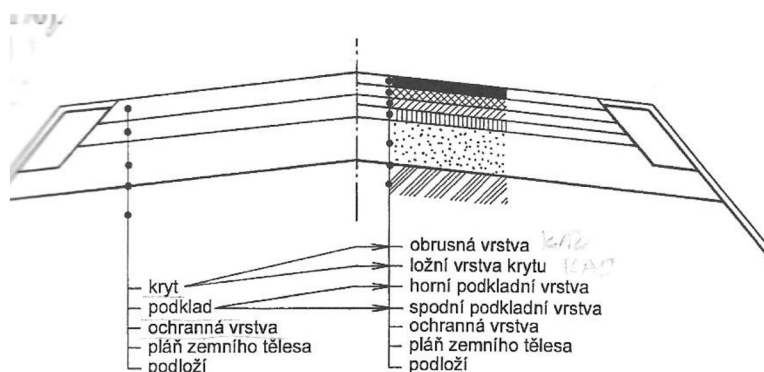
Vozovka je tvořena krytem, ochrannou vrstvou a podkladem. [22]

Vozovky rozdělujeme dle deformačních charakteristik krytu na tuhé, polotuhé a netuhé.

Netuhé vozovky se vyznačují asfaltovým, dlážděným nebo nestmeleným krytem, který se chová převážně pružně. Charakteristický pro tento typ vozovky je nízký modul pružnosti. [24]

Polotuhá vozovka oproti netuhé má vysoký modul pružnosti, ale nízkou pevnost. Zejména je využit asfaltový kryt a podkladní vrstva je stmelena hydraulickými pojivy. Nevýhodou této vozovky je křehkost a náchylnost ke vzniku smršťovacích trhlin. [24]

Posledním rozeznávaným typem je tuhá vozovka, tvořená cementobetonovým krytem, vyznačující se vysokou pevností a vysokým modulem pružnosti. [24] Nutné provádět dilatační spáry.



Obr. č. 19: Ilustrativní obrázek skladby konstrukce vozovky [O19]

4.3. Představení jednotlivých částí vozovky

V dalších podkapitolách se bude vycházet z obr. č. 19, budou představeny v základě všechny části skladby konstrukce vozovky. Postupovat se bude od nejspodnějších vrstev až po konstrukce, které jsou ve styku se vzduchem.

4.3.1. Podloží

Podloží je nejspodnější částí vozovky, je součástí zemního tělesa. Je potřeba, aby podloží vykazovalo požadovanou únosnost, která se měří na zemní pláni. Podloží se dělí do tří tříd z pohledu návrhu. Charakteristickými vlastnostmi z pohledu návrhu jsou návrhový modul pružnosti, minimální modul přetvárnosti a namrzavost podloží. [22] [23]

S tímto rozdělením se setkáváme při návrhu vozovek podle katalogových listů. Např. pro typ podloží P I je požadováno, aby podloží bylo nenamrzavé s minimálním modulem přetvárnosti 90 MPa. [22] [23]

4.3.2. Ochranná vrstva vozovky

Hlavní funkcí této vrstvy je zabránit promrzání podkladní vrstvy, často se používá štěrkodrt' nebo štěrkopísek, případně mechanicky zpevněná zemina nebo stabilizace. [22] Dle Zajíček a kolektiv je třeba definovat, jakou funkci má ochranná vrstva plnit. [24]

4.3.3. Podklad

Podklad – část konstrukce vozovky, která se nachází mezi zemní plání a krytem. Funkcí podkladu je přenos zatížení z provozu do podloží, ale tak, aby podloží bylo co nejméně zatíženo. [24] Podkladní vrstvy se z pohledu zatížení komunikace využívají buďto dvouvrstvé (horní a spodní vrstva) nebo u méně namáhaných komunikací jednovrstvé. Dělí se na tuhé, polotuhé, netuhé a paratuhé. [22]

Tuhé podkladní vrstvy jsou tvořeny zpravidla válcovaným betonem (VB), mezerovitým betonem (MCB), dále kamenivem stmelěným cementem (KSC) nebo stabilizací (SC). [22]

Netuhé podkladní vrstvy jsou zpravidla tvořeny vrstvami stmelěnými asfaltem nebo lze využít vrstev pojivy nestmelěnými, což mohou být štěrkodrtě (ŠD), mechanicky zpevněné zeminy (MZ) a mechanicky zpevněná kameniva (MZK). [22]

4.3.4. Kryt

Kryt je horní souvrství konstrukce vozovky. Kryt se skládá z horní obrusné vrstvy a spodní ložné vrstvy. Obrusná vrstva má za úkol chránit ložnou vrstvu. Ložná vrstva plní funkci pevnostní.

TP 170 [N9] vydaná ŘSD ČR rozlišuje tyto typy krytů:

- Cementobetonový (tuhé vozovky),
- Kryt z asfaltových vrstev (netuhé vozovky),
- Kryt z dlážděných prvků a dílců (dlážděné vozovky, netuhé vozovky),
- Kryt ze silničních dílců (tuhé vozovky),
- Nestmelěný kryt. [23]

V dalších kapitolách budou z výše uvedeného výběru krytů představeny cementobetonové kryty a dlážděné prvky a dílce.

Na samotný závěr kapitoly je umístěna ukázka z katalogu vozovek, která je součástí technických podmínek ŘSD ČR – TP 170 [N9]. Jedná se o ukázku, kde návrhová úroveň porušení vozovky je D0, písmeno T značí tuhou vozovku. [23]

D0-T

TDZ	S		I			II			III			
TNV _s (TNV/24h)	10000		5000			2400			1200			441
TNV _k (TNV/24h)	16500		7500			3500			1500			501
TNV _{od} (mil. TNV)	85		28			14.5			6.2			2.3

D0-T-1	Podloží	PI	PII	PI	PII	PIII	PI	PII	PIII	PI	PII	PIII		
CB, KSC, ŠD (MZ)	100													
	200													
	300													
	400	90▼			90▼		90▼			90▼				
	500		150		150	250		150	250		150	250		
	600	60▼			60▼		45▼			60▼		45▼		
	700													
Ha	270	270		250	250	250		240	240	240		230	230	230
Hv	420	570		400	550	650		390	540	640		380	530	630

D0-T-2	Podloží	PI	PII	PI	PII	PIII	PI	PII	PIII	PI	PII	PIII		
CB, S, ŠD (MZ)	100													
	200													
	300													
	400	90▼			90▼		90▼			90▼				
	500		150		150	250		150	250		150	250		
	600	60▼			60▼		45▼			60▼		45▼		
	700													
Ha	270	270		250	250	250		240	240	240		230	230	230
Hv	420	570		400	550	650		390	540	640		380	530	630

D0-T-3	Podloží	PI	PII	PI	PII	PIII	PI	PII	PIII	PI	PII	PIII		
CB, MZK, ŠD	100													
	200													
	300	150▼			150▼		150▼			150▼				
	400		250	200	250	200	200		250	200	200			
	500	90▼			90▼		90▼		90▼		90▼			
	600	60▼			60▼		45▼			60▼		45▼		
	700													
Ha	300	300		280	280	280		270	270	270		250	250	250
Hv	550	650		530	630	730		520	620	720		500	600	700

Obr. č. 20: Katalogová skladba vozovek pro návrhovou úroveň D0 – dálnice a silnice I. třídy [O20]

4.4. Vybrané pojmy ze skladby vozovky spojené s betonem

V této podkapitole budou vysvětleny pojmy CB kryty (cementobetonové kryty), MZK (mechanicky zpevněné kamenivo), KSC (kamenivo stmelené cementem), válcované a mezerovité betony. CB kryty se řadí k pojížděným částem skladby vozovky, zbylé vyjmenované pojmy se řadí do skupiny materiálů, které využíváme pro tuhé podkladní vrstvy viz. kap. 4.3.3..

4.4.1. CB kryty

CB kryt vozovky je v současné době využíván zejména jako dvouvrstvý systém pro vozovky dálnic, jednovrstvý systém je v ČR využíván minimálně. U dvouvrstvých systémů je spodní vrstva prováděna v tl. 160–200 mm. Horní vrstva se pohybuje v tloušťce 60 až 80 mm. Spodní vrstva slouží jako nositel pevnosti, horní plní funkci obrusnou. Veškeré požadavky na CB kryty se řídí dle normy ČSN 73 6123 [N11], dle již zmiňovaných technických podmínek – TP 170 [N9] a technických kvalitativních podmínek, kapitola 6. [25] Důležitým požadavkem je maximální délka dilatačních celků, která činí 6 m. Zpravidla se vzdálenost počítá jako 25násobek tloušťky desky. [25] Do příčných spár mezi dvěma celky se vkládají kluzné trny po vzdálenosti min. 250 mm. [25] Z pohledu technologie betonu jsou na CB kryty kladeny tyto požadavky:

- Pevnost v tlaku
- Stupeň vlivu prostředí: XF4
- Pevnost v tahu za ohybu
- Odolnosti proti CHRL
- Vodní součinitel.

Dle tříd dopravního zatížení a užití dělíme CB kryty na CB I až CB III. Dálnice a letištní plochy se zhotovují z CB I. K pokládce se využívají finišery od firem Gomaco, Wirtgen.

4.4.2. Mechanicky zpevněné kamenivo (MZK)

Podkladní vrstva vozovky, ve které není využito zpevnění pomocí hydraulických látek (cement, vápno, popílek, strusky atd.). Mechanicky zpevněné kamenivo je založeno na smíchání různých frakcí kameniva tak, aby výsledná křivka zrnitosti byla co nejideálnější. Vhodné je drcené kamenivo. Základem podkladní směsi je nastavit optimální vlhkost. Ke stanovení optimální vlhkosti se provádí zkouška pomocí Proctor Standard dle normy ČSN EN 13286-2 [N12]. Výsledkem zkoušky je graf křivky, resp. závislost vlhkosti na objemové hmotnosti suché směsi, ze které se zjistí maximální objemová hmotnost a optimální vlhkost. Pokládka směsi se provádí finišery a válcuje vibračními válci.

4.4.3. Kamenivo stmelené cementem (KSC)

Podkladní vrstva vozovky, kde kamenivo je stmelené hydraulickým pojivem (cementem, hydraulickým vápnem, jemně mletou granulovanou struskou, popílky). Do stmelených podkladních vrstev se kromě KSC řadí mezerovitý beton, válcovaný beton, podkladový beton. Kamenivo stmelené cementem se dělí na KSC I a KSC II. Minimální tloušťka KSC I je 120 mm, pro KSC II 150 mm. [23] Minimální pevnost v tlaku na válcích

po 28 dnech u KSC I musí dosahovat 8 MPa a maximální musí činit 12 MPa. KSC II po 28 dnech musí dosahovat min. 7 MPa, max. 11 MPa. [26] Pro KSC platí stejný technologický postup, který byl popsán v kap. 4.4.2. – Proctor Standard.

4.5. Skladba vrstev pro kryty z dlažebních prvků a dílců

V této kapitole budou představeny skladby vrstev pro kryt z dlážděných prvků a dílců dle TP 170 [N9].

Kryty z dlažeb jsou vhodné pro pomalou a statickou dopravu. Mezi pomalou a statickou dopravu lze zařadit chodníky, parkoviště, obytné zóny, příjezdové cesty k domům, cyklostezky. Pro rychlost vozidel nad 50 km/h se kryty z dlažeb nedoporučují. [23]

V České republice je řada výrobců, kteří se zabývají výrobou betonových dlažeb pro pojízdné a pochozí vrstvy. Pro příklad lze jmenovat Presbeton s.r.o., Prefa Brno a.s., Fino trade a.s., Best a.s., AZ beton s.r.o., Diton s.r.o. atd.

Dlážděné kryty se řídí kromě TP 170 [N9] taktéž TP 192 ŘSD Dlažby pro konstrukce pozemních komunikací [N10]. Kromě betonových dlažebních prvků je možné využít dlažební prvky z přírodního nebo konglomerovaného kamene, kameninovou, dřevěnou či cihelnou dlažbu. [27]

4.5.1. Skladba vrstev pochozích komunikací

Pro chodníky neboli pochozí komunikace platí stejné normové podmínky jako pro pojízdné komunikace. Při návrhu je potřeba znát typ a charakteristiky podloží. Zpravidla se u krytů z dlažeb jedná o podloží P II a P III, mírně namrzavé až namrzavé. Dle těchto kategorií podloží je dále postupováno v návrhu dle katalogu vozovek.

Podkladní vrstvy se navrhují buďto z nestmelených vrstev, což mohou být štěrkodrtě, mechanicky zpevněné kamenivo nebo z vrstev stmelených, např. kamenivo stmelené cementem (KSC), válcovaný beton, stabilizace atd. Doporučeno je využívat vrstvy nestmelené hydraulickými pojivy. [27]

Jedna vrstva je v porovnání s pojízdnými komunikacemi navíc, resp. není potřebná u jiných krytů. U krytů z dlažeb se musí provádět ložná vrstva pod dlážděný kryt. Ložná vrstva bývá zhotovena z frakce 0–4, 2–4, 4–8 mm. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 30–50 mm. [27]

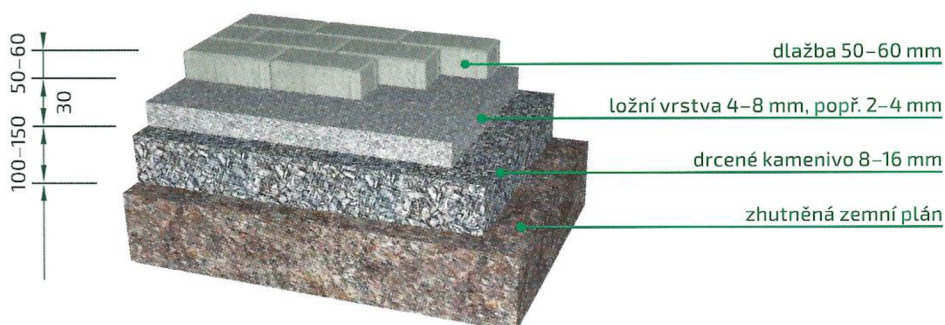
Spáry mezi dlažebními prvky se musí vyplnit frakcí 0–2 nebo 0–4 mm. [27]

Na betonové dlážděné kryty jsou kromě základních technických požadavků na kvalitu kladeny ještě specifická pravidla z pohledu bezpečnosti provozu. Pro chodníky je nutné

pokládat dlažbu šedé (přírodní) barvy, pro cyklostezky je nutno pokládat v barvě cihlově červené. [27] Pro parkovací pruhy se zpravidla využívá tmavá barva (černá). Z pohledu technologie výroby betonových dlážděných prvků se jedná o barvu nášlapné části betonového výrobku.

Na obr. č. 21 je ilustrativní ukázka vypůjčená z katalogu výrobce betonové dlažby firmy Prefa Brno a.s.. Obr. č. 22 představuje výřez ze skladeb krytů dle TP 170 [N9] z katalogu vozovek, zaměřeno na dlážděné kryty.

Příklad skladby chodníku



Obr. č. 21: Ilustrativní skladba vrstev pro pochozí komunikaci z katalogu firmy [O21]

D2

TDZ	V	VI	O	CH
TNV _T (TNV/24h)	90	15		
TNV _K (TNV/24h)	100	15		
TNV _{cd} (tis. TNV)	460	70		
N _{cd} (tis. 10t náprav)	160	25		

D2-D-1		Podloží		P II	P III	DL 80	P II	P III	DL 80	P II	P III	DL 80	P II	P III	DL 60
DL, ŠD	100			100		▲90	80		▲70	70		▲80	70		▲30
	200			150	150	▼60	200	250	ŠD	150	200	ŠD	150	150	▼30
	300			70			45			45			45		
	400			150	200	ŠD									
	500			45		▼30			▼30			▼30			
	Ha														
	Hv		420 470				320 370			270 320			240 240		

D2-D-2		Podloží		P II	P III	DL 80	P II	P III	DL 60
DL, MZ	100			80		▲60	80		▲30
	200			200	250	MZ	150	200	MZ
	300			45			45		
	400								
	500					▼30			▼30
	Ha								
	Hv				320 370			240 290	

Obr. č. 22: Skladba vrstev pro pochozí komunikaci z TP 170 [N9] [O22]

Praktická část

5. Cíl praktické části

Hlavním cílem a náplní praktické části diplomové práce bylo navrhnout vodopropustné betony s pevností v tlaku mezi 20 až 40 MPa, vysokou vodopropustností, odolností proti působení CHRL (chemických rozmrazovacích látek) a ohrusu. Všechny sledované parametry musí odpovídat požadavkům na pochůzná a pojížděná komunikace.

Dalším cílem bylo navrhnout složení receptur pro podkladní vrstvy stmelené hydraulickými pojivy a to tak, aby výsledné pevnosti v tlaku bylo možné zařadit do pevnostních tříd C5/6 až C8/10.

6. Metodika práce

Postup praktické části je členěn do tří etap. První etapa se zabývá optimalizací receptur z již dříve provedeného výzkumu na ústavu THD, a to tak, aby dané receptury co nejvíce propouštěly vodu v součinnosti s vysokou pevností betonu v tlaku.

Druhá etapa zahrnuje již receptury, které vyhověly požadavkům výše popsaným plus budou vyzkoušeny ještě další varianty receptur. V této etapě budou vyrobeny kromě zkušebních těles na vodopropustnost a pevnost taktéž vzorky pro zkoušku odolnosti betonu vůči chemickým rozmrazovacím látkám (odolnost proti CHRL).

Třetí etapa zahrnuje postup a práci při návrhu podkladních vrstev s hydraulicky stmeleným kamenivem.

Pro první dvě etapy platí shodný pracovní postup. Pro zkoušku pevnosti betonu v tlaku budou vyrobena zkušební tělesa o hraně 150 mm, která budou hutněna technikou pěchování. Hutněna budou ve třech vrstvách. Každá vrstva bude pomocí závaží upěchována 10 x. Poslední vrstva bude pro urovnání povrchu lehce zavibrována, a to tak, aby vibrace byla co nejkratší. Pro zkoušku vodopropustnosti budou tělesa vyráběna do formy o půdorysných rozměrech 250 × 250 mm a výšce 50 mm. Hutněna budou pouze v jedné vrstvě. Pro zkoušku na odolnost betonu proti CHRL budou vyhotovena taktéž tělesa o hraně 150 mm a postup výroby vzorků totožný, jak pro pevnost v tlaku.

Hlavním sledovaným parametrem u čerstvého vodopropustného betonu bude konzistence. Budou zvoleny dva přístupy k této problematice. V první etapě bude využita pouze metoda sednutí kužele dle normy ČSN 12 350-2: Zkouška sednutím [N13]. Konzistence bude nastavena tak, aby sednutí kužele bylo 0 mm, tudíž kužel nesmí sednout či usmyknout se. Ve druhé etapě bude použita zkouška Vebe dle ČSN 12 350-3 [N14]. Zde pro změnu bude konzistence nastavena tak, aby se výsledek zkoušky pohyboval kolem 10 s, což z pohledu vyhodnocení zkoušky by mělo vyhovovat V2 až V3.

Ve ztvrdlém stavu budou provedeny zkoušky pevnosti v tlaku, zjištěna objemová hmotnost a objem mezer. V první etapě budou tyto zkoušky provedeny po 7 dnech, ve druhé etapě po 7 a 28 dnech. V každé z etap se vzorky desek podrobí zkoušce vodopropustnosti dle nenormových metod.

Z výše uvedených informací bude ve druhé etapě provedeno zkoušení odolnosti betonu proti CHRL dle normy ČSN 73 1326/Z1 [N16]. Vyrobena zkušební tělesa vodopropustného betonu budou vystavena působení po dobu 100 cyklů.

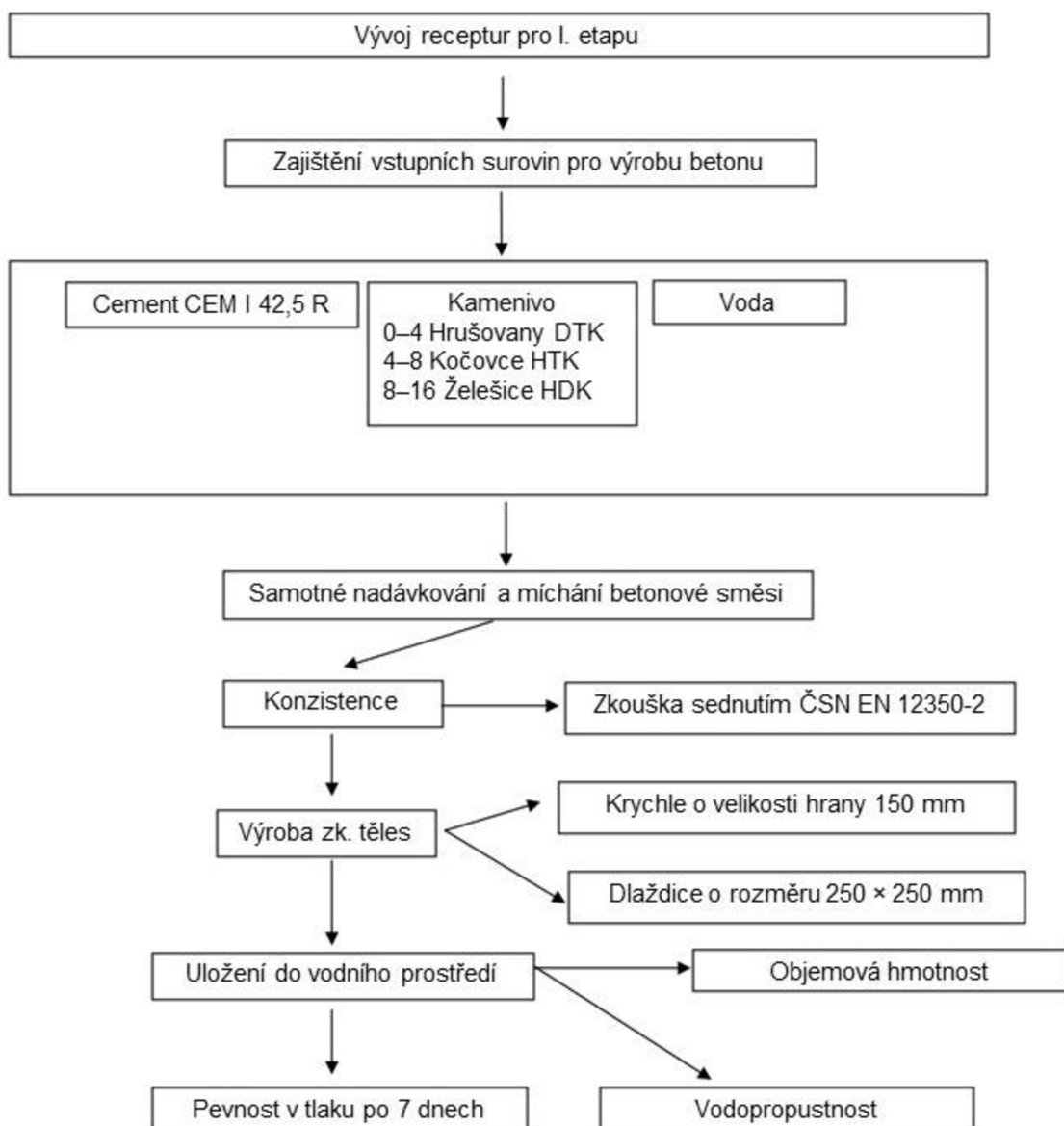
Poslední zkoumanou vlastností bude odolnost betonu proti obrusu. Bude využita metoda podle Böhme a dle normy ČSN EN 1339 – Betonové dlažební desky – Požadavky a zkušební metody [N15].

Ve třetí etapě budou v první kroku navrženy receptury. Po schválení návrhu receptur bude provedena výroba zkušebních těles pomocí Proctorova zařízení, štíhlostní poměr 2,0. Na těchto vzorcích budou stanoveny fyzikálně-mechanické parametry (pevnost v tlaku, objemová hmotnost).

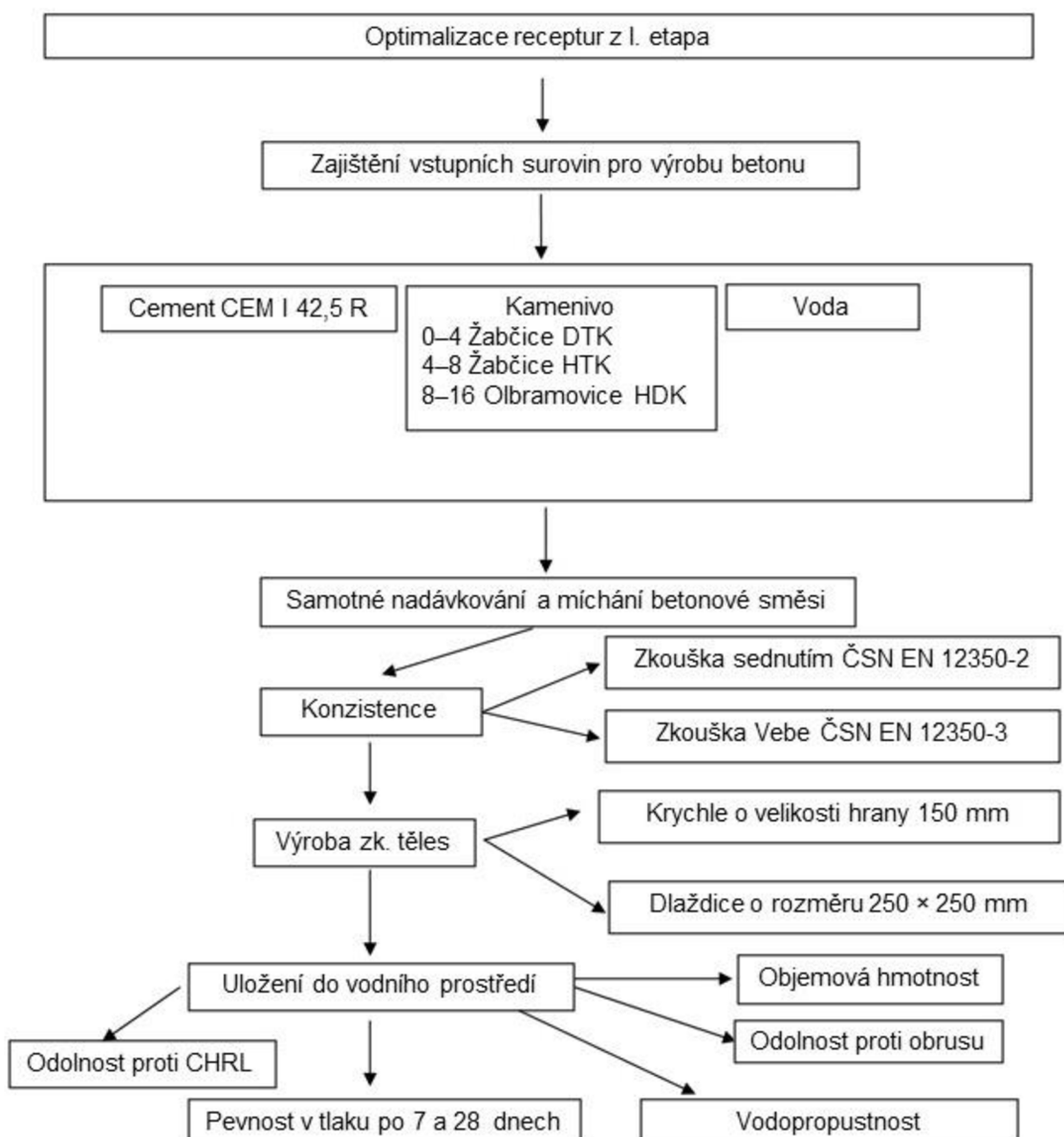
Posledním úkolem bude zhotovit zkušební tělesa o půdorysu 1×1 m a výšce 0,5 m za účelem stanovení pevnosti v tlaku a statického modulu pružnosti na válcových vývrtech. Dále ověřit hutnění a výrobu na stavbě pomocí vibrační desky.

Každá z výše popsaných etap je zobrazena v jednoduchých schématech na dalších stranách diplomové práce.

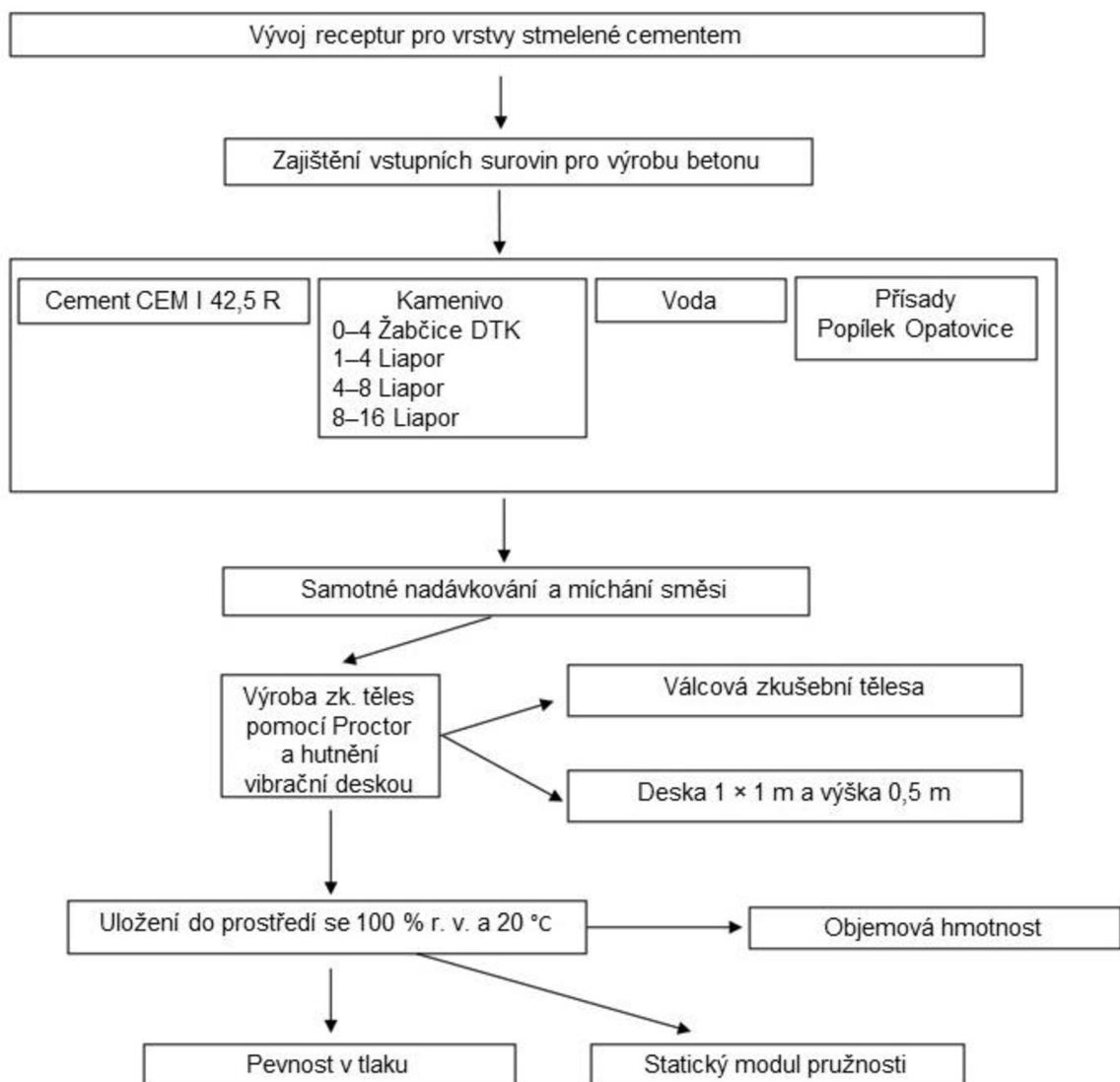
Obr. č. 23: Schéma metodiky pro I. etapu



Obr. č. 24: Schéma metodiky pro II. etapu



Obr. č. 25: Schéma metodiky pro III. etapu



7. Vstupní suroviny

7.1. Cement

Při vývoji receptur vodopropustného betonu byl použit jako hlavní pojivová složka cement CEM I 42,5 R, jehož výrobcem je Českomoravský cement, který je součástí skupiny Heidelberg Cement Group. Cement byl odebírán ze závodu Mokrý. Byl využit jak cement pytlovaný, tak cement odebíraný ze sila. Cement je vhodný do betonu a vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 197-1 ed.2 ve znění Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití [N17].

Tab. č. 1: Vybrané důležité vlastnosti cementu CEM I 42,5 R – Mokrý u Brna

Vlastnost cementu	Sledované období	Hodnota
Pevnost v tlaku	2 dny	31,8 MPa
	28 dní	60,6 MPa
Počátek tuhnutí		194 min
Konec tuhnutí		260 min
Měrný povrch		388 m ² /kg
Měrná hmotnost		3130 kg/m ³

7.2. Kamenivo

Pro první etapu bylo využito kamenivo, které má naskladněno firma Prefa Brno a.s., závod Strážnice pro výrobu svých prefabrikovaných výrobků – kanalizační trubky, skruže, šachtová dna. Kamenivo bylo uloženo na otevřené nezastřešené skládce.

Ve druhé etapě se použilo kamenivo, které bylo dostupné na VUT FAST v Brně na ústavu Technologie hmot a stavebních dílců.

V následující tabulce č. 2. jsou uvedeny skladby pro jednotlivé etapy

Tab. č. 2: Skladba kameniva pro jednotlivé etapy s určením lokality dovozu

Frakce kameniva	Lokalita pro I. etapu	Lokalita pro II. etapu
0–4 mm	Hrušovany	Žabčice
4–8 mm	Kočovce	Žabčice
8–16 mm	Želešice	Olbramovice

V následujících řádcích bude postupně seznámena každá frakce kameniva použitá ve vyrobených betonech. Jako první bude pojednáno o kamenivu pro I. etapu.

Frakci 0–4 mm z lokality Hrušovany dodává firma České štěrkopísky. Jedná se o přírodní těžené prané kamenivo.

Další frakcí je kamenivo 4–8 mm, taktéž se jedná o přírodní těžené kamenivo. Lokalita Kočovce je mimo území ČR, přesněji se jedná o Slovenskou republiku. Majitelem této šterkopískovny jsou Slovenské šterkopísky, sesterská firma České šterkopísky.

Posledním kamenivem pro první etapu je kamenivo o frakci 8–16 mm z lokality Želešice. Zde se jedná o přírodní drcené kamenivo, přesněji o horninu amfibolit, která se vyznačuje vysokou pevností a zelenošedou barvou. Lom je dle fotodokumentace na webových stránkách etážový. Majitelem kamenolomu je Kámen Zbraslav. [28]

U druhé etapy budou informace obdobného charakteru. Frakce 0–4 mm z lokality Žabčice je těžený praný kopaný písek. Dodavatelem je firma Zepiko. Od stejného majitele je i frakce 4–8 mm. Přírodní těžené kamenivo prané. Posledním zmiňovaným kamenivem je frakce 8–16 mm. Jedná se o drcené kamenivo, těženou horninou je granodiorit. Majitelem je Českomoravský štěrk ze skupiny firem Heidelbergcement Group. [29]

Veškeré výše uvedené kamenivo vyhovuje požadavkům vyplývající z normy ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu [N18] a normě ČSN EN 13242+A1 Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace [N19].

V tabulce č. 3 níže jsou uvedené vybrané vlastnosti kameniva, které je potřebné znát k návrhu směsí pro vodopropustný beton.

Tab. č. 3: Souhrnná tabulka vlastností použitého kameniva

Frakce kameniva	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Sypná hmotnost [kg/m ³]	Mezerovitost [%]
0–4 mm Hrušovany	2554	1590	37,74
4–8 mm Kočovce	2605	1410	45,87
8–16 mm Želešice	2910	1440	50,52
0–4 mm Žabčice	2600	1590	38,85
4–8 mm Žabčice	2600	1410	45,77
8–16 mm Olbramovice	2630	1440	45,28

Kromě výše uvedených kameniv bylo ve třetí etapě použito uměle vyráběné keramické kamenivo Liapor ve frakcích 1–4, 4–8 a 8–16 mm. Liapor vyhovuje požadavkům ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu [N18].

7.3. Voda

Do všech receptur byla použita voda vyhovující normě 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 [N20].

V první etapě byla použita voda, kterou využívá opět firma Prefa Brno a.s. Ve druhé etapě byla využita voda pocházející z městského vodovodu, jejímž distributorem jsou Brněnské vodárny a kanalizace a.s..

7.4. Přísady

V praktické části nebyly použity ani plastifikační ani superplastifikační přísady. Vzhledem k tomu, že receptury jsou navrhovány pro pozemní komunikace, a tedy pro stupeň agresivity prostředí XF bylo by vhodné využít provzdušňovací přísady. Po dohodě s vedoucím práce bylo laboratorní zkoušení receptur provedeno bez využití přísad.

7.5. Příměsi

V prvních dvou etapách praktické části nebyly využity žádné příměsi. Ve třetí etapě pak byl použit elektrárenský popílek z elektrárny Opatovice. Vlastnosti popílku vyhovují normě ČSN EN 450-1: Popílek do betonu – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody [N21].

8. I. etapa – Vývoj a prvotní zkoušení receptur

Na začátku této etapy byl kladen důraz zejména na výpočet a zároveň praktické vyzkoušení receptur na základě poskytnutých podkladů od vedoucího. Bylo navazováno na diplomovou práci Ing. Skřivánka. S ohledem na požadovanou vodopropustnost a díky poznatkům získaných v teoretické části, byly receptury navrhovány zprvu ve dvou hranicích maximálního zrna kameniva, přesněji s $D_{max} = 8$ mm a $D_{max} = 16$ mm. Ze souboru různých kombinací poměrů kameniv byly vybrány pro $D_{max} = 8$ mm dvě receptury a pro $D_{max} = 16$ celkově 4 receptury. Pro všechny receptury bylo společné celkové množství cementu. Z navržených receptur byla vyhotovena zkušební tělesa ve tvaru krychle o hraně 150 mm pro stanovení pevnosti betonu v tlaku a desky pro stanovení vodopropustnosti. Při skladbě kameniva byla značně omezena frakce 0–4 mm. Bylo použito minimální množství kameniva, které je potřebné, aby byl vodopropustný beton nazýván betonem v pravém slova smyslu. Je taktéž patrné, že byla využita jiná křivka zrnitosti oproti tradičním betonům.

V tabulce č. 4 je uveden souhrn receptur pro $D_{max} = 8$ mm a v tabulce č. 6 pro $D_{max} = 16$ mm.

Tab. č. 4: Receptury pro $D_{max} = 8$ mm

Složka betonové směsi:	Receptura D1	Receptura D2
Cement CEM I 42,5 R	360 kg	360 kg
Kamenivo:		
0–4 mm Hrušovany DTK	673 kg	769 kg
4–8 mm Kočovce HTK	1 250 kg	1 154 kg
Voda	82,5 l	94,5 l
Vodní součinitel w	0,23	0,26

Tab. č. 5: Poměry kameniva pro $D_{max} = 8$ mm

Složka betonové směsi:	Receptura D1	Receptura D2
0–4 mm Hrušovany DTK	35 %	40 %
4–8 mm Kočovce HTK	65 %	60 %

Tab. č. 6: Receptury pro Dmax = 16 mm

Složka betonové směsi:	Receptura H2	Receptura H3	Receptura H1/1	Receptura H1/4
Cement CEM I 42,5 R	360 kg	360 kg	360 kg	360 kg
Kamenivo:				
0–4 mm Hrušovany DTK	577 kg	577 kg	673 kg	673 kg
4–8 mm Kočovce HTK	385 kg	481 kg	192 kg	481 kg
8–16 mm Želešice HDK	962 kg	866 kg	1 058 kg	769 kg
Voda	128 l	143 l	140 l	149 l
Vodní součinitel w	0,36	0,40	0,39	0,41

Tab. č. 7: Poměry kameniva pro Dmax = 16 mm

Složka betonové směsi:	Receptura H2	Receptura H3	Receptura H1/1	Receptura H1/4
0–4 mm Hrušovany DTK	30	30	35	35
4–8 mm Kočovce HTK	20	25	10	25
8–16 mm Želešice HDK	50	45	55	40

8.1. Vyhodnocení naměřených výsledků

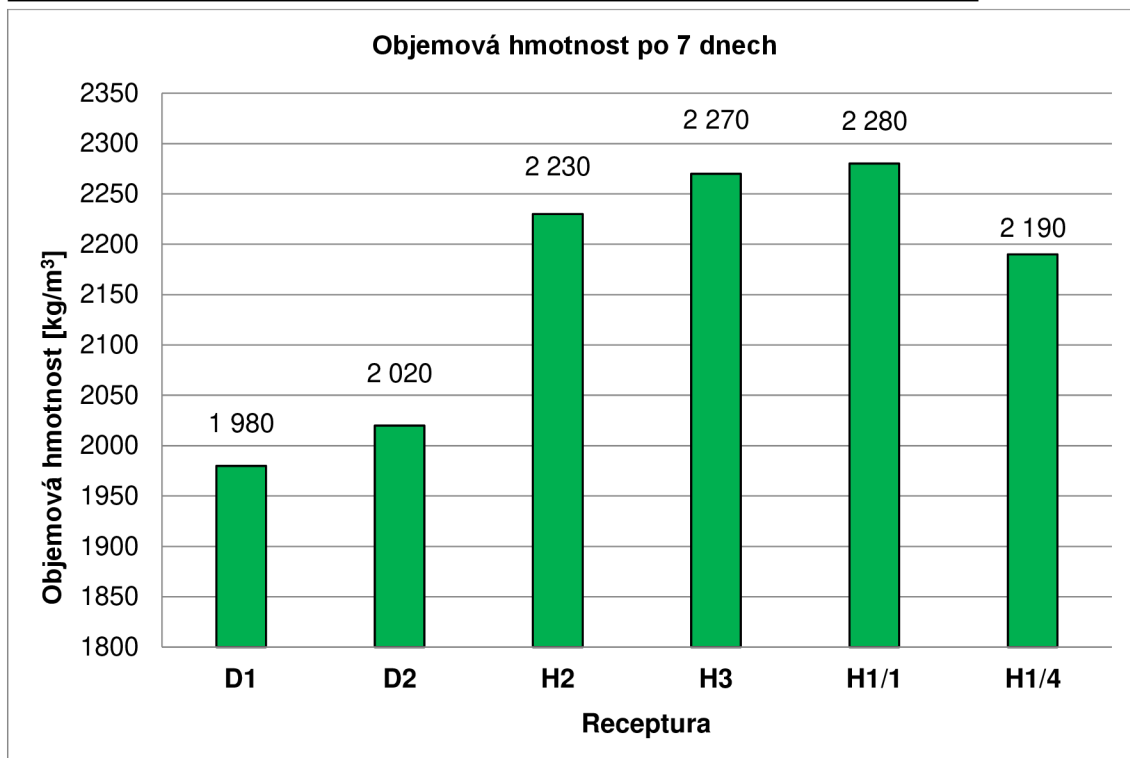
Tab. č. 8: Souhrnná tabulka vlastností pro receptury s Dmax = 8 mm

Receptura	7denní pevnost v tlaku f_c [MPa]	D [kg/m ³]	Vodopropustnost [l/(min·m ²)]
D1	7,0	1980	46,5
D2	11,6	2020	18,7

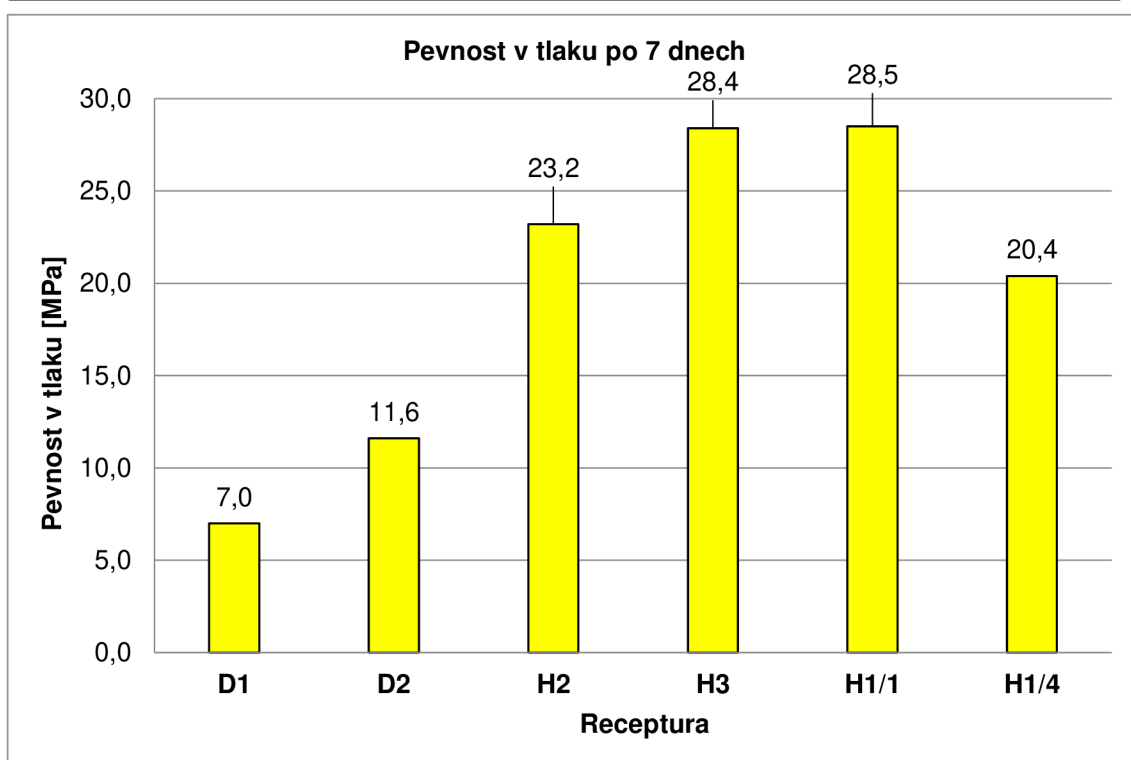
Tab. č. 9: Souhrnná tabulka vlastností pro receptury s Dmax = 16 mm

Receptura	7denní pevnost v tlaku f_c [MPa]	D [kg/m ³]	Vodopropustnost [l/(min·m ²)]
H2	23,2	2230	24,5
H3	28,4	2270	33,0
H1/1	28,5	2280	22,3
H1/4	20,4	2190	29,4

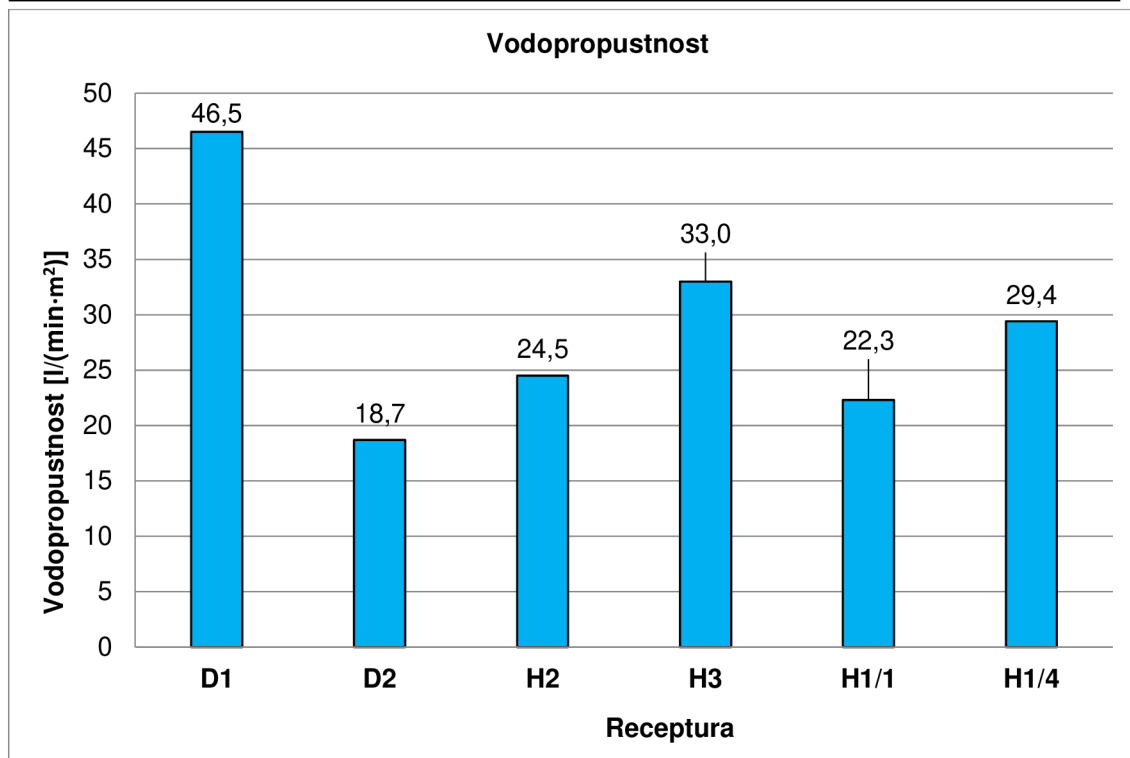
Graf č. 1: Grafické porovnání objemových hmotností v závislosti na typu receptury



Graf č. 2: Grafické porovnání pevnosti betonu v tlaku po 7 dnech v závislosti na typu receptury



Graf č. 3: Grafické porovnání pevnosti betonu v tlaku po 7 dnech v závislosti na typu receptury



8.2. Zhodnocení a komentář k výsledkům I. etapy

První etapa byla specifická oproti druhé etapě z pohledu přípravy betonové směsi. Z důvodu absence automatické míchačky bylo použito ruční míchání pomocí ručního míchadla a lopaty.

Konzistence čerstvého betonu se u všech receptur podařila udržet na požadovaných a v metodice práce definovaných hodnotách. V této etapě byla využita pouze zkouška sednutím dle normy ČSN EN 12350-2 [N13]. U žádné z receptur nedošlo k posunu vzniklého kužele ani k usmyknutí.

Na grafu č. 2. je znatelné, že pevnosti v tlaku u receptur s $D_{max} = 8$ mm nabyly hodně nízkých hodnot, lidově by se tento beton dal nazvat „slepičím“ betonem. Pro splnění zadání, kdy je požadována pevnostní třída od C 20/25 je jasné, že by tento beton neuspěl. Je možné, že v betonu nebylo dostatek cementového tmelu na obalení zrn kameniva tak, aby bylo možné dosáhnout větších pevností betonu v tlaku. S ohledem na to, že tyto receptury byly míchány v samotném začátku výzkumu praktické části, je možné přikládat vliv seznamování se s technologií výroby těchto betonů. Nejlépe z pohledu pevnosti v tlaku vypadají receptury H3 a H1/1. U těchto receptur se dá předpokládat splnění zadání po 28 dnech.

Při porovnání objemových hmotností u jednotlivých receptur na grafu č. 1. je zřetelné, že receptury s $D_{max} = 16$ mm se dařilo hutnit stejně a vyrovnávají se konvenčním betonům.

Další zkoušenou vlastností v této etapě byla vodopropustnost. Dle naměřených výsledků lze konstatovat neúspěšnost této etapy. Byla zde využita nenormová zkouška vodopropustnosti, kde se zkoušela celá plocha. Nízké hodnoty vodopropustnosti je možné zdůvodnit tak, že došlo až k přílišnému hutnění (pěchování) čerstvé betonové směsi, které zapříčinilo ucpání mezer mezi zrny kameniva, tím pádem jsou výsledky vodopropustnosti na takové úrovni. Zkouška vodopropustnosti se považuje za regulérní, nedocházelo k úniku vody mimo zatěžovanou plochu. Celkově snaha vyrobit zkušební tělesa o ideální rovinnosti povrchu byla spíše než k užitku, tak k přítěži.

Přestože v předchozím odstavci byly výsledky shazovány, s podivem však vyšla nejlepší vodopropustnost u receptury, která měla nejnižší pevnost v tlaku po 7 dnech, jedná se o recepturu D1, kde $D_{max} = 8 \text{ mm}$.

Po provedeném zhodnocení celé etapy bylo rozhodnuto, že pro další etapu jsou doporučeny receptury o $D_{max} = 16 \text{ mm}$, přesněji se použijí receptury H3 a H1/1.

Receptury s maximální zrnem kameniva 8 mm již dále v praktické části nebudou použity.

9. II. etapa – Optimalizování receptur z I. etapy a zkoušky trvanlivosti

Etapa navazuje na proběhlou první etapu. Na základě výsledků byla provedena optimalizace s ohledem na získání požadovaných pevností betonu v tlaku po 28 dnech.

Z předchozích receptur se použily receptury H3 a H1/1, které vykazovaly ideální pevnosti po 7 dnech, předpoklad pro ideální výsledné pevnosti po 28 dnech, které vyhoví zadání. K těmto recepturám se po poradě s vedoucím přidala ještě receptura s označením H1. Receptura obsahovala totožné množství cementu na 1 m³, přesněji 360 kg na 1 m³ betonové směsi a z pohledu poměrů kameniv je víc frakce 8–16 mm oproti receptuře H3. Souhrnně jsou receptury popsány v tab. č. 10 a procentní skladba jednotlivých frakcí kameniva u výše uvedených receptur je znázorněna v tab. č. 11.

Tab. č. 10: Optimalizované receptury II. etapy s Dmax = 16 mm

Složka betonové směsi:	Receptura H1	Receptura H3	Receptura H1/1
Cement CEM I 42,5 R	360 kg	360 kg	360 kg
Kamenivo:			
0–4 mm Žabčice DTK	577 kg	577 kg	673 kg
4–8 mm Žabčice HTK	289 kg	481 kg	192 kg
8–16 mm Olbramovice HDK	1 058 kg	866 kg	1 058 kg
Voda	138 l	137 l	139 l
Vodní součinitel w	0,38	0,38	0,39

Tab. č. 11: Poměry kameniva u optimalizovaných receptur s Dmax = 16 mm

Složka betonové směsi:	Receptura H1	Receptura H3	Receptura H1/1
0–4 mm Žabčice DTK	30	30	35
4–8 mm Žabčice HTK	15	25	10
8–16 mm Olbramovice HDK	55	45	55

U čerstvé betonové směsi byla provedena zkouška Vebe dle normy ČSN EN 12350-3 [N14]. Následně bylo vyrobeno z každé směsi celkově 6 zkušebních těles ve tvaru krychle o hraně 150 mm, kde dvě tělesa posloužila ke stanovení pevnosti betonu v tlaku po 7 dnech, další dvě ke stanovení pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech a dvě zkušební tělesa byla vystavena působení chemických rozmrazovacích látek. Pro zkoušku vodopropustnosti byly taktéž vyhotoveny zkušební tělesa ve tvaru desky o rozměrech 250 × 250 mm a výškou 50 mm.

Následující den po výrobě zkušebních těles byly vzorky podrobeny nedestruktivní zkoušce – Stanovení objemu mezer – dle normy ČSN 73 6124-2: Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelovaných hydraulickými pojivy – Část 2: Mezerovitý beton [N22]. Postupovalo se podle přílohy A uvedené ve výše uvedené normě.

Vodopropustnost byla v této etapě zkoušena dvojím způsobem. Oba postupy stanovení vodopropustnosti nejsou normované. V ČR se zatím zkouší různé přístupy zkoušení vodopropustnosti. Tato problematika byla probírána v teoretické části. Pro stanovení vodopropustnosti byly použity totožné objemy vody, přesně objem 0,9 l. Pouze se měnila zkoušená plocha a materiál ohraničující zkoušenou plochu. V prvním případě byla zatěžována celá plocha zkušební desky, ve druhém byla zatěžovaná plocha kruhového průřezu o průměru 125 mm. Obdoba ASTM C1701/C1701M-09 [N1].

Poslední zkouškou, které byly vzorky z daných receptur vystaveny, bylo zkoušení odolnosti proti obrusu. Vzorek z každé receptury byl vystaven zátěži 16ti cyklů po 22 otáčkách. Postupovalo se dle normy ČSN EN 1339 příloha H [N23].

9.1. Vyhodnocení naměřených výsledků

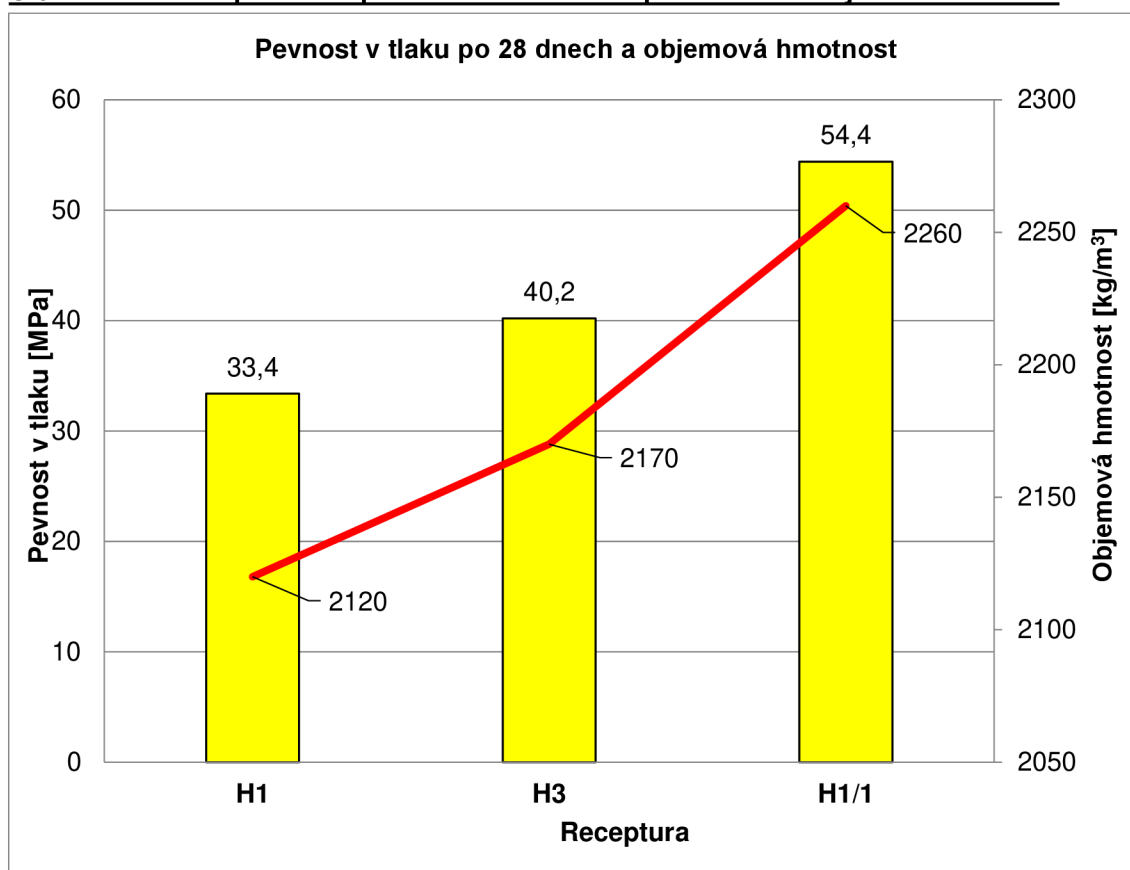
Tab. č. 12: Konzistence čerstvé směsi a zároveň výsledný objem mezer u jednotlivých receptur

Receptura	Konzistence dle Vebe	Objem mezer [ml]	Objem mezer v % z celkového objemu zk. tělesa
H1	V2	502	14,86
H3	V2	466	13,81
H1/1	V2	383	11,35

Tab. č. 13: Souhrnná tabulka pevnosti betonu v tlaku a objemové hmotnosti

Receptura	7denní pevnost v tlaku f_c [MPa]	D [kg/m ³]	28denní pevnost v tlaku f_c [MPa]	D [kg/m ³]
H1	23,8	2090	33,4	2120
H3	29,6	2170	40,2	2170
H1/1	35,8	2210	54,4	2260

Graf. č. 4: Grafické porovnání pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech a objemové hmotnosti



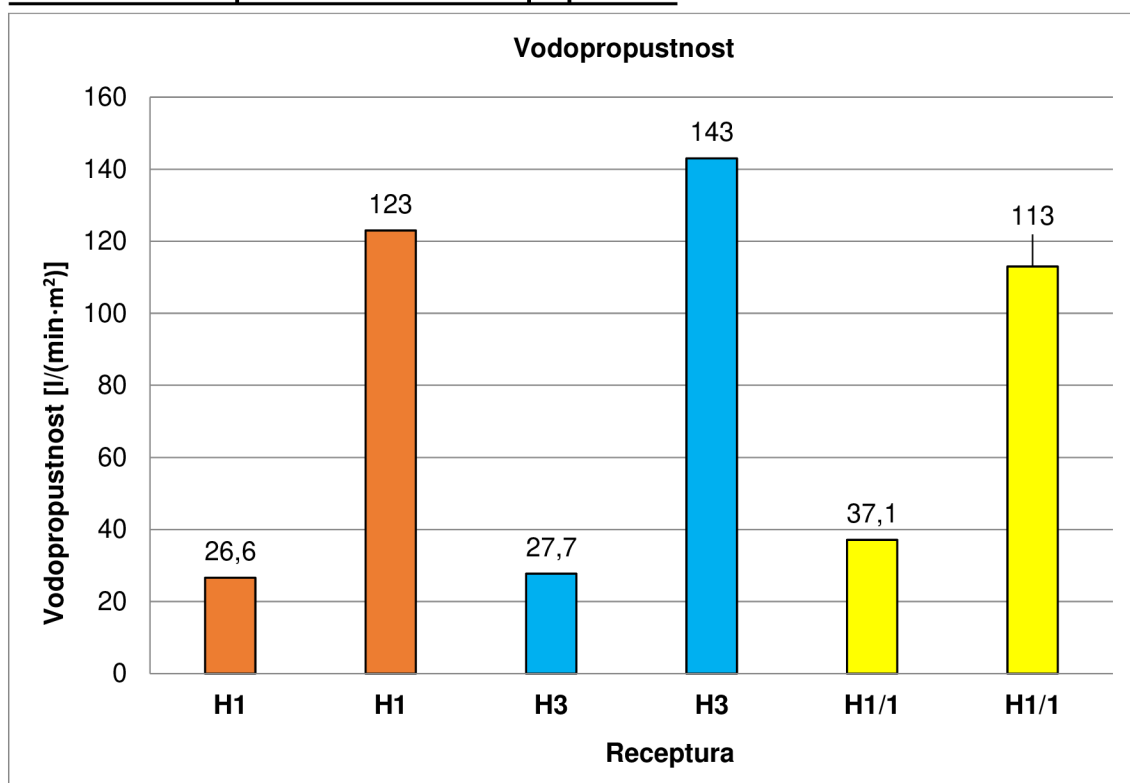
Tab. č. 14: Zatřídění receptur do pevnostních tříd

Receptura	28denní pevnost v tlaku f_c [MPa]	Zatřídění do pevnostních tříd
H1	33,4	C25/30
H3	40,2	C30/37
H1/1	54,4	C40/50

Tab. č. 15: Naměřené hodnoty vodopropustnosti u jednotlivých receptur

Receptura	Vodopropustnost na celou plochu vzorku [l/min·m ²]	Vodopropustnost s využitím PVC trubky Ø125 mm [l/min·m ²]
H1	26,6	123
H3	27,7	143
H1/1	37,1	113

Graf. č. 5: Grafické porovnání zkoušek vodopropustnosti

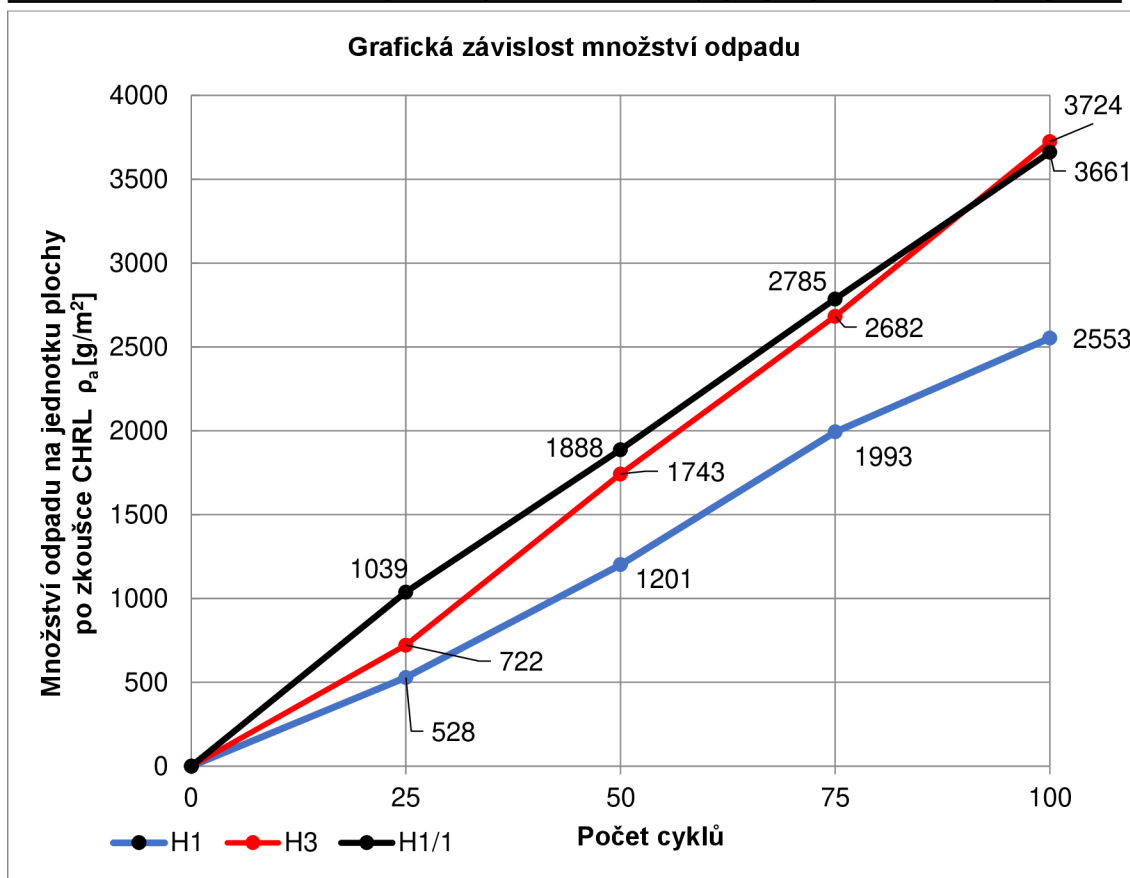


Pozn. První sloupec u každé receptury představuje vodopropustnost zkoušenou na celou plochu vzorku. Druhý sloupec grafu vykazují hodnoty odpovídající zkoušce pomocí PVC, kde zatěžovaná plocha byla kruhová o průměru 125 mm.

Tab. č. 16: Výsledné hodnoty množství odpadu po zkoušce CHRL u jednotlivých receptur

Receptura	Hmotnost odpadu na plochu ρ_a [g/m ²] po 25 cyklech	Hmotnost odpadu na plochu ρ_a [g/m ²] po 50 cyklech	Hmotnost odpadu na plochu ρ_a [g/m ²] po 75 cyklech	Hmotnost odpadu na plochu ρ_a [g/m ²] po 100 cyklech
H1	528	1201	1993	2553
H3	722	1743	2682	3724
H1/1	1039	1888	2785	3661

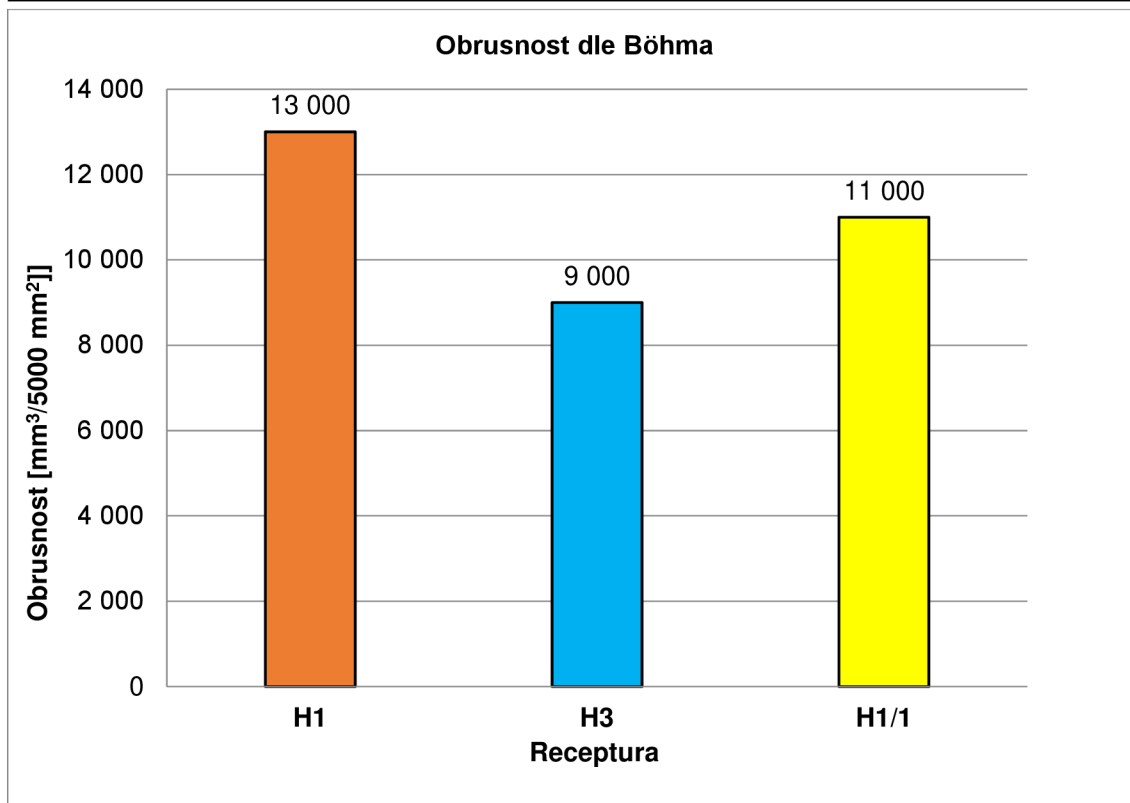
Graf. č. 6: Grafické znázornění výsledků po zkoušce CHRL, vývoj úbytku hmotností po cyklech



Tab. č. 17: Výsledné hodnoty obrusnosti zkoušených receptur dle normy ČSN EN 1339 [N23]

Receptura	Obrusnost [mm ³ /5 000 mm ²]	Třída dle normy	Označení dle normy
H1	13 000	4	I
H3	9 000	4	I
H1/1	11 000	4	I

Graf. č. 7: Grafické porovnání výsledků jednotlivých receptur po stanovení obrusnosti dle Böhma



9.2. Fotodokumentace II. etapy

Kapitola 9.2. nabízí pohled na průběh II. etapy praktické části vývoje technologie vodopropustných betonů. Fotodokumentace postupuje od výroby betonové směsi, zkoušení konzistence přes zkoušení vodopropustnosti až po závěrečnou zkoušku obrusnosti.



Obr. č. 25: Konzistence betonové směsi dle Vebe



Obr. č. 26: Zkoušení vodopropustnosti (vlevo pomocí PVC, vpravo zkoušení na celou plochu vzorku)



Obr. č. 27: Struktura receptury H3, vzorky před zkouškou pevnosti v tlaku



Obr. č. 28: Struktura receptury H1, vzorky před zkouškou pevnosti v tlaku



Obr. č. 29: Struktura receptury H1/1, vzorky před zkouškou pevnosti v tlaku

Pozn. Z obr. č. 29 je patrné, že struktura byla v čerstvém stavu cementovým tmelem zalitá více než receptury H1 a H3. Je zřejmé, že výsledky pevnosti taktéž z tohoto důvodu vyšly nejlépe u receptury H1/1.



Obr. č. 30: Receptura H1 po zkoušce odolnosti proti CHRL



Obr. č. 31: Receptura H3 po zkoušce odolnosti proti CHRL

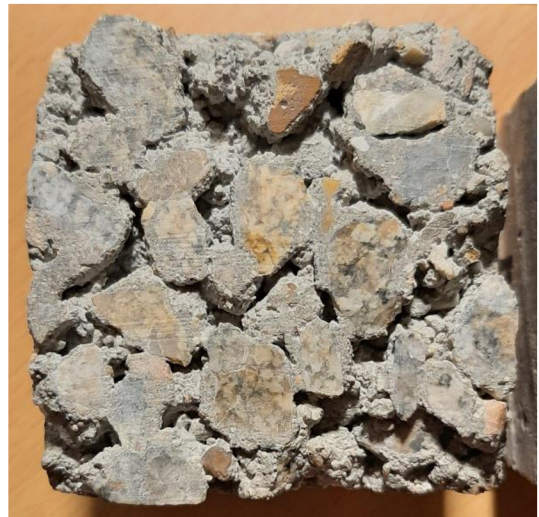


Obr. č. 32: Receptura H1/1 po zkoušce odolnosti proti CHRL

Pozn. Na všech snímcích na této stránce je patrné, že zkoušený povrch je značně narušen.



Obr. č. 33: Struktura vzorků před zkouškou obrusnosti



Obr. č. 34: Struktura vzorků po zkoušce obrusnosti

9.3. Zhodnocení a komentář k výsledkům II. etapy

Druhá etapa byla v porovnání s I. etapou o poznání lepší. Z naměřených výsledků pevnosti betonu v tlaku, které je možné vidět v grafu č. 4. je zřejmé, že cíl vyrobit betony o pevnostních třídách C20/25 až C30/37 je splněn. Taktéž je patrný rozdíl pevností způsobený skladbou kameniva, kde receptura H1/1, která obsahovala 35 % frakce 0–4 mm, nabyla nejvyšší hodnoty v porovnání s recepturami obsahujícími nižší procento frakce 0–4 mm.

V komparaci výsledků vodopropustnosti v závislosti na pevnosti v tlaku, vychází nejvýhodněji receptura H3 při využití zkoušky vodopropustnosti pomocí PVC.

Dalším cílem bylo dosáhnout vodopropustnosti nad 80 l/(min·m²). Dle grafu č. 5 všechny receptury tomuto požadavku vyhovují. Dále lze soudit na základě grafu č. 5, že zkoušení na menší zatěžovanou plochu přináší lepší výsledky, než zatěžování na celou plochu zkušebního vzorku. Taktéž je zde možnost, že uprostřed vzorku je struktura víc mezerovitější než na okrajích vzorku. Dalším aspektem může být i zkoušený objem vody.

O poznání horší byly výsledky po zkoušení trvanlivosti povrchu vodopropustného betonu dle ČSN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu proti CHRL [N16]. Prvním aspektem, který je zde potřeba zdůraznit, že vzorky nebyly provzdušněny. U těchto betonů je zpravidla problematické zjišťovat množství vzduchu v betonu tím, jak je směs mezerovitá. Tím pádem je problematické dávkování provzdušňovací přísady.

V konečném důsledku však platilo, čím vyšších pevností betonu v tlaku se dosahovalo, tím se snáze cementový tmel po zmrazování a rozmrazování s roztokem solí rozpadal. Na druhou stranu lze konstatovat, že výsledky jsou ovlivněny poměrně velkým zastoupením frakce 8–16 mm, kdy i jedno zrno kameniva této frakce váží relativně dost. Bohužel konečný verdikt je, že tyto receptury nejsou vhodné pro prostředí XF a tudíž je není možné použít pro obrusnou vrstvu pozemní komunikace. Pro ložnou vrstvu by však vhodné byly, ale musely by se ověřit zkouškou mrazuvzdornosti.

Poslední zkouškou prováděnou v této etapě bylo stanovení obrusnosti metodou podle Böhma. Dle tab. č. 17 je zřejmé, že všechny namíchané receptury vyhovují požadavkům, které jsou kladeny na betonové desky dle výše uvedené normy. Podařilo se docílit relativně stejné obrusnosti u všech zkoušených receptur. Hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 9 000 do 13 000 mm³ / 5 000 mm². Tím pádem lze desky z receptur zařadit do třídy 4 a označit písmenem I, všechny naměřené hodnoty jsou menší než 18 000 mm³ / 5 000 mm².

10. III. etapa – Návrh složení hydraulicky stmelených podkladních vrstev

Třetí etapa nenavazuje na žádnou z předchozích dvou etap. Výzkum byl v prvním kroku zaměřen na návrh receptur pro směsi kameniv stmelených cementem. Ze souboru receptur byly vybrány dvě. U první receptury s označením SC 5/6 se očekávají nižší pevnosti a dále se počítá s využitím pro nižší provoz na pozemních komunikacích. Druhá receptura s označením SC 8/10 se předpokládá využít pro silnější provoz na pozemních komunikacích. Navržené složení obou receptur je uvedeno v tab. č. 18.

SC je definováno dle normy ČSN 73 6124-1 Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění a kontrola shody [N24] jako směs z kameniva stmelená cementem.

Obě receptury lze klasifikovat dle normy ČSN EN 14227-1 [25] jako SC typ 4 – 0/16.

Tab. č. 18: Navržené složení směsí kameniv stmelených cementem

Složka stmelené směsi	Receptura SC 5/6	Receptura SC 8/10
Cement CEM I 42,5 R	75 kg	95 kg
Kamenivo:		
0–4 mm Žabčice DTK	710 kg	805 kg
1–4 mm Liapor	120 l	58 l
4–8 mm Liapor	162 l	195 l
8–16 mm Liapor	235 l	235 l
Popílek Opatovice	60 kg	55 kg
Voda	115 l	120 l
Optimální vlhkost	11,0 %	11,1 %

Dle metodiky práce se následně z každé receptury vyhotovily zkušební tělesa o štíhlostním poměru rovnému 2 pomocí Proctorova zařízení. Tělesa posloužila ke stanovení objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku. Tělesa zrála při teplotě +20 °C a při relativní vlhkosti 100 %.

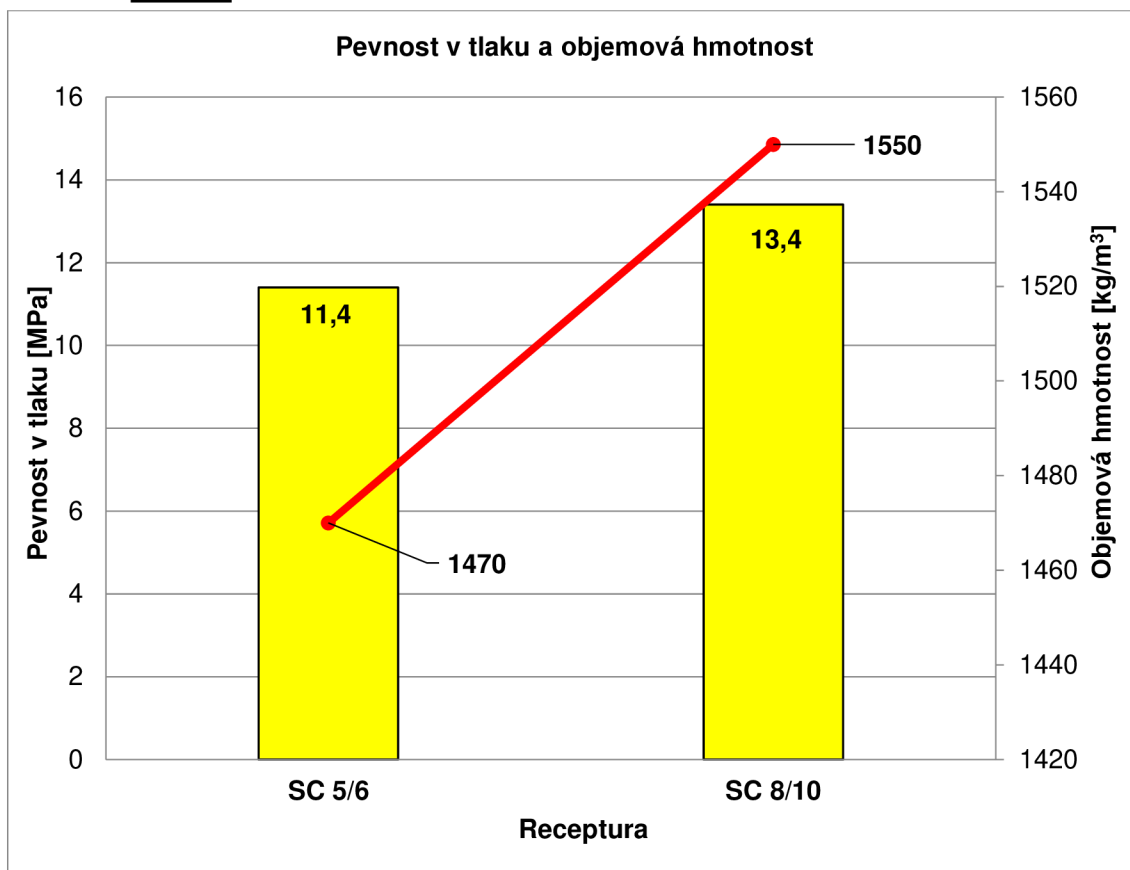
Kromě výroby zkušebních těles pomocí Proctorova zařízení, byla vyrobena zkušební deska o rozměrech 1 × 1 m a výšce 0,5 m pro zkoušení protlačení desky a pro odběr válcových vzorků ke stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Taktéž výroba této desky sloužila jako simulace staveništního prostředí. Hutněno bylo pomocí vibrační desky.

10.1. Vyhodnocení naměřených výsledků III. etapy

Tab. č. 19: Výsledné hodnoty objemových hmotností a pevnosti v tlaku na válcových vzorcích vyrobené pomocí Proctorova zařízení

Receptura	Štíhlostní poměr [-]	D [kg/m ³]	Pevnost v tlaku f_c [MPa]
SC 5/6	2,0	1470	11,4
SC 8/10	2,0	1550	13,4

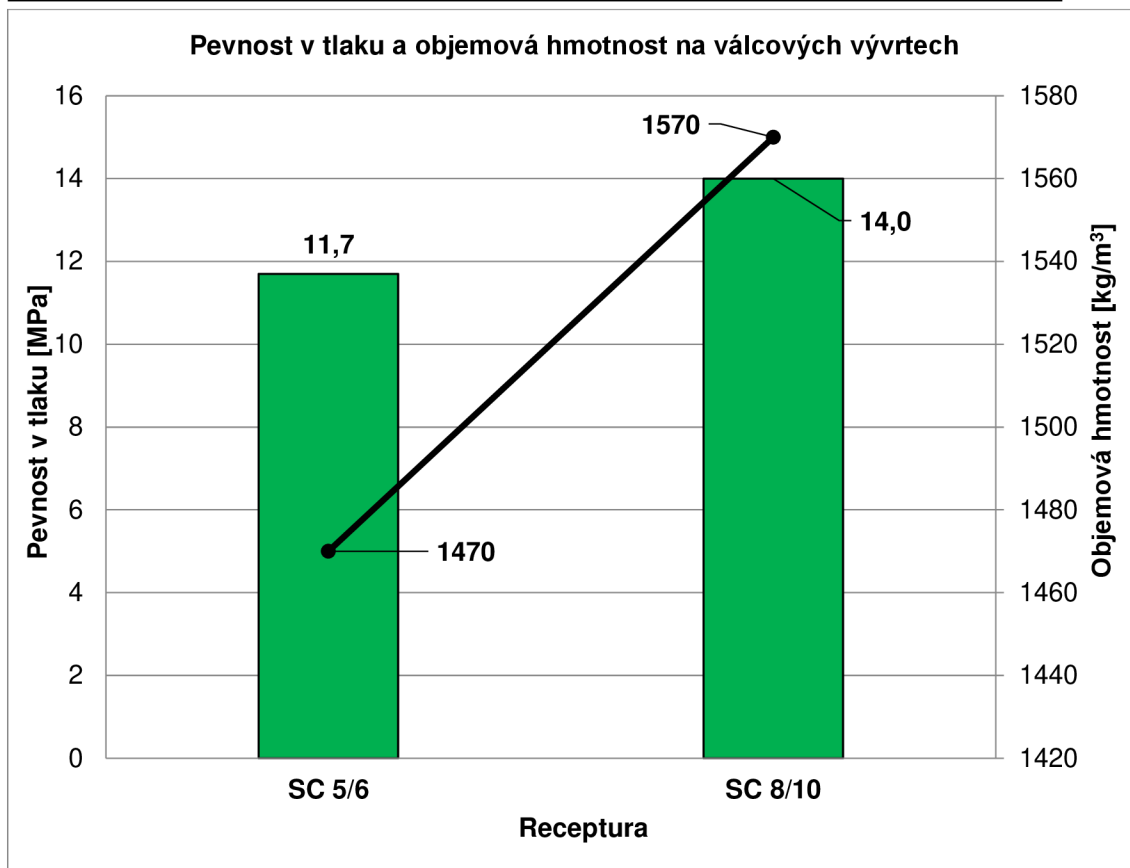
Graf. č. 8: Grafické vyjádření výsledků pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti na vyrobených vzorcích



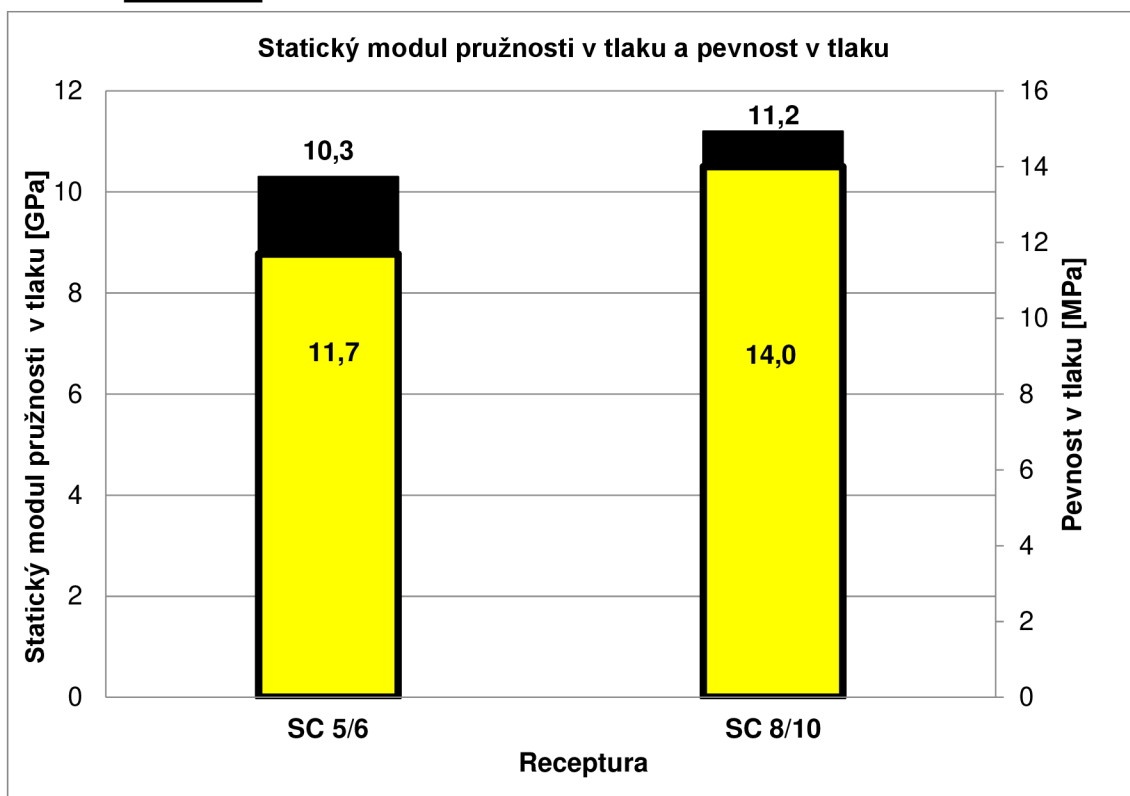
Tab. č. 20: Výsledné hodnoty objemových hmotností, pevnosti v tlaku a statického modulu pružnosti na válcových vývrtech

Receptura	Štíhlostní poměr [-]	D [kg/m ³]	Pevnost v tlaku f_c [MPa]	Statický modul pružnosti v tlaku [GPa]
SC 5/6	2,0	1470	11,7	10,3
SC 8/10	2,0	1570	14,0	11,2

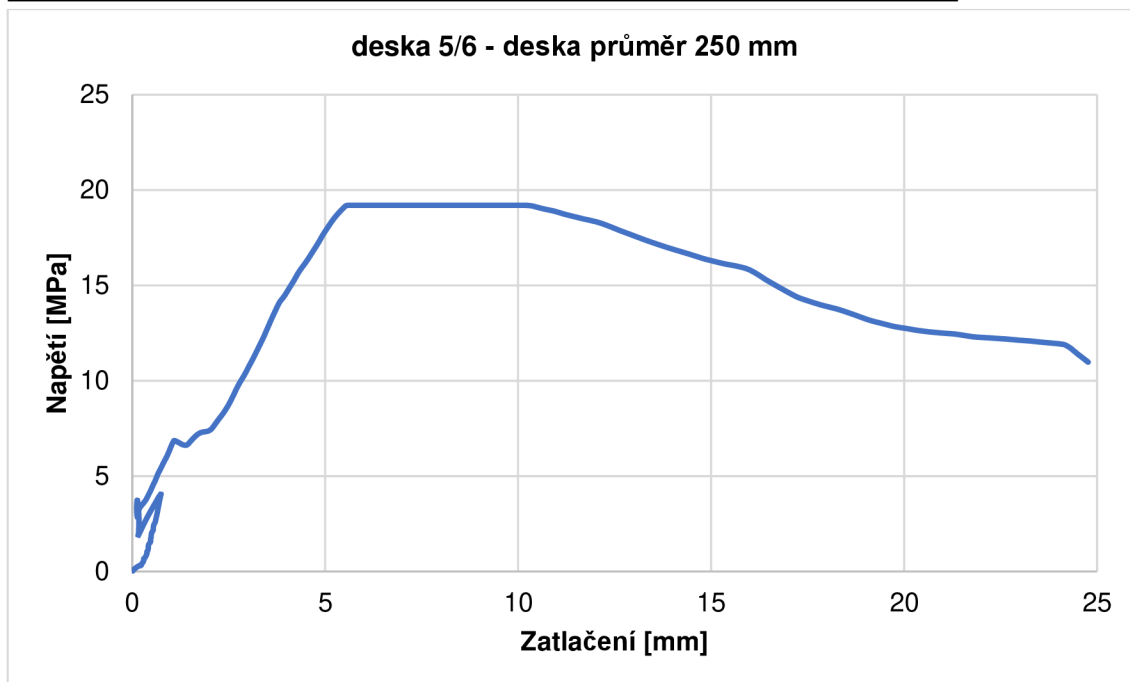
Graf. č. 9: Grafické vyjádření výsledků pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti na vývrtech



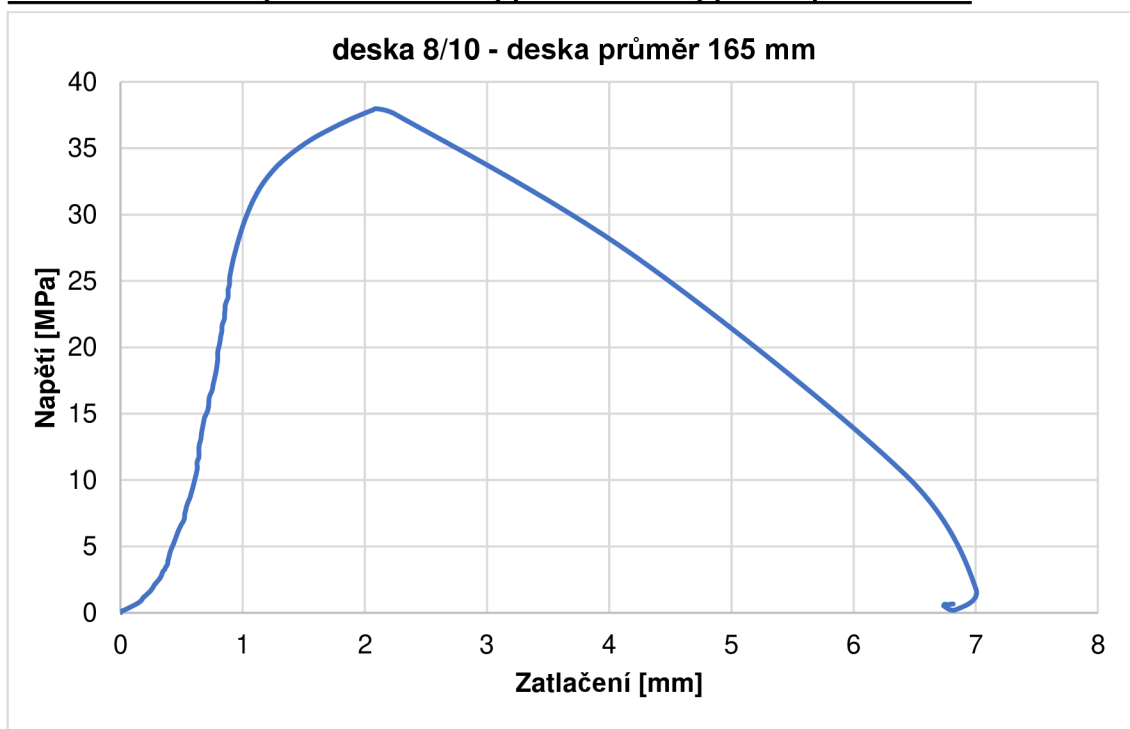
Graf. č. 10: Grafické porovnání výsledků pevnosti v tlaku a statického modulu pružnosti v tlaku na vývrtech



Graf. č. 11: Grafické vyhodnocení zkoušky protlačení desky pro recepturu SC 5/6



Graf. č. 12: Grafické vyhodnocení zkoušky protlačení desky pro recepturu SC 8/10



10.2. Zhodnocení a komentář ke III. etapě

Třetí etapa nabídla pohled na jinou vrstvu komunikace oproti předchozím dvěma etapám. Byl proveden návrh a vyzkoušení receptur pro podkladní vrstvy, přesněji se jednalo o kamenivo stmelené cementem. Po zhlédnutí výsledků výše lze soudit, že cíl navrhnout receptury s válcovou pevností v tlaku v rozmezí C5/6 až C8/10 je splněn.

Receptura s označením SC 5/6 měla hodnotu pevnosti v tlaku 11,4 MPa, což znamená, že se podařilo navrhnout směs, která dosahuje dvojnásobek pevnosti, než je požadovaná minimální hodnota. Stejného výsledku bylo dosaženo u receptury SC 8/10. Objemové hmotnosti obou receptur jsou ovlivněny skladbou kameniva, kdy bylo použito hlavně uměle vyráběné lehké kamenivo.

Statický modul pružnosti v tlaku u obou receptur dosahuje hodnot, které jsou nad minimální návrhovou hodnotou definovanou v TP 170 [N9]. Hodnoty 11,2 GPa pro SC 8/10 a 10,3 GPa pro SC 5/6 značně převyšují hodnotu 2,5 GPa definovanou v dokumentu uvedeném o řádku výše.

Při zkoušce protlačení desky byly prokázáno, že SC 8/10 odolá lépe většímu napětí při stlačení, než receptura SC 5/6, přestože byl u SC použit menší průměr.

Další z věcí, kterou se podařilo ověřit, bylo hutnění na místě pomocí vibrační desky. Na výsledcích pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti je jasně zřetelné, že se dařilo hutnit stejně jak pomocí Proctorova zařízení, tak i vibrační deskou.

V konečném výsledku lze tyto receptury doporučit pro využití v konstrukci vozovky. Použit se tyto receptury mohou pro podkladní vrstvy pochozích, tak i pro výrazně mechanicky namáhané pojízdné komunikace.

11. Závěr

V teoretické části diplomové práce byl definován cíl provést podrobnou rešerši o problematice vodopropustných betonů. V několika kapitolách bylo hovořeno o výrobě, požadavcích na tyto betony. Důkladně a podrobně se práce zabývala zkoušením vodopropustnosti, která v ČR nemá zatím oporu v normách, ve světě existuje spousta přístupů ke zkoušení. Při seznamování se s požadavky na PC zazněla myšlenka, která popisuje problém s dopravními nehodami a vodopropustným systémem. Na následovnicích, kteří se v budoucnu budou zabývat problematikou vývoje technologie vodopropustných betonů bude, aby zjistili, co se systémem tyto látky udělají a jak systém vyčistit.

Kromě vodopropustných betonů se teoretická část zabírala komunikacemi. Po základním rozdělení komunikací podle zákona o pozemních komunikacích se přešlo k podrobnému probrání celé skladby konstrukce vozovky. Byly představeny všechny konstrukční vrstvy od podloží po kryty.

Závěr teoretické části byl věnován krytům z dlážděných dílců, které se zejména využívají pro pochozí komunikace – chodníky.

V konečném důsledku lze považovat cíl teoretické části za splněný.

Pro praktickou část byly určeny dva hlavní cíle. Prvním bylo navrhnout vodopropustné betony pro pevnostní třídy C25/30 až C30/37 s co největší vodopropustností. Druhým cílem bylo navrhnout podkladní vrstvy kameniva stmelěného cementem v pevnostní třídě C5/6 až C8/10.

Praktická část diplomové práce byla rozčleněna na tři etapy. První etapa byla zejména seznamovací. Probíhalo seznámení se se samotnou technologií výroby PC. Výsledky, které vznikly z této etapy, posloužily jako startovací receptury pro druhou etapu.

Druhá etapa přinesla již výsledky, které jsou použitelné pro praxi. Z pohledu pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech bylo prokázáno, že všechny receptury splnily cíl zadání a podařilo se vyrobit receptury, které byly následně roztríděny do pevnostních tříd. Další ze zkoušených vlastností byla vodopropustnost. Bylo zjištěno, že zkoušení vodopropustnosti na celou plochu nepřináší dobré výsledky, proto bylo přistoupeno ke změně metody. Druhá metoda pomocí PVC trubky přinesla výsledky, které splňují zadání. Vzhledem k tomu, že v ČR není na zkoušení vodopropustnosti zatím legislativa, není s čím naměřené výsledky porovnávat. Lze tedy předpokládat, že všechny tři receptury by měly propustit jakoukoliv intenzitu deště. Po zkoušce PC betonů na odolnost proti CHRL bylo konstatováno, že povrch těchto betonů není prakticky vůbec odolný proti rozmrazovacím solím, a tudíž nevyhovuje stupni XF a není vhodný pro povrchové vrstvy pozemních komunikací. Je to jedna z kaněk na této etapě. Na samotný závěr etapy byla

provedena zkouška obrusnosti dle Böhma. Všechny receptury splnily normové požadavky. Podařilo se vyrobit receptury, které nabyly prakticky totožných hodnot obrusnosti. Hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 9 000 do 13 000 mm³/ 5 000 mm². V konečném zhodnocení praktické části vodopropustných betonů se stanovené cíle podařilo naplnit. Pevnost v tlaku, obrusnost a vodopropustnost vyhovují definovaným požadavkům. Poslední vlastnost – odolnost proti CHRL se nevydařila a kazí tak celkový dojem.

Poslední etapa diplomové práce se zabývala směsí kameniva stmelených cementem. Výsledky prokázaly, že se podařilo navrhnout směsi pro dané pevnostní třídy a jsou vhodné pro použití v konstrukčních vrstvách pozemních komunikací.

Na závěr celé diplomové práce se sluší konstatovat, že výzkum vodopropustných betonů je během na dlouhou trať. Je ještě spousta technologických aspektů, které je potřeba vyřešit, aby výsledný vodopropustný beton bylo možné použít v praxi. Věřím, že tato diplomová práce přispěla aspoň částečně k tomuto kroku.

12. Seznam použitých zdrojů

12.1. Použitá literatura

- [1] NEVŘIVOVÁ, Lenka. Technická termodynamika: Modul BJ11 M05: Termodynamika vlhkého vzduchu. Brno, 2006. Skriptum. VUT FAST Brno.
- [2] STARÝ, Miloš. Hydrologie: Modul 01. Brno, 2005. Skriptum. VUT FAST Brno.
- [3] MORAVEC, Jiří. STUDIE PROTIEROZNÍ OCHRANY S VYUŽITÍM SYSTÉMU PŘÍRODĚ BLÍZKÝCH OPATŘENÍ. Brno, 2013. Bakalářská práce. VUT FAST Brno. Vedoucí práce Doc. Ing. Miroslav Dumbrovský, CSc.
- [4] Pervious concrete. Sika [online]. USA: SIKA CORPORATION, 2021 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://usa.sika.com/dms/getdocument.get/ee9dfa9a-86b7-318b-b511-8b3ff7635671/bro-cpd-PerviousConcrete-us.pdf>
- [5] A. OFFENBERG, Matthew. *Report on Pervious Concrete* [online]. Farmington Hills, U.S.A.: American Concrete Institute, 2010 [cit. 2021-12-14]. ISBN 978-0-87031-364-6. Dostupné z: <https://cecollection2.files.wordpress.com/2020/05/522r-10-report-on-pervious-concrete.pdf>
- [6] Skřivánek, M.: Návrh technologie vodopropustných betonů, diplomová práce VUT FAST Brno, 2017
- [7] VTT TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND: Class – Project climatec adaptive surfaces. Finland, 2014.
- [8] ASTM C1701/C1701M-17a Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. ASTM International [online]. USA: ASTM International, 2020 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: https://www.astm.org/c1701_c1701m-17a.html
- [9] ASTM C1781/C1781M-21 Standard Test Method for Surface Infiltration Rate of Permeable Unit Pavement Systems. ASTM International [online]. USA: ASTM International, 2021 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: https://www.astm.org/c1781_c1781m-21.html
- [10] CHEN, Lu-Ming, Jui-Wen CHEN, Ting-Hao CHEN, Timothy LECHER a Paul C. DAVIDSON. Measurement of Permeability and Comparison of Pavements. *Water* [online]. 2019, 2 March 2019, 11(3), 8-12 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/3/444>

- [11] Manual for NCAT Asphalt Field Permeameter Kit. GILSON COMPANY, INC. [online]. USA: GILSON COMPANY, 2021 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://www.globalgilson.com/Content/Images/uploaded/pdf/product-manuals/manual-asphalt-field-permeameter.pdf?v=20211223032011966>
- [12] DIN 19682-7:2007-07: Soil quality - Field tests - Part 7: Determination of infiltration rate by double ring infiltrometer. Normservis s.r.o. [online]. Ždár nad Sázavou: Normservis, 2021 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://eshop.normservis.cz/norma/din-19682-7-1.7.2007.html>
- [13] BLAHUT, Dominik. SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VSAKOVÁNÍ VODY Z POLNÍCH EXPERIMENTŮ A NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ. Brno, 2017. Diplomová práce. VUT FAST Brno. Vedoucí práce Ing. DAVID DUCHAN, Ph.D.
- [14] ČSN EN 12697-40: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 40: Propustnost in situ. Česká republika: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [15] BETONOVÉ VODOPROPUSTNÉ DLAŽEBNÍ PRVKY PRO VSAKOVACÍ DLAŽBY. TZUS [online]. Praha: Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p., 2021 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://www.tzus.cz/aktuality/betonove-vodopropustne-dlazezbní-prvky-pro-vsakovaci-dlazby>
- [16] Vodopropustná dlažba. SILNICE MOSTY [online]. 2021, 2021(2), 40 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://www.silnice-mosty.cz/1665-vodopropustna-dlazba/>
- [17] Pervious Concrete Pavements [online]. 2. Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 2004 [cit. 2021-12-23]. ISBN 0-89312-242-4. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/242722509_Pervious_Concrete_Pavements
- [18] ŠIROKÁ, Helena. Představení vodopropustného betonu. Stavebnictví3000.cz [online]. Hradec Králové: VEGA spol. s r.o, 2018 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/vodopropustny-beton-pervious-concrete>
- [19] Fulton Bank Pervious Concrete Parking Area. Specify Concrete [online]. USA: Specify Concrete, 2021 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://www.specifyconcrete.org/technical-center/case-studies/fulton-bank-pervious>

- [20] Tamien Park - Community Driven Design with Stormwater in Mind. Bay Area Pervious Concrete [online]. USA: Bay Area Pervious Concrete, 2017 [cit. 2021-12-22].
Dostupné z:
<http://www.bayareaperviousconcrete.com/blog/2017/5/16/tamien-park-community-driven-design-with-stormwater-in-mind>
- [21] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon o pozemních komunikacích.
In: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-13>. Praha: Ministerstvo vnitra, 1997,
ročník 1997, 3/1997, číslo 13.
- [22] HRDOUŠEK A KOLEKTIV, Vladislav. *Inženýrské stavby*. Praha: INFORMATORIUM,
spol., 2006. ISBN 80-7333-048-2.
- [23] TP 170: Navrhování vozovek pozemních komunikací. Praha: Ministerstvo dopravy
České republiky, 2004.
- [24] ZAJÍČEK A KOLEKTIV, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: Informační centrum
ČKAIT, 2015. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [25] TECHNICKÉ KVALITATIVNÍ PODMÍNKY STAVEB POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ:
Kapitola 6 CEMENTOBETONOVÝ KRYT. Praha: Ministerstvo dopravy Odbor
pozemních komunikací, 2015.
- [26] TECHNICKÁ NORMA ČB KSC 02-2015. Kamenivo zpevněné cementem (KSC I,
KSC II). Beroun: BETOTECH, 2015.
- [27] TP 192: Dlažby pro konstrukce pozemních komunikací. Praha: Ministerstvo dopravy
České republiky, 2008.
- [28] Lom Želešice – KÁMEN Zbraslav. KÁMEN Zbraslav [online]. Praha: KÁMEN Zbraslav,
2021 [cit. 2021-12-27]. Dostupné z:
<https://kamenzbraslav.cz/provozovny/kamenolomy/kamenolom-zelesice/>
- [29] Kamenolom Olbramovice. HeidelbergCement [online]. Mokrý-Horákov:
Českomoravský štěrk, a.s., 2021 [cit. 2021-12-27]. Dostupné z:
<https://www.heidelbergcement.cz/cs/kontakty/cms/provozovny/olbramovice>

12.2. Použité normy a právní předpisy

- [N1] ASTM C1701/C1701M-09 Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete
- [N2] ASTM C1781/C1781M-13 Standard Test Method for Surface Infiltration Rate of Permeable Unit Pavement Systems
- [N3] ASTM C1701/C1701M-17a Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete
- [N4] ASTM C1781/C1781M-21 Standard Test Method for Surface Infiltration Rate of Permeable Unit Pavement Systems
- [N5] ASTM D3385-18 Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer
- [N6] ČSN EN ISO 22282-5 Geotechnický průzkum a zkoušení – Hydrotechnické zkoušky – Část 5: Vsakovací zkoušky
- [N7] NLT-327/00 Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS
- [N8] ČSN EN 12697-40 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 40: Propustnost in situ
- [N9] TP 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací – ŘSD a MD
- [N10] TP 192 DLAŽBY PRO KONSTRUKCE POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ – ŘSD a MD
- [N11] ČSN 73 6123-1 Stavba vozovek – Cementobetonové kryty – Část 1: Provádění a kontrola shod
- [N12] ČSN EN 13286-2 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška
- [N13] ČSN EN 12 350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím
- [N14] ČSN EN 12 350-3 Zkoušení čerstvého betonu – Část 3: Zkouška Vebe
- [N15] ČSN EN 1339 – Betonové dlažební desky – Požadavky a zkušební metody
- [N16] ČSN 73 1326/Z1 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek
- [N17] ČSN EN 197-1 ed. 2 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití
- [N18] ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu
- [N19] ČSN EN 13242+A1 Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace

- [N20] 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
- [N21] ČSN EN 450-1: Popílek do betonu – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody
- [N22] ČSN 73 6124-2 Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy – Část 2: Mezerovitý beton
- [N23] ČSN EN 1339 Betonové dlažební desky – Požadavky a zkušební metody
- [N24] ČSN 73 6124-1 Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění a kontrola shody
- [N25] ČSN EN 14227-1 Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 1: Směsi z kameniva stmelené cementem

12.3. Použité obrázky v teoretické části

[O1] Obr. č. 1: Mapa úhrnu srážek za rok 2020: Úhrn srážek v roce 2020.

Portál ČHMÚ [online]. Praha 4-Komořany: Český hydrometeorologický ústav, 2021 [cit. 2021-12-10].

Dostupné z:

[https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/charakteristiky klimatu/img/SRA_2020.gif](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/charakteristiky_klimatu/img/SRA_2020.gif)

[O2] Obr. č. 2: Ukázka obrometru: Srážkoměr SR03 500cm2. *FIEDLER ELEKTRONIKA PRO EKOLOGII* [online]. České Budějovice: FIEDLER AMS, 2017 [cit. 2021-12-21].

Dostupné z:

[https://www.fiedler.company/cs/produkty/snimace-meteorolog-velicin/destove srazky/srazkomer-sr03](https://www.fiedler.company/cs/produkty/snimace-meteorolog-velicin/destove-srazky/srazkomer-sr03)

[O3] Obr. č. 3: Ilustrace propustného systému: Pervious concrete. Sika [online]. USA: SIKA CORPORATION, 2021 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z:

<https://usa.sika.com/dms/getdocument.get/ee9dfa9a-86b7-318b-b511-8b3ff7635671/bro-cpd-PerviousConcrete-us.pdf>

[O4] Obr. č. 4: Unikání páry do ovzduší pomocí systému: Pervious concrete. Sika [online].

USA: SIKA CORPORATION, 2021 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z:

<https://usa.sika.com/dms/getdocument.get/ee9dfa9a-86b7-318b-b511-8b3ff7635671/bro-cpd-PerviousConcrete-us.pdf>

[O5] Obr. č. 5: Stacionární vibrolis: PERTA, Zenith 940 – Equipamento para produzir artefactos de betao. www.perta.pt Dostupné z:

<http://www.perta.pt/zenith-940-equipamento-para-produzir-artefactos-de-betao/>

[O6] Obr. č. 6: Ukládání čerstvé betonové směsi finišerem: GOMACO, RCC Success on an Ohio Industrial Loop Road. www.gomaco.com.

Dostupné z:

https://www.gomaco.com/resources/worldstories/world39_2/complete.html

[O7] Obr. č. 7: Ilustrativní obrázek ke zkoušení dle normy ASTM C1701/C1701M-21:

Infiltration test preparation on slab specimen according to ASTM C1701. *SciELO - Scientific Electronic Library Online* [online]. Brasil: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2018, Oct 2018 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z:

<https://www.scielo.br/j/riem/a/tXhWYPYvKTgJxXH5vbFvQsQ/?lang=en#ModalFig3>

- [O8] Obr. č. 8: Ilustrativní obrázek zkušebního zařízení dle NCAT:
NCAT Asphalt Field Permeameter Kit. *GILSON COMPANY, INC.* [online]. Spojené státy americké: GILSON COMPANY, 2021 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://www.globalgilson.com/ncat-asphalt-field-permeameter-kit>
- [O9] Obr. č. 9: Vsakovací dvouprstenec neboli double ring: IN10–W – Turf–Tec International
12" & 24" Infiltration Rings. Turf–Tec International [online]. USA: Turf–Tec International, 2018 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://www.turf-tec.com/IN10Lit.html>
- [O10] Obr. č. 10: Zkušební zařízení dle normy ČSN EN 12697 – 40:
Drainbeton – Pervious concrete for road surfaces. *Betonrossi* [online]. Itálie: Betonrossi S.p.a., 2021, [cit. 2021-12-21] Dostupné z: <https://www.betonrossi.it/en/drainbeton/pervious-concrete-road-surfaces>
- [O11] Obr. č. 11: Zkušební zařízení navržené dle autorů prof. Hely a Ing. Skřivánka:
Foto autora diplomové práce
- [O12] Obr. č. 12: Zkušební zařízení navržené TZÚS Praha s.p.: Obr. 1 Schéma uspořádání zkoušky vodoproustnosti na samostatném betonovém dlažebním prvku. TZUS [online]. Praha: Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p., 2021 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://www.tzus.cz/aktuality/betonove-vodopropustne-dlazezni-prvky-pro-vsakovaci-dlazby>
- [O13] Obr. č. 13: Chodník v parku v Bratislavě, Slovensko: ŠIROKÁ, Helena. Představení vodopropustného betonu. Stavebnictvi3000.cz [online]. Hradec Králové: VEGA spol. s.r.o, 2018 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/vodopropustny-beton-pervious-concrete>
- [O14] Obr. č. 14: Parkovací stání z PC v USA, Pensylvánie: Fulton Bank Pervious Concrete Parking Area. Specify Concrete [online]. USA: Specify Concrete, 2021 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://www.specifyconcrete.org/technical-center/case-studies/fulton-bank-pervious>

- [O15] Obr. č. 15: Dětské hřiště a park z PC v USA, San Jose: Tamien Park - Community Driven Design with Stormwater in Mind. Bay Area Pervious Concrete [online]. USA: Bay Area Pervious Concrete, 2017 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <http://www.bayareaperviousconcrete.com/blog/2017/5/16/tamien-park-community-driven-design-with-stormwater-in-mind>
- [O16] Obr. č. 16: Využití vodopropustného betonu pro cyklostezky: Elk Grove uses Pervious Concrete in a Round-About Way. Bay Area Pervious Concrete [online]. USA: Bay Area Pervious Concrete, 2017 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <http://www.bayareaperviousconcrete.com/blog/2017/3/15/elk-grove-uses-pervious-concrete-in-a-round-about-way>
- [O17] Obr. č. 17: Ilustrativní obrázek směrově nerozdělené dvoupruhové silnice:
HRDOUŠEK A KOLEKTIV, Vladislav. Inženýrské stavby. Praha: INFORMATORIUM, spol., 2006. ISBN 80-7333-048-2.
- [O18] Obr. č. 18: Ilustrativní obrázek směrově rozdělené silnice či dálnice (a_1 a a_2 = jízdni pruh):
HRDOUŠEK A KOLEKTIV, Vladislav. Inženýrské stavby. Praha: INFORMATORIUM, spol., 2006. ISBN 80-7333-048-2.
- [O19] Obr. č. 19: Ilustrativní obrázek skladby konstrukce vozovky:
HRDOUŠEK A KOLEKTIV, Vladislav. Inženýrské stavby. Praha: INFORMATORIUM, spol., 2006. ISBN 80-7333-048-2.
- [O20] Obr. č. 20: Katalogová skladba vozovek pro návrhovou úroveň D0 – dálnice a silnice I. třídy: TP 170: Navrhování vozovek pozemních komunikací. Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, 2004.
- [O21] Obr. č. 21: Ilustrativní skladba vrstev pro pochozí komunikaci z katalogu firmy:
Příklad skladby chodníku. *Prefa Brno* [online]. Brno: Prefa Brno, 2021 [cit. 2021-12-27]. Dostupné z: https://www.prefa.cz/wp-content/uploads/2020/04/PREFA-BRNO_Katalog_PREFA-DEKOR_WEB.pdf
- [O22] Obr. č. 22: Skladba vrstev pro pochozí komunikaci z TP 170 [N9]: TP 170: Navrhování vozovek pozemních komunikací. Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, 2004.

13. Seznam tabulek, grafů, obrázků, příloh a zkratk

13.1. Seznam tabulek

Tab. č. 1: Vybrané důležité vlastnosti cementu CEM I 42,5 R – Mokrá u Brna

Tab. č. 2: Skladba kameniva pro jednotlivé etapy s určením lokality dovozu

Tab. č. 3: Souhrnná tabulka vlastností použitého kameniva

Tab. č. 4: Receptury pro $D_{max} = 8 \text{ mm}$

Tab. č. 5: Poměry kameniva pro $D_{max} = 8 \text{ mm}$

Tab. č. 6: Receptury pro $D_{max} = 16 \text{ mm}$

Tab. č. 7: Poměry kameniva pro $D_{max} = 16 \text{ mm}$

Tab. č. 8: Souhrnná tabulka vlastností pro receptury s $D_{max} = 8 \text{ mm}$

Tab. č. 9: Souhrnná tabulka vlastností pro receptury s $D_{max} = 16 \text{ mm}$

Tab. č. 10: Optimalizované receptury II. etapy s $D_{max} = 16 \text{ mm}$

Tab. č. 11: Poměry kameniva u optimalizovaných receptur s $D_{max} = 16 \text{ mm}$

Tab. č. 12: Konzistence čerstvé směsi a zároveň výsledný objem mezer u jednotlivých receptur

Tab. č. 13: Souhrnná tabulka pevnosti betonu v tlaku a objemové hmotnosti

Tab. č. 14: Zatřídění receptur do pevnostních tříd

Tab. č. 15: Naměřené hodnoty vodopropustnosti u jednotlivých receptur

Tab. č. 16: Výsledné hodnoty množství odpadu po zkoušce CHRL u jednotlivých receptur

Tab. č. 17: Výsledné hodnoty obrusnosti zkoušených receptur

Tab. č. 18: Navržené složení směsí kameniv stmelených cementem

Tab. č. 19: Výsledné hodnoty objemových hmotností a pevnosti v tlaku na válcových vzorcích vyrobené pomocí Proctor zařízení

Tab. č. 20: Výsledné hodnoty objemových hmotností, pevnosti v tlaku a statického modulu pružnosti na válcových vývrtech

13.2. Seznam grafů

Graf č. 1: Grafické porovnání objemových hmotností v závislosti na typu receptury

Graf č. 2: Grafické porovnání pevnosti betonu v tlaku po 7 dnech v závislosti na typu receptury

Graf č. 3: Grafické porovnání pevnosti betonu v tlaku po 7 dnech v závislosti na typu receptury

Graf č. 4: Grafické porovnání pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech a objemové hmotnosti

Graf č. 5: Grafické porovnání zkoušek vodopropustnosti

Graf č. 6: Grafické znázornění výsledků po zkoušce CHRL

Graf č. 7: Grafické porovnání výsledků jednotlivých receptur po stanovení obrusnosti dle Böhma

Graf č. 8: Grafické vyjádření výsledků pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti na vyrobených vzorcích

Graf č. 9: Grafické vyjádření výsledků pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti na vývrtech

Graf č. 10: Grafické porovnání výsledků pevnosti v tlaku a statického modulu pružnosti v tlaku na vývrtech

Graf č. 11: Grafické vyhodnocení zkoušky protlačení desky pro recepturu SC 5/6

Graf č. 12: Grafické vyhodnocení zkoušky protlačení desky pro recepturu SC 8/10

13.3. Seznam obrázků

Obr. č. 23: Schéma metodiky pro I. etapu

Obr. č. 24: Schéma metodiky pro II. etapu

Obr. č. 25: Schéma metodiky pro III. etapu

Obr. č. 26: Zkoušení vodopropustnosti (vlevo pomocí PVC, vpravo zkoušení na celou plochu vzorku)

Obr. č. 27: Struktura receptury H3, vzorky před zkouškou pevnosti v tlaku

Obr. č. 28: Struktura receptury H1, vzorky před zkouškou pevnosti v tlaku

Obr. č. 29: Struktura receptury H1/1, vzorky před zkouškou pevnosti v tlaku

Obr. č. 30: Receptura H1 po zkoušce odolnosti proti CHRL

Obr. č. 31: Receptura H3 po zkoušce odolnosti proti CHRL

Obr. č. 32: Receptura H1/1 po zkoušce odolnosti proti CHRL

Obr. č. 33: Struktura vzorků před zkouškou obrusnosti

Obr. č. 34: Struktura vzorků po zkoušce obrusnosti

13.4. Seznam příloh

Technický list cementu CEM I 42,5 R – Mokrý u Brna

Statické hodnocení kvality cementu za srpen 2021

Prohlášení o vlastnostech kameniva Hrušovany frakce 0–4 mm

Prohlášení o vlastnostech kameniva Kočovce frakce 4–8 mm

Prohlášení o vlastnostech kameniva Želešice frakce 8–16 mm

Prohlášení o vlastnostech kameniva Žabčice frakce 0–4 mm

Prohlášení o vlastnostech kameniva Žabčice frakce 4–8 mm

Prohlášení o vlastnostech kameniva Olbramovice frakce 8–16 mm

Prohlášení o vlastnostech kameniva Liapor frakce 1–4, 4–8, 8–16 mm

Osvědčení o stálosti vlastností popílku z elektrárny Opatovice

13.5. Seznam zkratk

PC	vodopropustný beton, pervious concrete
KSC	kamenivo stmelené cementem
CB kryt	cementobetonový kryt
CHRL	chemické rozmrazovací látky
ČR	Česká republika
ŘSD ČR	Ředitelství silnic a dálnic Česká republika
MD	Ministerstvo dopravy
ASTM	American Society for Testing and Materials
NCAT	National Center for Asphalt Technology
TZÚS Praha s.p.	Technický a zkušební ústav stavební
THD	Technologie stavebních hmot a dílců
DTK	Drobné těžené kamenivo
HTK	Hrubé těžené kamenivo
HDK	Hrubé drcené kamenivo
PVC	Polyvinylchlorid
SC	Směs z kameniva stmelená cementem

14. Přílohy