

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Konstrukce pozemních staveb

Katedra betonových a zděných konstrukcí



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Performance based design složení betonové směsi

Vyhotovil: Jakub Hobza

Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Jan L. Vitek, CSc, FEng.

Praha 2017



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hobza Jméno: Jakub Osobní číslo: 424450

Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Performance based design složení betonové směsi

Název bakalářské práce anglicky: Performance based design of composition of concrete mix

Pokyny pro vypracování:

Bakalářská práce bude mít 3 části:

1. Teoretická část (rešerše a popis metody)
2. Praktická část (ověření vlastností betonu na laboratorních vzorcích)
3. Formulace závěrů

Seznam doporučené literatury:

Dokumenty fib a ACI


Platné normy ČSN EN

Jméno vedoucího bakalářské práce: Prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc., FEng.

Datum zadání bakalářské práce: 20.2.2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 19.5.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

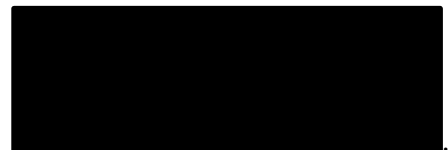
Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské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

20.2.2017
Datum převzetí zadání

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Performance based design složení betonové směsi** zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

V Praze dne



Jakub Hobza

Poděkování

Děkuji panu Prof. Ing. Janu L. Vítkovi, CSc, FEng za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování bakalářské práce.

Děkuji panu Ing. Robertu Coufalovi, Ph.D. za odborné konzultace a užitečné rady při zpracování bakalářské práce.

Děkuji společnosti TBG Metrostav s.r.o. za bezplatné poskytnutí podmínek a materiálů pro namíchání vzorků.

Děkují společnosti SQZ s.r.o. za poskytnutí zázemí pro zkoušení vzorků.

**PERFORMANCE BASED DESIGN SLOŽENÍ
BETONOVÉ SMĚSI**

PERFORMANCE BASED DESIGN OF
COMPOSITION OF CONCRETE MIX

Anotace

Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. Teoretická část popisuje metodu návrhu betonu na základě výsledných vlastností (performance-based design) a preskriptivní metodu. Porovnání performance-based specifikace s preskriptivní specifikací betonové směsi. Experimentální část popisuje návrh receptur, které se od sebe odlišují různým vodním součinitelem a různým množstvím cementu, výrobu zkušebních těles a následné provedení zkoušek podle norem. Dále popisuje vyhodnocení a porovnání výsledků provedených zkoušek.

Klíčová slova:

Preskriptivní specifikace, performance-based specifikace, přijímací podmínky, zkoušení čerstvého betonu, zkoušení ztvrdlého betonu, vodní součinitel, množství cementu.

Summary

This Thesis is divided into theoretical and experimental part. Theoretical part describes performance-based design for concrete and prescriptive method. Theoretical part also describes comparison between performance-based specification for concrete and prescriptive specification. Experimental part describes design of recipes and creation samples for testing. Finally thesis shows comparison between these samples and final results.

Key words:

Prescriptive specification, performance-based specification, acceptance criteria, testing fresh concrete, testing hardened concrete, water- cement ratio, amount of cement.

Obsah

1. ÚVOD	5
2. TEORETICKÁ ČÁST	6
2.1. PRESKRIPTIVNÍ SPECIFIKACE	6
2.1.1. <i>Co je to preskriptivní specifikace?</i>	6
2.1.2. <i>Preskriptivní charakteristiky betonu</i>	7
2.1.3. <i>Výhody a nevýhody</i>	7
2.2. PERFORMANCE-BASED SPECIFIKACE	8
2.2.1. <i>Co je to performance-based specifikace?</i>	8
2.2.2. <i>Proč se zabývat performance-based specifikací?</i>	8
2.2.3. <i>Základní koncept, jak by měla vypadat performance-based specifikace</i>	9
2.2.4. <i>Základní performance-based charakteristiky</i>	10
2.2.5. <i>Výhody a nevýhody</i>	11
2.3. PŘEJÍMACÍ PODMÍNKY	12
2.4. ODPOVĚDNOST ZÚČASTNĚNÝCH STRAN	13
2.4.1. <i>Rizika a odpovědnost</i>	13
2.4.2. <i>Příklad provádění průmyslové podlahy</i>	14
2.5. SOUČASNÝ STAV	16
2.6. PROBLÉM PRESKRIPTIVNÍCH CHARAKTERISTIK	18
2.6.1. <i>Vodní součinitel</i>	18
2.7. ZKOUŠENÍ	19
2.7.1. <i>Zkoušky na čerstvém betonu</i>	19
2.7.2. <i>Zkoušky na ztvrdlém betonu</i>	21
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	26
3.1. CÍL EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	26
3.2. RECEPTURY	26
3.3. VÝROBA	30
3.4. ZKOUŠKY NA ČERSTVÉM BETONU	33
3.4.1. <i>Sednutí kužele</i>	33
3.4.2. <i>Obsah vzduchu</i>	34
3.4.3. <i>Objemová hmotnost</i>	35
3.5. ZKOUŠKY NA ZTVRDLÉM BETONU	35
3.5.1. <i>Pevnost v tlaku</i>	35
3.5.2. <i>Pevnost v příčném tahu</i>	40
3.5.3. <i>Modul pružnosti</i>	42
3.5.4. <i>Hloubka průsaku tlakovou vodou</i>	45
3.5.5. <i>Smrštění</i>	50

4.	ZÁVĚR	56
4.1.	CÍLE PRÁCE	56
4.2.	ZÁVĚRY PLYNOUCÍ Z VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK	56
4.3.	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ Z HLEDISKA PERFORMANCE-BASED NÁVRHU	57
4.4.	PŘEDMĚT DALŠÍHO VÝZKUMU	57
5.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58
6.	SEZNAM PŘÍLOH	61
7.	PŘÍLOHY	62

1. ÚVOD

Postupem času se z betonu stal jeden z nejpoužívanějších stavebních materiálů jak v České republice, tak skoro po celém světě. Dnes se beton využívá snad ve všech stavebních odvětvích, setkáme se s ním v pozemních stavbách, při výstavbě rodinných domů nebo výškových budov, dále v dopravních stavbách, při stavbě silnic a dálnic a také ve vodohospodářských stavbách při výstavbě jezů a přehrad. Beton nevyužíváme pouze pro konstrukční účely, ale zároveň také pro estetické účely. Běžně se setkáváme s požadavky na pohledový či probarvovaný beton.

Tato široká oblast uplatnění betonu přispívá k velmi rychlému vývoji v oblasti technologie betonu. Při návrhu betonové směsi můžeme vybírat z velkého množství různých druhů cementů, zaměřených na určité vlastnosti, například na rychlý náběh počátečních pevností, odolnost vůči síranové korozi nebo odolnost vůči vysokým teplotám. Dále můžeme vybírat z velké diverzity kameniva, těžného nebo drceného o různé objemové hmotnosti. Největším vývojem prošly přísady a příměsi do betonu. Mezi příměsi řadíme vysokopecní strusku, popílek nebo mikrosiliku. Mezi přísady můžeme zařadit plastifikátory a superplastifikátory. Díky tomuto vývoji dokážeme vytvořit velmi složité betonové konstrukce a také dokážeme zajistit investorem požadovanou kvalitu a životnost betonu.

Preskriptivní neboli předpisová specifikace betonové směsi je historicky zakořeněna v návrhu betonu. Bohužel tento typ specifikace ztěžuje vývoj nových technologických postupů, kvůli limitování množství a typu přísad, příměsí, cementu a vody. Je často založen na historických zkušenostech a empirických vztazích, které mohou vést k vyšším nákladům, nebo k nechtěným výsledkům.

Dalším logickým krokem je tedy přechod z preskriptivní specifikace na performance-based specifikaci neboli specifikaci na základě výsledných vlastností. Specifikace na základě výsledných vlastností podporuje lepší komunikaci a partnerství mezi zhotovitelem a dodavatelem betonové směsi a vede k inovativním postupům, produktům a možnému snížení nákladů, tím pádem i k větší spokojenosti zákazníka.

Cílem bakalářské práce je porovnat tyto dva přístupy k návrhu betonové směsi, vytvořit sérii receptur, které budou ukazovat vliv vodního součinitele a množství cementu na výsledné vlastnosti betonu. Následně vytvořit z těchto receptur vzorky, které budou podrobeny daným zkouškám a vyhodnotit výsledky zkoušek.

2. TEORETICKÁ ČÁST

Tato část popisuje porovnání návrhu betonové směsi pomocí preskriptivní specifikace a specifikace, založené na výsledných vlastnostech (performance-based specification). Dále popisuje srovnání výhod a nevýhod těchto dvou metod a problematiku odpovědnosti za betonovou směs.

2.1. Preskriptivní specifikace

2.1.1. Co je to preskriptivní specifikace?

Preskriptivní specifikace definuje přesné metody výroby betonové směsi. Dále určuje nebo omezuje množství složek betonové směsi. Zaměřuje se převážně na vlastnosti vstupních složek, dávkování, míchání, dopravu a následné ošetřování. Tato metoda se opírá převážně o dlouhodobá zkoušení, zkušenosti a empirické vztahy a málokdy zohledňuje vztah mezi specifikovanými detaily a konečnými vlastnostmi betonu. Může se tedy stát, že výsledné vlastnosti neodpovídají původním požadavkům zákazníka. [1] [2] [3]

V České normě ČSN EN 206 se tento typ návrhu nazývá Specifikace betonu předepsaného složení. Beton předepsaného složení musí být vždy specifikován základními požadavky, a pokud jsou požadovány, doplňujícími požadavky. [6]

Základní požadavky: požadavek, aby beton vyhovoval této normě, druh a třídu cementu, mezní hranice obsahu cementu, vodní součinitel nebo konzistenci určenou stupněm, nebo určenou hodnotou, druh, kategorii kameniva a maximální obsah chloridů v kamenivu, maximální jmenovitou frakci kameniva a případná omezení pro zrnitost, druh a množství přísad, příměsí, nebo vláken, pokud se používají. [6]

Doplňující požadavky: původ některých nebo všech složek betonu jako náhradu za charakteristiky, které nejsou definované jiným způsobem, doplňující požadavky na kamenivo, požadavky na teplotu betonu čerstvého betonu, jiné technické požadavky. [6]

Z těchto požadavků je dobře vidět, jak svazující je preskriptivní návrh betonové směsi pro výrobce betonu a následující inovace v oblasti technologie betonu. Hlavním úkolem dodavatele betonu je především udržet požadovanou kvalitu surovin, dodržet správné množství, dávkování složek a dobu míchání.

2.1.2. Preskriptivní charakteristiky betonu

Obecně mezi preskriptivní charakteristiky můžeme zařadit všechny charakteristiky, které udávají, nebo omezují množství primárních a sekundárních surovin v betonu. Základní preskriptivní charakteristiky tedy jsou: minimální množství cementu, druh a třída cementu, maximální nebo přesně stanovené množství příměsí, přísad a jejich specifikace, specifikace frakce kameniva a jeho kvalitativních vlastností, maximální vodní součinitel. [1] [2] [3]

2.1.3. Výhody a nevýhody

Výhody preskriptivní specifikace: [1] [2] [3]

- odráží znalosti zadavatele při porozumění vztahu mezi žádanými vlastnostmi betonu a specifikací materiálů a metod
- zadavatel specifikace má možnost kontrolovat většinu aspektů procesu při výrobě betonu, od výběru materiálů, dávkování, míchání, přepravy, ukládání až po ošetřování betonové směsi
- dodavatel betonu potřebuje pouze určené materiály v požadovaném množství, při typických aplikacích není požadována odborná znalost směsi
- předpisová specifikace jasně definuje zodpovědnost dodavatele a zákazníka
- někteří projektanti nebo zákazníci mají větší důvěru v tradiční preskriptivní přístup

Nevýhody preskriptivní specifikace: [1] [2] [3]

- vztah mezi předpisovou specifikací a předpokládanými vlastnostmi nemusí být vždy stejný
- preskriptivní specifikace nedokáže pokrýt zájem všech zúčastněných stran, jako je: poskytovatel materiálu, výrobce betonu, zhotovitel, investor a uživatel
- pokud se drahými testy neprokáže chyba při ukládání a ošetřování betonu, zhotovitel nenese odpovědnost za špatné vlastnosti betonu
- dodavatel má omezenou kontrolu nad produktem a to z technické, ekonomické a kreativní stránky
- pokud dodavatel splní všechna předepsaná omezení a investor nebude spokojen, je velmi složité domáhat se reklamace

- preskriptivní specifikace znemožňuje dodavateli optimalizaci betonové směsi
- projektant nemusí mít důvěru, že preskriptivní specifikace povedou k žádoucím vlastnostem, poté je použit zbytečně konzervativní návrh

2.2. Performance-based specifikace

2.2.1. Co je to performance-based specifikace?

Performance-based specifikace, neboli specifikace na základě výsledných, nebo konečných vlastností betonu je podle National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA, USA) definována jako: „Soubor instrukcí, které obsahují funkční požadavky pro ztvrdlý beton, s ohledem na jeho aplikaci. Tyto instrukce by měly být jasné, dosažitelné, měřitelné a vykonatelné.“ [1] [2]

Skupina ACI's Innovative Task Group (ITG) definuje tuto specifikaci jako: „Specifikace na základě výsledných vlastností definuje požadovaný výsledek, kritéria k posouzení vlastností a ověření metod, bez požadavků na to, jak se těchto výsledků dosáhne.“ [1] [2]

Podle ČSN EN 206 se tento typ specifikace nazývá specifikace typového betonu. „Typový beton je takový beton, pro který jsou výrobci specifikovány požadované vlastnosti a doplňující charakteristiky betonu a výrobce zodpovídá za dodání betonu vyhovujícího požadovaným vlastnostem a doplňujícím charakteristikám.“ [6]

Jde tedy o typ návrhu, kdy projektant, nebo zákazník řekne dodavateli betonové směsi: „Zde jsou naše požadavky na konečné vlastnosti betonu a je nám jedno, jak toho dosáhnete.“ Zatímco při předpisovém návrhu řekne zákazník dodavateli: „Zde máte soupis předpisů a omezení, pro materiály a technologické postupy. Pokud tyto předpisy dodržíte, výsledek bude akceptovatelný.“ [1] [2] [3] [4] [5]

2.2.2. Proč se zabývat performance-based specifikací?

Performance-based specifikace se stává hlavním tématem převážně v USA, přitom oba dva typy návrhu betonu jsou zde skoro stejně dlouho, jako beton z portlandského cementu. Proč tedy už nestačí dlouhodobě používaná preskriptivní specifikace? Důvodů je hned několik. Jak už bylo zmíněno, požadavky na betonové konstrukce nebo beton sám se velmi rychle vyvíjí. Z tohoto důvodu se také velmi rychle vyvíjí nové

materiály a suroviny. Podle ACI Committee 329 jsou základní důvody k přechodu z preskriptivní specifikace na performance-based specifikaci tyto: Poznání, že pro spousty moderních aplikací betonu není pevnost v tlaku jediným nebo dokonce nejdůležitějším parametrem. Portlandský cement není jediný dostupný druh cementu. Obsah vody a velikost zrn kameniva nejsou jediné faktory ovlivňující sednutí kužele. Vodní součinitel není jediný faktor ovlivňující propustnost. Je evidentní, že ohodnocení trvanlivosti betonu je mnohem náročnější, než ohodnocení jeho pevnosti. Je složitější předvídat a zajistit dlouhotrvající životnost betonových konstrukcí, než předvídat krátkodobou únosnost. Obsah vzduchu v betonu je sice jednoduše měřitelný na stavbě u čerstvého betonu, ale odolnost proti zmrazovacím cyklům je více závislá na velikosti vzduchových pórů a jejich rozmístění v betonové pastě, než na celkovém obsahu vzduchu v betonu. Příměsi a chemické přísady ovlivňují obsah vzduchu, zpracovatelnost, dobu tuhnutí, krvácení betonu a počáteční nárůst pevnosti. Všechny tyto přísady a příměsi mohou, ale také nemusí být vzájemně kompatibilní. Je tedy velmi složité napsat preskriptivní specifikaci tak, aby maximalizovala všechny výhody návrhu a zároveň omezila nástrahy, spojené se špatnou kombinací materiálů. [1] [2] [3] [5]

2.2.3. Základní koncept, jak by měla vypadat performance-based specifikace

Základní koncept návrhu podle této metody by měl vypadat následovně: měl by zde být certifikační systém, který stanoví požadavky na kontrolu kvality a zároveň požadavky pro dodavatele betonové směsi. Specifikace by měla mít předpis, který jasně definuje funkční požadavky pro ztvrdlý beton. Projektant a dodavatel betonu by měli spolupracovat kvůli zajištění vyvinutí správné směsi, zajištění dopravy a instalace. Předpis by neměl obsahovat podrobný list surovin, ale spíše certifikaci, že směs dosáhne specifikovaných požadavků, včetně výsledků z průkazných zkoušek. Poté co je beton uložen, by měla být provedena série testů, které zaručí požadované vlastnosti. Upřesnit jasný souhrn instrukcí, vymezujících co se stane, pokud beton nesplní požadovaná kritéria. [1] [2]

Úspěšné použití performance-based specifikace je spojeno s následujícími faktory: Stávající norma by měla umožňovat metodu specifikace na základě výsledných vlastností. Schopnost projektanta specifikovat kvalitativní požadavky musí odpovídat zamýšlenému použití betonu. Schopnost projektanta popsat kvalitativní požadavky

jasně a jednoznačně tak, aby požadavky na vlastnosti mohly být hodnoceny. Možnost relevantních testovacích metod, které mohou hodnotit požadované kvalitativní charakteristiky. Schopnost projektanta porozumět rizikům, které jsou spojeny s provozem stavby. Schopnost dodavatele betonové směsi rozpoznat problém mezi požadavky a zvolit vhodný alternativní postup pro minimalizování škoda. Schopnost dodavatele vytvořit takovou betonovou směs, která povede k takovým výsledkům, aby vyhovovaly požadavkům. Performance-based specifikace je více ekonomicky pružnější a vede ke spokojenosti všech zainteresovaných stran. [1] [2]

Tyto faktory jsou nadále spojeny s následujícími výzvami: Mohlo se stát, že u doposud používané předpisové specifikace nemusí být konečné kvalitativní požadavky dostatečně jasně vyjádřeny. Naopak specifikace na základě konečných vlastností, by měla zahrnovat explicitní popis zákazníkova očekávání. Ve většině případů vývoj kvalitativních požadavků vyžaduje větší odbornost, než napsání preskriptivních specifikací, která je historicky zakořeněná. Dokonce projektant potřebuje určitou praxi, nebo příslušné školení, aby vytvořil efektivní požadavky pro beton. Při neefektivní specifikaci může návrh vést k nedosažení požadovaného výsledku. Některé běžně očekávané vlastnosti betonu není jednoduché specifikovat a kvantifikovat, jako například akceptovatelné množství trhlin vzniklých smršťováním betonu. Je zde také nedostatek obecně přijatelných metod pro testování trvanlivosti betonu. Přejímací kritéria musí uvážit variabilitu čerstvého betonu přivezeného na stavbu a také vlastní variabilitu zkušebních metod. Tato vybraná kritéria dále musí vyrovnat rizika mezi zákazníkem a dodavatelem, spojená s lidským faktorem. Někteří projektanti budou potřebovat další trénink, aby dokázali správně specifikovat konečné požadavky a naopak někteří výrobci betonu, budou potřebovat další vývoj v tom, jak těchto požadavků dosáhnout. [1] [2] [3]

2.2.4. Základní performance-based charakteristiky

Do této kapitoly můžeme zařadit všechny charakteristiky, které vyjadřují výsledný stav buď čerstvého, nebo ztvrdlého betonu. Základní charakteristiky pro čerstvý beton: zpracovatelnost, sednutí kužele, čerpatelnost, segregace, neboli oddělení některých složek (např. hrubého kameniva) od zbytku betonu, krvácení, obsah vzduchu, teplota a jednotnost směsi. Charakteristiky pro ztvrdlý beton: pevnost v tlaku, pevnost v tahu, pevnost v tahu za ohybu, smršťování, dotvarování, pórovitost, rozmístění pórů ve směsi,

propustnost, odolnost proti mrazu, odolnost proti obrusu, odolnost proti síranům, odolnost proti kyselinám, omezení objemových změn, teplotní vodivost, objemová hmotnost, absorpce radiace, barva a cena. [1] [2] [8]

2.2.5. Výhody a nevýhody

Výhody performace-based specifikace: [1] [2] [3]

- projektant se může soustředit na vlastnosti, které jsou vyžadovány, namísto jejich dosažení (ne všichni projektanti jsou seznámeni s tím, jak dosáhnout nejlepších výsledků)
- možnost soustředit se na vlastnosti betonu, na kterých skutečně záleží
- dodavatel betonu má technický a ekonomický vliv na výsledný produkt
- možnost využít různé materiály, nebo kombinaci materiálů z místních zdrojů
- možnost využít novou technologii, znalost, nebo odbornost
- flexibilita v dávkování dává možnost vytvořit celkově lepší, nebo cenově výhodnější betonovou směs, která splní všechny požadované vlastnosti
- vytvoření trvanlivějšího produktu vede ke snížení nákladů na životní cyklus stavby
- předpokládaný vztah mezi výslednými vlastnostmi a charakteristikami směsi mohou být nahrazeny testováním vlastností betonu

Nevýhody performace-based specifikace: [1] [2] [3]

- odpovědnost za dosažení požadovaných vlastností se více přiklání na stranu výrobce betonové směsi
- projektant si nemusí být jistý, jaké performanced-based vlastnosti použít, nebo jak je správně měřit
- problém s vytvořením spolehlivých testů, které budou schopny kvantifikovat požadované vlastnosti, tyto testy mohou být dražší než běžně používané testy
- konečné vlastnosti jsou ovlivňovány výběrem materiálů, dávkováním, kontinuální dodávkou, ukládáním, ošetřováním, každá zúčastněná strana má unikátní vliv na konečný výsledek, může být těžké odlišit vliv a odpovědnost zúčastněných stran za konečný výsledek

2.3. Přejímací podmínky

Specifikace na základě výsledných vlastností, by měla popsat a jednoznačně určit, zda výsledek odpovídá specifikovaným kvalitativním charakteristikám, při předávání betonu z jedné rukou do dalších. Například předání betonu zhotoviteli od výrobce betonu. Obecně můžeme použít pojem přejímací podmínky. Přejímací podmínky by měly zahrnovat: kvalitativní charakteristiky, které budou použity jako základ pro přijetí betonové směsi, plán odběru vzorků, který bude použit pro získání reprezentativních vzorků v požadované míře, standardizovaný postup pro přípravu vzorků, standardizovaný postup pro měření relevantních vlastností, kritéria, které budou hodnotit, zda směs dosáhla požadovaných vlastností, kroky které budou použity, pokud beton nedosáhne požadované úrovně. [1] [2] [8]

Všechny aspekty přejímacích podmínek, by měly být stanoveny ve smlouvě tak, aby si každá strana byla vědoma svého rizika. V některých případech mohou být tyto podmínky stanoveny jako tolerance odchylky od požadované vlastnosti a v jiných případech jako definování maximální či minimální hodnoty. Například minimální pevnost v tlaku, nebo maximální obsah vzduchu v betonové směsi. Přejímací podmínky by také měly zvážit možnou diverzitu vlastností betonu při odběru vzorků přímo po namíchání a betonu uloženého na stavbě. Vzhledem k této diverzitě, kdy beton projde na stavbě rukama více zainteresovaných stran, je také důležité uvážit možnost pro zavedení přísnějších podmínek pro testování v laboratoři a benevolentnějších pro testování na místě. [1] [2]

Z toho vyplývá, že přejímací podmínky jsou klíčové pro úspěšné použití performance-based specifikace. Poté, co projektant vybere požadované kvalitativní charakteristiky, musí také stanovit podmínky, na základě kterých se posoudí, zda provedená práce vyhovuje zadaným požadavkům. Toto posouzení je založeno na výsledcích testů, pro které byly použity vzorky, odebrané podle plánu odběru vzorků. [2]

Při vytváření přejímacích podmínek je důležité přihlídnout k těmto faktorům: 1) rizika zhotovitele a zákazníka, musí být správně definována, 2) množství testování by mělo být vyváženo tak, aby nevznikla zbytečná rizika a zároveň musí být ekonomicky přijatelné, 3) je důležité zamezit narušení procesu výstavby. [2]

2.4. Odpovědnost zúčastněných stran

2.4.1. Rizika a odpovědnost

Od výběru materiálů přes výrobu, ukládání a konečné ztvrdnutí v konstrukci, projde beton rukama mnoha zúčastněných stran. Je tedy důležité zabývat se odpovědností a riziky těchto subjektů. Při použití preskriptivní specifikace a výskytu neakceptovatelných výsledků ztvrdlého betonu je odpovědnost za tyto problémy často přisuzována výrobcí betonu nebo zhotoviteli. Z části proto, že odpovědnost za výsledek není často jasně specifikovaná. Při přechodu na performance-based specifikaci by měla být odpovědnost zúčastněných stran jasně definovaná. [2] [9]

Pokud má výrobce betonu přijmout plnou odpovědnost za konečné vlastnosti betonu, je rozumné poskytnout mu svobodu v návrhu betonové směsi tak, aby bylo zajištěno splnění všech požadavků. Při použití performance-based specifikace má projektant jasnou zodpovědnost za to, aby správně definoval konečné vlastnosti betonu. Například definovaná kritéria zahrnují požadavky na pevnost v tlaku, omezení smršťování, odolnost proti zmrazovacím cyklům, ale nezahrnují odolnost proti alkalicko-křemičité reakci. Kdo je zodpovědný za to, když se postupem času v betonové konstrukci objeví alkalicko-křemičitá reakce? [2] [9]

Je velmi složité určit, kde začíná a končí odpovědnost zúčastněných stran. Například při betonování stropu si zhotovitel objedná betonpumpu a specifikuje požadavky na čerstvý beton. Pumpař na stavbě zjistí, že betonovou směs není schopný přečerpát. Měl by výrobce betonu změnit recepturu, nebo by měla firma poskytující betonpumpu použít více vyhovující zařízení? Pokud statik navrhne velmi hustou výztuž a zároveň navrhne špatnou velikost kameniva, kdo je zodpovědný za špatně probetonovaný prvek? [2] [9]

Výrobce betonu by měl být zodpovědný za betonovou směs od výroby až po doručení betonu na stavbu a zároveň za jeho složení. Zároveň by měl nést odpovědnost za výsledné vlastnosti betonu, jako jsou pevnost v tlaku, odolnost proti agresivnímu prostředí a další. Zhotovitel betonové konstrukce by měl nést odpovědnost za beton během jeho ukládání a ošetřování až do úplného vytvrzení. Pokud zhotovitel nedodrží podmínky a například přidá na stavbě do betonu vodu, aby docílil lepší zpracovatelnosti, tím pádem beton nedodrží požadovanou pevnostní třídu. Nebo pokud nechá při ukládání beton padat z moc vysoké výšky a dojde k oddělení velkého

kameniva od zbylých složek. Odpovědnost za špatný výsledek by měl nést zhotovitel betonové konstrukce. Může se ale stát, že se pokusí přehodit tuto odpovědnost na výrobce betonu a žádat po něm sanaci. [2] [8] [9]

Pro omezení výskytu těchto problémů je důležité, aby každá zúčastněná strana byla dobře obeznána s odpovědností, kterou na sebe beru při procesu výroby. Zároveň také aby probíhala dostatečná kontrola zhotovitele betonové konstrukce, například přítomností technologa nebo osoby seznámené se správným technologickým postupem, ale také dostatečná kontrola výrobce betonu. Například aby odebrání vzorků probíhalo podle plánu odběru vzorků. Nejdůležitějším faktorem je ale dostatečná komunikace mezi zúčastněnými stranami. Správná komunikace je také jednou z neúspěšnějších prevencí před výskytem chyb a dosažením neuspokojivého výsledku. [2] [8] [9]

2.4.2. Příklad provádění průmyslové podlahy

Následující příklad (tab. 2.01) se zaměřuje na konstrukci průmyslové podlahy. Ukazuje jak performance-based specifikace může mít pro každou zainteresovanou stranu jiný význam a úhel pohledu. Tento příklad se zabývá pouze rovinností podlahy a ignoruje ostatní důležité charakteristiky jako je například pevnost, smršťování, nebo odolnost proti obrusu. Tato tabulka je převzata z publikace Preparation of a Performance-based Specification for Cast-In-Place Concrete. [1]

Příklad výsledného požadavku	Strana definující požadavek	Strana zavázaná k dosažení požadavku	Je tento požadavek měřitelný?
Rovinnost	Zákazník, projektant	Hlavní zhotovitel	Rovinnost může být změřena kdykoliv
Dokončení v řádné toleranci	Hlavní zhotovitel	Zhotovitel průmyslové podlahy	Povrch musí být zkontrolován před zhotovením smršťovacích spár
Průběžná dodávka betonu	Zhotovitel průmyslové podlahy	Výrobce betonu	Pozorovatelné na místě
Konzistentní zpracovatelnost	Zhotovitel průmyslové podlahy	Výrobce betonu	Snadno měřitelné, např. sednutí kužele

Konzistentní tuhnutí betonu	Zhotovitel průmyslové podlahy	Výrobce betonu	Testy nejsou dosud normalizovány
Cement se stálými vlastnostmi	Výrobce betonu	Výrobce cementu	Je deklarován výrobcem cementu, ale málokdy ověřován
Příměsi se stálými vlastnostmi	Výrobce betonu	Dodavatel příměsí	Může být změřeno, ale málokdy se tak skutečně děje
Přísady se stálými vlastnostmi	Výrobce betonu	Dodavatel přísad	Může být změřeno, ale málokdy se tak skutečně děje
Beton s kontrolovatelným smrštěním	Hlavní zhotovitel	Výrobce betonu	Testy in-situ nejsou dosud normalizovány
Příspěvek přísad a příměsí na smršťování betonu	Výrobce betonu	Dodavatel přísad, dodavatel příměsí	Testy in-situ nejsou dosud normalizovány
Příspěvek od ošetřování, doby ošetřování a mikroklimatu na smrštění	Hlavní zhotovitel	Zhotovitel průmyslové podlahy	Testy in-situ nejsou dosud normalizovány
Vliv na přípravu podloží a správné umístění výztuže	Zákazník, projektant	Zhotovitel průmyslové podlahy	Kontrola umístění výztuže před betonáží
Určení požadované únosnosti, tloušťky podlahy, rozmístění spár a vyztužení	Zákazník	Projektant	Konečný výsledek je sice měřitelný, ale je složité určit viníka za nevyhovující výsledek

Tab. 2.01- Příklad odpovědností při provádění průmyslové podlahy

Jak je vidět z tohoto příkladu, výsledné požadavky specifikované zákazníkem jsou důsledkem správného návrhu, výběru materiálů a dodržení technologických postupů. [1]

2.5. Současný stav

V současné době v České republice převládá specifikace betonu na základě konečných vlastností. Projektant standardně klasifikuje beton pomocí minimální pevnosti betonu v tlaku, stupně vlivu prostředí, maximální velikosti kameniva, obsahu chloridů a konzistence. Další obvyklé charakteristiky jsou modul pružnosti, maximální průsak tlakovou vodou, obsah vzduchu a doba dosažení minimální pevnosti v tlaku (28 dní, 56 dní, 90 dní). [6] [7]

Všechny tyto charakteristiky jsou performance-based charakteristiky, kromě maximální velikosti kameniva, tady se jedná o preskriptivní charakteristiku. Je tedy vidět, že v tomto ohledu se vzdalujeme od čistě preskriptivní specifikace betonové směsi a přikláníme se k performance-based charakteristice. [6] [7]

Výrobce betonu tedy dostane od projektanta tyto požadavky a je povinen zajistit jejich dosažení. Zároveň je však limitován charakteristikami uvedenými v normě ČSN EN 206 a ČSN P 73 2404. Jedná se především o charakteristiky, které by měly zaručit požadovanou životnost betonu a to na 50 nebo 100 let (podle návrhu). Při návrhu betonové směsi pro stanovený stupeň vlivu prostředí nám norma nařizuje splnit: maximální vodní součinitel, minimální pevnost betonu v tlaku, minimální množství cementu a v některých případech maximální průsak tlakovou vodou a minimální obsah vzduchu (jedná se hlavně o beton vystavený působení zmrazovacích cyklů). [6] [7]

Pevnost betonu v tlaku, maximální průsak tlakovou vodou a minimální množství vzduchu jsou konečné vlastnosti ztvrdlého betonu a nijak nelimitují výrobce betonu v návrhu směsi. Zatímco vodní součinitel a minimální množství cementu jsou čistě předpisové charakteristiky, které mohou velmi ovlivnit návrh jak z ekonomického hlediska, tak z hlediska dosažení ideálních požadavků stanovených zákazníkem. [6] [7]

Následující tabulka (tab. 2.02) názorně a zjednodušeně ukazuje limitující charakteristiky při vytváření betonové směsi. [6] [7]

Mezní hodnoty pro složení betonu s předpokládanou životností 50 let								
	Bez nebezpečí koroze nebo narušení	Koroze způsobená karbonatací				Koroze způsobená chloridy (jiné chloridy než z moře)		
Stupeň vlivu prostředí	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3
Maximální vodní součinitel	/	0,65	0,60	0,55	0,50	0,55	0,55	0,45
Minimální pevnostní třída	C12/15	C16/20	C16/20	C20/25	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37
Minimální obsah cementu [kg/m ³]	/	260	280	280	300	300	300	320
Minimální obsah vzduchu v ČB [%]	/	/	/	/	/	/	/	/
Maximální průsak tlakovou vodou [mm]	/	/	/	/	50	/	50	35
		Působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí		
Stupeň vlivu prostředí	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	
Maximální vodní součinitel	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	
Minimální pevnostní třída	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37	
Minimální obsah cementu [kg/m ³]	300	300	320	340	300	320	360	
Minimální obsah vzduchu v ČB [%]	/	4,0	4,0	4,0	/	/	/	
Maximální průsak tlakovou vodou [mm]	50	50	35	35	50	35	20	
Mezní hodnoty pro složení betonu s předpokládanou životností 100 let								
	Bez nebezpečí koroze nebo narušení	Koroze způsobená karbonatací				Koroze způsobená chloridy (jiné chloridy než z moře)		
Stupeň vlivu prostředí	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3
Maximální vodní součinitel	/	0,65	0,60	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45
Minimální pevnostní třída	C12/15	C20/25	C20/25	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37
Minimální obsah cementu [kg/m ³]	/	260	280	280	300	300	300	320
Minimální obsah vzduchu v ČB [%]	/	/	/	/	/	/	/	/
Maximální průsak tlakovou vodou [mm]	/	/	/	50	50	50	50	20
		Působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí		
Stupeň vlivu prostředí	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	
Maximální vodní součinitel	0,55	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	
Minimální pevnostní třída	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37	
Minimální obsah cementu [kg/m ³]	300	300	320	340	300	320	360	
Minimální obsah vzduchu v ČB [%]	/	3,5	4,0	4,5	/	/	/	
Maximální průsak tlakovou vodou [mm]	50	35	20	20	50	35	20	

Tab. 2.02- Zdroj: ČSN 73 P 2404 (tato tabulka je pouze orientační)

2.6. Problém preskriptivních charakteristik

2.6.1. Vodní součinitel

Jak již bylo zmíněno, vodní součinitel je jednou z nejzásadnějších preskriptivních charakteristik (zn. w/c). Udává poměr mezi hmotností vody a hmotností cementu. Pro zohlednění příměsí v betonové směsi je zavedena takzvaná k-hodnota: hmotnost vody/(hmotnost cementu + k*příměs). [8] [10]

Dlouhodobým zkoušením bylo zjištěno, že vodní součinitel má veliký význam na pevnost betonu. Vyšší vodní součinitel pevnost snižuje a naopak nižší vodní součinitel pevnost zvyšuje. Jednoznačně bylo prokázáno, že největší vliv na pevnost betonu má pórovitost cementového kamene. Tedy pokud zvýšíme vodní součinitel, navýšíme množství vody v betonové směsi a tím zvýšíme i výslednou pórovitost betonu. Vodní součinitel má vliv také na barvu betonu (čím větší vodní součinitel, tím světlejší beton). Dále na vodotěsnost, zpracovatelnost a hlavně trvanlivost. Jak již bylo zmíněno, maximální vodní součinitel je v České republice omezován hlavně z důvodů dosažení požadované trvanlivosti (50 let, 100 let). [9] [10]

Beton v čerstvém stavu je tedy velmi citlivý na jakékoliv přidání vody. Po přijetí autodomíchávače na stavbu se dělníci občas dožadují nařazení betonu, kvůli zlepšení zpracovatelnosti. Každá takováto úprava může velmi ovlivnit výsledné vlastnosti betonové směsi. Při redukci vodního součinitele se velmi zhorší zpracovatelnost betonu, tuto vlastnost můžeme do určité míry vyrovnat použitím přísad (plastifikátorů a superplastifikátorů). Tyto přísady sice zlepšují zpracovatelnost, ale po přidání většího množství získá beton „medovou“ konzistenci a může dojít až k segregaci (oddělení hrubého kameniva od zbytku složek a jeho následného sedání) [9] [10]

Další problém této preskriptivní charakteristiky je určitá nejasnost v dávkování. Při stejném vodním součiniteli bude betonová směs s větším množstvím cementu obsahovat větší množství vody, než směs s nižším množstvím cementu. Dá se tedy říci, že tyto dvě směsi mohou mít při stejném vodním součiniteli odlišné výsledné vlastnosti. Tato problematika je blíže popsána a řešena v praktické části. [9] [10]

Nastává tedy otázka, zda je lepší předpisově omezit maximální hodnotu vodního součinitele. Nebo ponechat výrobcí betonu možnosti, k vytvoření takové směsi, která uspokojí všechny zainteresované strany bez omezení. Zatím neexistují zkoušky, které by zjistily hodnotu vodního součinitele po zatvrdnutí betonové směsi. Což může vyvolat

další otázky a nejasnosti při rozdělení odpovědnosti za betonovou směs, která nesplní požadované vlastnosti.

2.7. Zkoušení

V kapitole zkoušení jsou popsány obecné principy a průběh zkoušek na čerstvém a ztvrdlém betonu. Tyto zkoušky jsou následně provedeny v experimentální části. Také zde budou uvedeny vztahy pro vyhodnocení zkoušek a výpočet daných charakteristik.

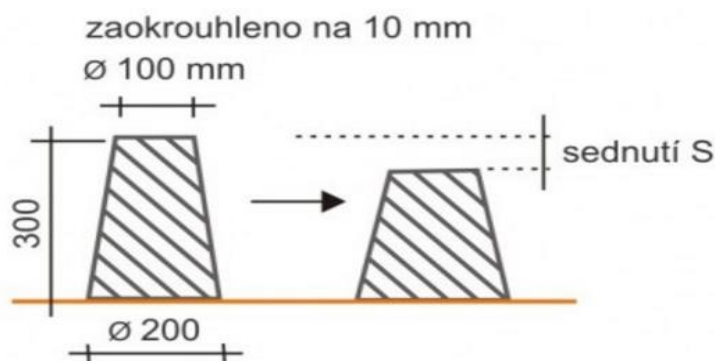
2.7.1. Zkoušky na čerstvém betonu

Zkouška sednutím

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 12350-2. Princip zkoušky: čerstvý beton se zhutní ve formě tvaru komolého kužele. Po zvednutí komolého kužele udává konzistenci betonu výška, o kterou poklesl beton. [11]

Forma i podkladní deska se navlhčí a forma se poté položí na podkladní desku, Během plnění musí být forma přichycena k podkladní desce (nejčastěji přišlápnutím). Forma se plní ve třech vrstvách, každá přibližně do jedné třetiny výšky. Každá vrstva se zhutní 25 vpichy kovovou tyčí. Pokud po zhutnění poslední vrstvy vznikl nedostatek betonu, je nutné doplnit beton, aby vznikl nad horním okrajem formy přebytek. Tento přebytek se poté odstraní příčným pohybem propichovací tyčí. Forma se opatrně odstraní svislým pohybem vzhůru. Neprodleně po zvednutí formy se měří sednutí, a to zjištěním rozdílu mezi výškou formy a nejvyšším bodem betonu. [11]

Výsledek zkoušky je platný pouze tehdy, jestliže dojde ke skutečnému sednutí (beton zůstane neporušen). Pokud se beton zbortí, musí se zkouška opakovat s novým vzorkem. [11]



Obr. 2.01- Zkouška sednutí kužele [21]

Objemová hmotnost

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 12350-6. Princip zkoušky: čerstvý beton je zhutněn v tuhé nádobě známého objemu a následně je zvážen. [12]

Nádoba se plní ve dvou nebo více vrstvách, aby se dosáhlo úplného zhutnění. Zhutňování probíhá na vibračním stole, a to po co nejkratší dobu, která je potřebná k úplnému zhutnění betonu. Nádoba se ke zhutňovacímu stolu pevně přitlačuje. Naplněná nádoba se poté zváží. [12]

Objemová hmotnost se vypočte z následujícího vztahu (2.01):

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (2.01)$$

Kde D je objemová hmotnost čerstvého betonu, v kg/m^3

m_1 je hmotnost prázdné nádoby, v kg

m_2 je hmotnost naplněné nádoby se zhutněným betonem, v kg

V je objem nádoby, v m^3

Objemová hmotnost se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m^3 . [12]

Obsah vzduchu

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 12350-7. Princip zkoušky: Tlakoměrná metoda, Známy objem vzduchu o známém tlaku je propojen v uzavřené nádobě s neznámým objemem vzduchu ve vzorku betonu. Kruhová stupnice tlakoměru je nastavena v procentním podílu vzduchu ve vzorku betonu. [13]

Nádoba se naplní betonem buď v jedné vrstvě, nebo ve více vrstvách, podle konzistence betonu. Obvykle pro beton s konzistencí sednutí alespoň S3 postačí jedna vrstva. Proveďte se zhutnění na vibračním stole, vibruje se po dobu nezbytně nutnou pro úplně zhutnění betonu. [13]

Zhutněný beton v nádobě se zarovná propichovací tyčí a povrch se uhladí ocelovým hladítkem. Příruba nádoby a víka se důkladně očistí. Víko se neprodyšně připevní k nádobě svorkami. Hlavní ventil pro přívod vzduchu se uzavře a otevřou se ventily A a B. Jedním ventilem (A či B) vstříkujeme vodu tak dlouho, dokud nevytéká z druhého ventilu. Následně do vzduchové komory napumpujeme vzduch, dokud ručička tlakoměru neukazuje počáteční hodnotu tlaku. Ventily A a B se uzavřou a otevře se hlavní ventil vzduchu. Poklepeme na boční stěny nádoby a tlakoměr a odečte se hodnota tlaku na tlakoměru, která odpovídá objemu obsaženého vzduchu A_1 .

Obsah vzduchu v betonu v nádobě, A_c , se vypočítá ze vztahu (2.02):

$$A_c = A_1 - G \quad (2.02)$$

Kde A_1 je obsah vzduchu ve zkoušeném vzorku betonu

G je opravný součinitel pro kamenivo, $G=0$, pokud není uveden

Obsah vzduchu se vyjádří v procentech, zaokrouhlených na 0,1%. [13]



Obr. 2.02- Zkouška obsahu vzduchu



Obr. 2.03- Zkouška obsahu vzduchu

2.7.2. Zkoušky na ztvrdlém betonu

Pevnost v tlaku

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 12390-3. Princip zkoušky: Zkušební tělesa jsou zatěžována až do porušení ve zkušebním lisu. Z maximálního zatížení při porušení tělesa se vypočte pevnost betonu v tlaku. [14]

Před každou zkouškou dojde k změření všech stran tělesa a zvažení. Těleso se umístí na střed spodní tlačené desky. Zkušebními tělesy mohou být krychle, válce nebo vývrty. Krychle se osadí kolmo na směr hutnění vzorku. Pevnost v tlaku se určí ze vztahu (2.03). [14]

V našem případě byla pevnost v tlaku zkoušena na krychlích o hraně 150 mm a válcích o výšce 300 mm a průměru podstavy 150 mm.

Pevnost v tlaku je dána vztahem:

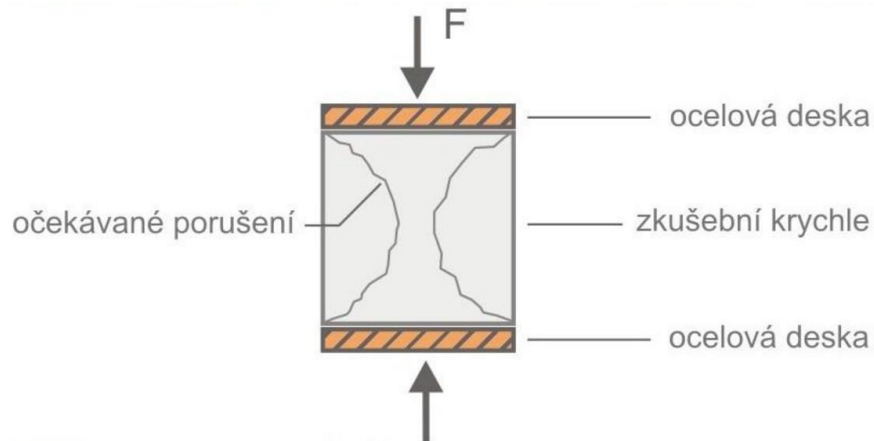
$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2.03)$$

Kde f_c je pevnost v tlaku, v MPa (N/mm²)

F je maximální zatížení při porušení, v N

A_c je průřezová plocha zkušebního tělesa, v mm²

Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na 0,1 MPa. [14]



Obr. 2.04- Zkouška pevnosti v tlaku [22]

Pevnost v příčném tahu

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 12390-6. Princip zkoušky: Zkušební těleso je vystaveno tlaku v úzkém pruhu. Výsledná kolmá tahová síla způsobí porušení tělesa tahem. [15]

Před osazením do lisu se zkušební tělesa zváží a změří. Zkušební těleso se umístí do středu zkušebního lisu. Nahoře i dole se na těleso osadí roznášecí proužky.

V našem případě byla pevnost v příčném tahu měřena na krychlích o hraně 150 mm. Pevnost v příčném tahu se vypočte podle vztahu 2.04. [15]

Pevnost v příčném tahu je dána následujícím vztahem (2.04)

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{L \times d \times \pi} \quad (2.04)$$

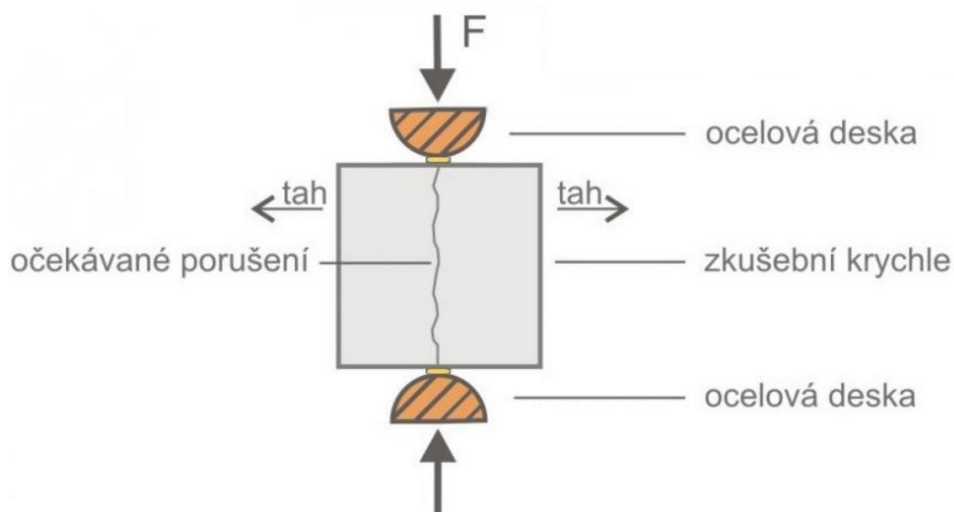
Kde f_{ct} je pevnost v příčném tahu, v MPa (N/mm²)

F je maximální zatížení, v N

L je délka dotykové přímky tělesa, v mm

d je zjištěný příčný rozměr tělesa, v mm

Pevnost v příčném tahu se zaokrouhlí na 0,01 MPa. [15]



Obr. 2.05- Zkouška pevnosti v příčném tahu [23]

Hloubka průsaku tlakovou vodou

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 12390-8. Princip zkoušky: na ztvrdlé těleso se nechá působit tlaková voda. Zkušební těleso se následně rozlomí a změří se hloubka průsaku. [16]

Plocha zkušebního tělesa, která bude vystavena tlaku vody, se po odbednění zdrsní ocelovým kartáčem. Zkušební těleso se upne do zařízení a nechá se na něj působit tlak o hodnotě 0,5 MPa po dobu 3 dnů. Po skončení této doby se těleso vyjme a rozlomí v polovině kolmo k povrchu, na který působil vodní tlak. Následně se označí hranice průsaku a změří se největší hloubka. [16]

Zkušební tělesa mohou být krychle, válec, nebo hranol. V našem případě byla zkušební tělesa krychle o hraně 150 mm. [16]



Obr. 2.06- Narušení vzorků před osazením na zkoušku: Hloubka průsaku tlakovou vodou

Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

Zkouška se provádí podle normy ČSN ISO 1920-10. Princip zkoušky: Zkouška vychází z Hookeova zákona. Zkušební těleso je vystaveno základnímu napětí 0,5 MPa a poté se napětí plynule zvyšuje až na hodnotu jedné třetiny pevnosti v tlaku válce. Zaznamenávají se poměrná přetvoření při odpovídajících napětích. [17]

Nejprve se stanoví pevnost tlaku na válci o průměru podstavy 150 mm a výšce 300 mm. Tato pevnost se použije pro stanovení modulu pružnosti a to tak, že zatěžujeme vzorky do jedné třetiny této pevnosti. Válce zkoušené na pevnost v tlaku musí být vyrobeny ze stejného betonu a ošetřovány stejným způsobem jako zkušební tělesa.

Zkušební těleso se vloží do lisu a vyvodí se základní napětí 0,5 MPa, které se udržuje po dobu 60 s, poté odečtou se údaje. Napětí se plynule zvyšuje až na hodnotu jedné třetiny pevnosti v tlaku, napětí se udržuje po dobu 60 sekund, v průběhu následujících 30 sekund se odečtou výsledky. Pokud je měření dostatečně přesné, sníží se zatížení na základní napětí, stejnou rychlostí jako při zatěžování. Tento cyklus se opakuje nejméně dvakrát se stejnou rychlostí zatěžování a odlehčování a s udržováním napětí na daných hodnotách po dobu 30 sekund. Po dokončení všech měření se zatížení zkušební tělesa zvyšuje stejnou rychlostí až do porušení. [17]

Statický modul pružnosti v tlaku E_c v MPa je dán vztahem 2.05.

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (2.05)$$

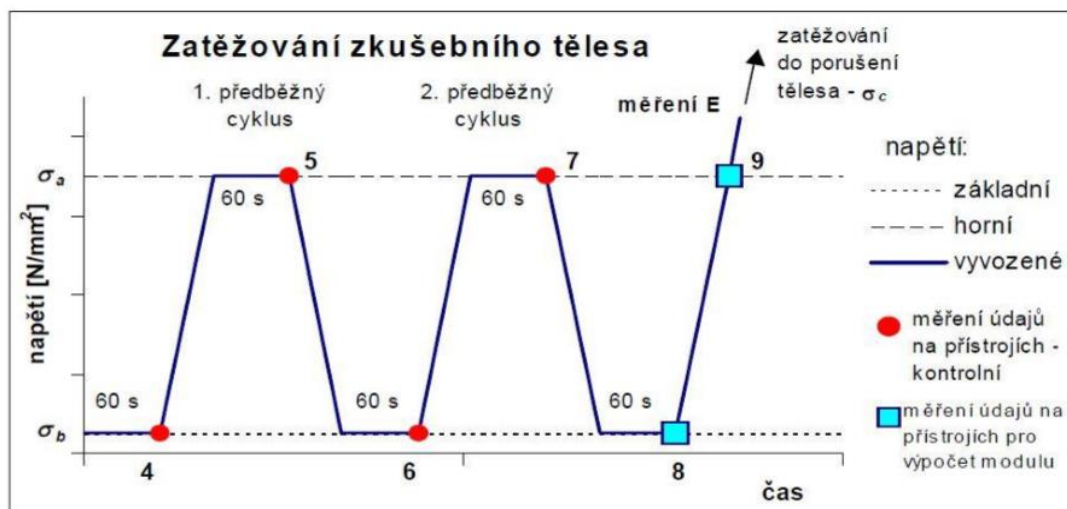
Kde σ_a je horní zatěžovací napětí, v MPa (N/mm^2)

σ_b je základní napětí, tedy 0,5 MPa

ε_a je průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí

ε_b je průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí

Statický modul pružnosti se vyjádří v GPa na tři platné číslice. [17]



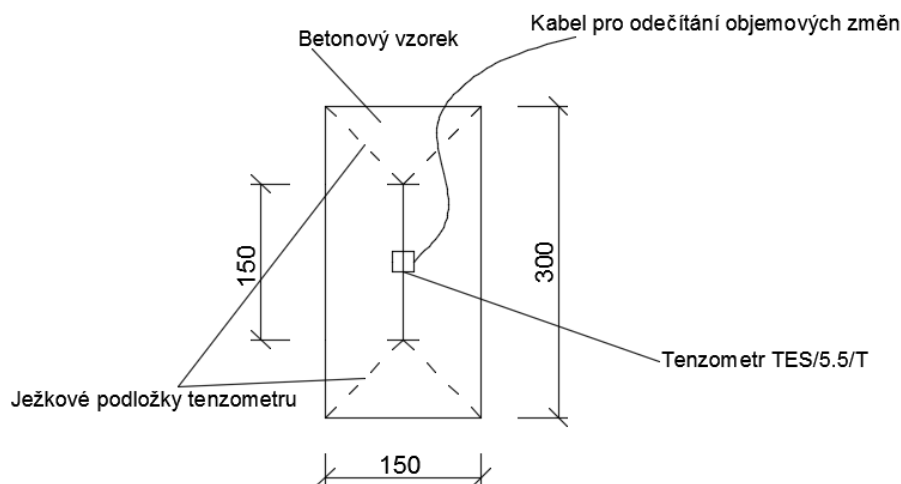
Obr. 2.07- Postup zatěžování tělesa při zkoušce statického modulu pružnosti [24]

Stanovení objemových změn betonu

Zkouška se provádí podle TP 266, článek 2. 5. 4. Pro zkoušení lze také použít postup popsany v ČSN 73 1320. Tento postup však stanovuje objemové změny až po vyjmutí z formy (odbednění). Aby bylo možné měřit objemové změny i před odbedněním, je nutné použít zabetonované tenzometry. [18] [19]

Do formy se umístí tenzometr pro snímání deformace. Odměrná délka musí být minimálně 2/3 nejmenšího rozměru zkušebního tělesa. Základní čtení se sejme před betonáží vzorku. Po vyplnění formy betonem a jeho zhutnění se odečítají naměřené deformace ve stanovených intervalech. Ošetřování betonu by mělo odpovídat ošetřování plánované betonové konstrukce, kde bude zkoušený beton použit. [18] [19]

V našem případě bylo smrštění měřeno na válcích o průměru podstavy 150 mm a výšce 300 mm. Byly použity tenzometry typu TES/5.5/T a jednokanálová měřicí jednotka GT1174-3. Vzorky byly po odbednění uloženy do klimatizované místnosti s teplotou 18 – 22 °C a relativní vlhkostí 60 – 70 %.



Obr. 2.08- Schéma strunového tenzometru TES/5.5/T

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část popisuje výběr běžně používané receptury. Vytvoření odvozených receptur na základě vybrané receptury. Namíchání vzorků, provedení zkoušek a následné vyhodnocení výsledků.

3.1. Cíl experimentální části

Cílem experimentální části bylo vytvořit čtyři receptury, které budou odvozeny od jedné často používané receptury a následně vyhodnotit výsledky z provedených zkoušek. Tyto receptury se odlišují jak množstvím cementu, tak vodním součinitelem. Následující tabulka (3.01) popisuje vybraná množství cementu a hodnoty vodního součinitele.

Vodní součinitel	Množství cementu v 1m ³ [kg]		
	400	350	300
0,45		+	
0,50	+	+	+
0,55		+	

Tab. 3.01- Znárodnění vytvořených receptur

Znaménko + značí vytvořenou recepturu při daném vodním součiniteli a daném množství cementu. Na těchto recepturách bylo následně na čerstvém betonu zkoušeno: sednutí kužele, objemová hmotnost a obsah vzduchu. Na ztvrdlém betonu byla zkoušena: pevnost v tlaku (na válcích po 28 dnech a na krychlích po 2 dnech, 7 dnech a 28 dnech), pevnost v příčném tahu, modul pružnosti, maximální průsak tlakovou vodou a smrštění, pomocí zabetonovaných tenzometrů.

3.2. Receptury

Jak již bylo zmíněno, receptury vychází z běžně používaného betonu C30/37- XC2- Cl 0,2- Dmax 22 mm- S4. Tato receptura byla nazvána PZ350-T50, kde číslo 350 značí množství cementu v kg v jednom m³ (tzn. 350 kg cementu v 1 m³ betonu), písmeno T značí těžené kamenivo (naopak písmeno D značí drcené kamenivo) a 50 značí vodní

součinitel (tzn. $w/c = 0,50$). Analogicky tedy byly odvozeny názvy: PZ350-D50, PZ350-D45, PZ350-D55, PZ300-T50, PZ400-T50.



Obr. 3.01- odebrání betonu z mixu



Obr. 3.02- Připravená betonová směš pro měření sednutí

Následující tabulky (3.02, 3.03, 3.04, 3.05, 3.06, 3.07) ukazují složení jednotlivých receptur.

PZ350-T50		
Složka	Obsah [kg/m ³]	Objem [m ³]
Těžné kamenivo 0/4 (Zálezlice)	800	0,303
Těžné kamenivo 4/8 (Zálezlice)	240	0,087
Těžné kamenivo 8/16 (Zálezlice)	320	0,118
Těžné kamenivo 11/22 (Zálezlice)	470	0,173
Cement CEM II 32,5 (Radotín)	350	0,113
Popílek	50	0,024
Voda	180	0,180
Lignosulfát (Sika BV 4)	1,5	0,001
Polykarboxylát (Sika ViscoCrete 1035CZ)	1,3	0,001

Tab. 3.02- Složení receptury PZ350-T50

PZ300-T50		
Složka	Obsah [kg/m3]	Objem [m3]
Těžené kamenivo 0/4 (Zálezlice)	850	0,322
Těžené kamenivo 4/8 (Zálezlice)	250	0,091
Těžené kamenivo 8/16 (Zálezlice)	340	0,125
Těžené kamenivo 11/22 (Zálezlice)	500	0,185
Cement CEM II 32,5 (Radotín)	300	0,097
Popílek	50	0,024
Voda	155	0,155
Lignosulfát (Sika BV 4)	1,5	0,001
Polykarboxylát (Sika ViscoCrete 1035CZ)	3	0,002

Tab. 3.03- Složení receptury PZ300-T50

PZ400-T50		
Složka	Obsah [kg/m3]	Objem [m3]
Těžené kamenivo 0/4 (Zálezlice)	760	0,288
Těžené kamenivo 4/8 (Zálezlice)	230	0,084
Těžené kamenivo 8/16 (Zálezlice)	300	0,110
Těžené kamenivo 11/22 (Zálezlice)	450	0,166
Cement CEM II 32,5 (Radotín)	400	0,129
Popílek	50	0,024
Voda	205	0,205
Lignosulfát (Sika BV 4)	1,5	0,001
Polykarboxylát (Sika ViscoCrete 1035CZ)	0,3	0,000

Tab. 3.04- Složení receptury PZ400-T50

PZ350-D50		
Složka	Obsah [kg/m3]	Objem [m3]
Těžené kamenivo 0/4 (Zálezlice)	800	0,303
Těžené kamenivo 4/8 (Zálezlice)	240	0,087
Těžené kamenivo 8/16 (Zálezlice)	320	0,118
Drcené kamenivo 11/22 (Kámen Zbraslav)	470	0,173
Cement CEM II 32,5 (Radotín)	350	0,113
Popílek	50	0,024
Voda	180	0,180
Lignosulfát (Sika BV 4)	1,5	0,001
Polykarboxylát (Sika ViscoCrete 1035CZ)	1,3	0,001

Tab. 3.05- Složení receptury PZ350-D50

PZ350-D45		
Složka	Obsah [kg/m ³]	Objem [m ³]
Těžené kamenivo 0/4 (Zálezlice)	840	0,318
Těžené kamenivo 4/8 (Zálezlice)	250	0,091
Těžené kamenivo 8/16 (Zálezlice)	340	0,125
Drcené kamenivo 11/22 (Kámen Zbraslav)	490	0,181
Cement CEM II 32,5 (Radotín)	350	0,113
Popílek	50	0,024
Voda	162	0,162
Lignosulfát (Sika BV 4)	2,0	0,001
Polykarboxylát (Sika ViscoCrete 1035CZ)	3,2	0,002

Tab. 3.06- Složení receptury PZ350-D45

PZ350-D55		
Složka	Obsah [kg/m ³]	Objem [m ³]
Těžené kamenivo 0/4 (Zálezlice)	760	0,288
Těžené kamenivo 4/8 (Zálezlice)	230	0,084
Těžené kamenivo 8/16 (Zálezlice)	300	0,110
Drcené kamenivo 11/22 (Kámen Zbraslav)	450	0,166
Cement CEM II 32,5 (Radotín)	350	0,113
Popílek	50	0,024
Voda	198	0,198
Lignosulfát (Sika BV 4)	0	0,000
Polykarboxylát (Sika ViscoCrete 1035CZ)	0	0,000

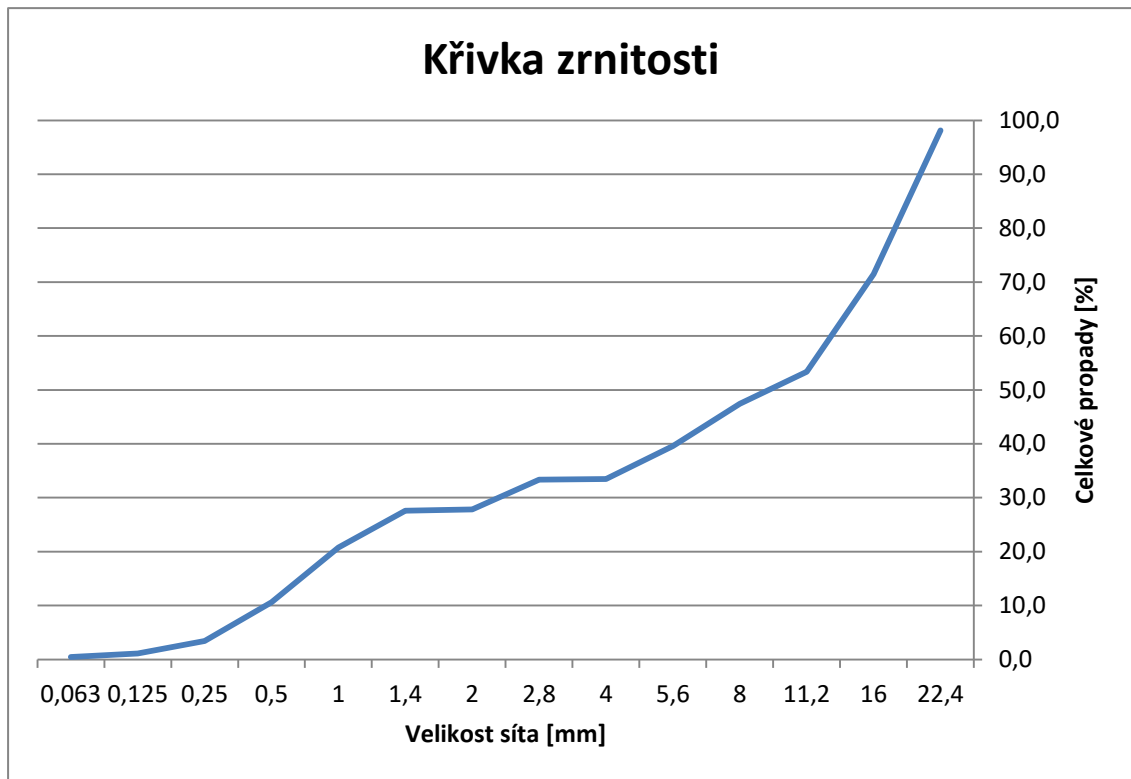
Tab. 3.07- Složení receptury PZ350-D50

Receptury byly vytvořeny tak, aby se měnil vodní součinitel, nebo množství cementu. Poměr kameniva je v každé receptuře stejný, to znamená, že křivka zrnitosti je stejná pro všechny receptury. Množství plastifikačních přísad bylo upraveno tak, aby byla dodržena stejná konzistence. Vodní součinitel byl spočítán podle následujícího vzorce (3.01).

$$w = \frac{v}{c+(k \times m)} \quad (3.01)$$

- Kde
- w je vodní součinitel
 - v je hmotnost vody, v kg
 - c je hmotnost cementu, v kg
 - k je k-hodnota, pro popílek k=0,2
 - m je hmotnost popílku, v kg

Křivka zrnitosti byla vypočítána z tabulky celkových propadů (příloha 1).



Graf 3.01- Křivka zrnitosti

3.3. Výroba

Výroba vzorků byla rozdělena na dvě etapy, z důvodu velkého množství vzorků. V první etapě byla míchána série receptů: PZ350-T50, PZ300-T50 a PZ400-T50. Šlo tedy o receptury se stejným vodním součinitelem a různým množstvím cementu. V druhé etapě byla namíchána série receptů: PZ350-D50, PZ-350D45 a PZ-350D55. Tyto receptury měly naopak stejné množství cementu a různý vodní součinitel. Prodleva mezi těmito částmi byla zhruba 3 měsíce a mezitím se změnila vstupní surovina a to konkrétně kamenivo frakce 11/22. Přes zimu došly zásoby těžného kameniva frakce 11/22 v Zálezlicích (křemenné kamenivo) a bylo nutno toto kamenivo nahradit drceným kamenivem z lomu Kámen Zbraslav (tufity a břidlice), frakce 11/22. Proto tedy značení T (značí těžné kamenivo), či D (značí drcené kamenivo) u receptů.

Následující tabulka (3.08) znázorňuje počet vyrobených vzorků v 1. a v 2. části.

název zkoušky	1. etapa			2. etapa		
	receptura	počet		receptura	počet	
		krychle	válec		krychle	válec
Pevnost v tlaku- po 2 dnech	PZ350-T50	3	-	PZ350-D50	3	-
	PZ300-T50	3	-	PZ350-D45	3	-
	PZ400-T50	3	-	PZ350-D55	3	-
Pevnost v tlaku- po 7 dnech	PZ350-T50	1	-	PZ350-D50	1	-
	PZ300-T50	1	-	PZ300-D50	1	-
	PZ400-T50	1	-	PZ400-D50	1	-
Pevnost v tlaku- po 28 dnech	PZ350-T50	3	1	PZ350-D50	3	1
	PZ300-T50	3	1	PZ300-D50	3	1
	PZ400-T50	3	1	PZ400-D50	3	1
Pevnost v příčném tahu- po 28 dnech	PZ350-T50	3	-	PZ350-D50	3	-
	PZ300-T50	3	-	PZ300-D50	3	-
	PZ400-T50	3	-	PZ400-D50	3	-
Stanovení statického modulu pružnosti- po 28 dnech	PZ350-T50	-	3	PZ350-D50	-	3
	PZ300-T50	-	3	PZ300-D50	-	3
	PZ400-T50	-	3	PZ400-D50	-	3
Hloubka průsaku tlakovou vodou- po 28 dnech	PZ350-T50	1	-	PZ350-D50	3	-
	PZ300-T50	1	-	PZ300-D50	3	-
	PZ400-T50	1	-	PZ400-D50	3	-
Stanovení objemových změn- strunový tenzometr	PZ350-T50	-	1	PZ350-D50	-	1
	PZ300-T50	-	1	PZ300-D50	-	1
	PZ400-T50	-	1	PZ400-D50	-	1
Celkem		33	15		39	15

Tab. 3.08- Přehled počtu vyrobených vzorků



Obr. 3.03- Uskladnění části vzorků před odbedněním (1. etapa)

Výroba byla provedena na betonárně TBG Metrostav s.r.o. v Radlicích. Jedná se o horizontální betonárnu s mísicím jádrem PEMAT o objemu 2 m³, řízenou vyspělým elektronickým řídicím systémem. Záměsi byly vyráběny o objemu 1 m³. Z míchacího jádra byl beton vysypán do autodomíchávače, z kterého se následně odebralo potřebné množství pro výrobu vzorků. Zbylý beton byl následně použit do podkladních betonů. Po zatvrdnutí byly vzorky převezeny do laboratoře SQZ s.r.o. na Zbraslavi, kde byly podrobeny výše zmíněným zkouškám.



Obr. 3.04- Betonárna TBG Metrostav v Radlicích



Obr. 3.05- Prostředí velínu (ukázka míchacího programu na prostředním monitoru)

3.4. Zkoušky na čerstvém betonu

Zkoušky na čerstvém betonu byly prováděny bezprostředně po namíchání betonové směsi na betonárně TBG Metrostav s.r.o. v Radlicích.

3.4.1. Sednutí kužele

Konzistence čerstvého betonu byla měřena pomocí zkoušky sednutí kužele. Výsledky jsou znázorněny v následující tabulce (3.09).

Sednutí kužele	1. etapa			2. etapa		
	Receptura	PZ300-T50	PZ350-T50	PZ400-T50	PZ350-D45	PZ350-D50
Sednutí [mm]	220	220	200	230	230	120

Tab. 3.09- Výsledky zkoušky sednutí kužele

Protože každá receptura obsahuje různé množství vody, byla snaha dorovnat tento fakt přidáním různého množství plastifikačních přísad, aby konzistence receptur byla co nejpodobnější (viz složení receptur).

Problém nastal u receptury PZ300-T50, kde bylo kvůli menšímu obsahu vody (155 l) přidáno větší množství plastifikačních přísad. Sednutí sice bylo naměřeno 220 mm, ale konzistence byla „medová“. To znamená, že s betonem se velmi špatně pracovalo, naštěstí ještě nedocházelo k sedání kameniva, ale beton byl značně „přeplastován“, začaly se na povrchu tvořit bublinky. Obdobný problém se vyskytl u receptu PZ350-D45, kde bylo změřeno sednutí 230 mm. Zde byl nižší obsah vody (162 l) způsoben nižším vodním součinitelem, zároveň horší zpracovatelnost byla pravděpodobně způsobena použitím drceného kameniva. Obě tyto směsi tedy byly neakceptovatelné pro běžné použití.

Naopak u receptury PZ350-D55 jsme dosáhli sednutí pouze 120 mm, ale výsledná zpracovatelnost při výrobě vzorků byla přijatelná. Tato receptura byla míchána nadvakrát, protože při první záměsi se sednutí nedalo skoro změřit. Z receptu se tedy odstranily všechny plastifikační přísady. Což mělo pravděpodobně vliv jak na sednutí kužele, tak na ostatní vlastnosti betonu.

Velká výhoda této zkoušky je, že je jednoduchá a rychle proveditelná přímo na stavbě. Nevýhoda je, že může zkreslovat skutečnou zpracovatelnost, například přeplastované betonové směsi.



Obr. 3.06- Měření sednutí kužele (PZ350-T50)

3.4.2. Obsah vzduchu

Obsah vzduchu byl měřen hned po namíchání pomocí tlakoměrné metody. V následující tabulce jsou zaznamenány údaje z měření (3.10).

Obsah vzduchu	1. etapa			2. etapa		
Receptura	PZ300-T50	PZ350-T50	PZ400-T50	PZ350-D45	PZ350-D50	PZ350-D55
Obsah vzduchu [%]	1,1	2	2,1	0,6	0,9	0,9

Tab. 3.10- Výsledky měření obsahu vzduchu na čerstvém betonu

Z následujících výsledků z 1. etapy vyplývá, že při stejném vodním součiniteli a různém množství cementu roste obsah vzduchu s rostoucím množstvím cementu, tento trend je pravděpodobně způsoben vyšším množstvím záměsové vody, tedy receptura PZ400-T50 bude mít největší pórovitost, což se pravděpodobně odrazí i na ostatních zkouškách.

Z výsledků z 2. etapy vyplývá, že s rostoucím vodním součinitelem roste zároveň obsah vzduchu v betonu. Tento trend je pravděpodobně také způsoben vyšším obsahem záměsové vody. Jde tedy o ověření obecně přijatého a dlouhodobě ozkoušeného faktu.

Zajímavé je také porovnání receptur PZ350-T50 a PZ350-D50, jedná se o skoro stejnou recepturu, pouze s rozdílem v kamenivu frakce 11/22. U receptury PZ350-T50 byl použit již zmíněný těžký kámen ze Zálezlic a u receptury PZ350-D50 byl použit kámen z lomu Kámen Zbraslav. Poměrně nepatrná změna v receptuře má za následek rozdíl 1,1 % obsahu vzduchu v čerstvém betonu.

3.4.3. Objemová hmotnost

Výsledky zkoušky jsou znázorněny v následující tabulce (3.11).

Receptura	Změřená obj. hm. čerstvého betonu [kg/m ³]	Změřená obj. hm. ztvrdlého betonu [kg/m ³]	Vypočtená obj. hm. bez zohlednění vzduchu [kg/m ³]	Obsah vzduchu [%]	Vypočtená obj. hm. se zohledněním vzduchu [kg/m ³]
1. etapa					
PZ300-T50	2370	2380	2449	1,1	2422
PZ350-T50	2330	2340	2413	2	2365
PZ400-T50	2300	2330	2397	2,1	2347
2. etapa					
PZ350-D45	2410	2430	2487	0,6	2472
PZ350-D50	2360	2380	2413	0,9	2391
PZ350-D55	2340	2360	2338	0,9	2317

Tab. 3.11- Výsledky objemových hmotností čerstvého i ztvrdlého betonu

Změřená objemová hmotnost odpovídá předpokládané objemové hmotnosti. Obecně tedy platí, že se vzrůstající pórovitostí klesá objemová hmotnost, což potvrdily i výsledky zkoušek. Výsledky také potvrdily, že objemové hmotnosti čerstvého betonu odpovídají objemovým hmotnostem ztvrdlého betonu, odchylky jsou pravděpodobně způsobeny nepřesností měření a zároveň odpařením části vody, spojené se smrštěním betonu.

3.5. Zkoušky na ztvrdlém betonu

3.5.1. Pevnost v tlaku

Jak již bylo zmíněno, pevnost v tlaku byla měřena na krychlích o hraně 150 mm a to při stáří betonu 2 dny, 7 dní a 28 dní. Zároveň byla změřena na válcích o průměru podstavu 150 mm a výšce 300 mm. Množství vzorků je uvedeno v tabulce 3.08 Množství vyrobených vzorků.

V následujících tabulkách (3.12, 3.13, 3.14) a graf (3.02) jsou znázorněny výsledky pevnosti v tlaku na krychlích. Kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze 2.

Krychelná pevnost v tlaku po 2 dnech						
Receptura	1. etapa			2. etapa		
	PZ300-T50	PZ350-T50	PZ400-T50	PZ350-D45	PZ350-D50	PZ350-D55
Pevnost [MPa]	17,0	13,3	11,6	27,9	20,1	15,5

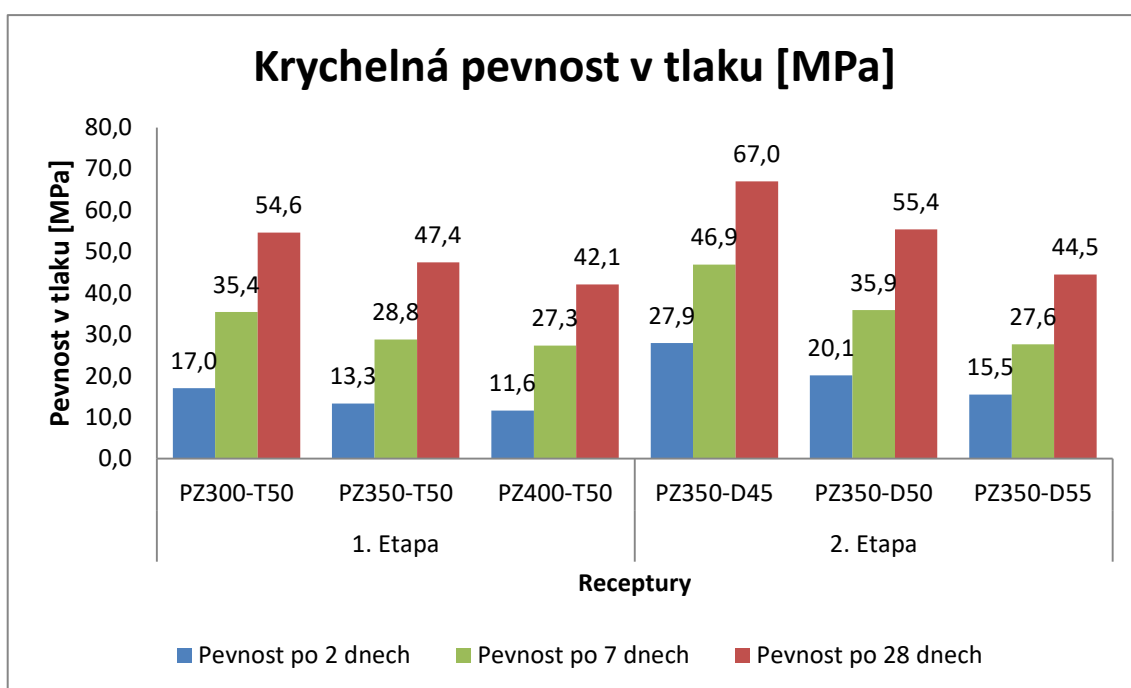
Tab. 3.12- Výsledky krychelných pevností v tlaku po 2 dnech

Krychelná pevnost v tlaku po 7 dnech						
Receptura	1. etapa			2. etapa		
	PZ300-T50	PZ350-T50	PZ400-T50	PZ350-D45	PZ350-D50	PZ350-D55
Pevnost [MPa]	35,4	28,8	27,3	46,9	35,9	27,6

Tab. 3.13- Výsledky krychelných pevností v tlaku po 7 dnech

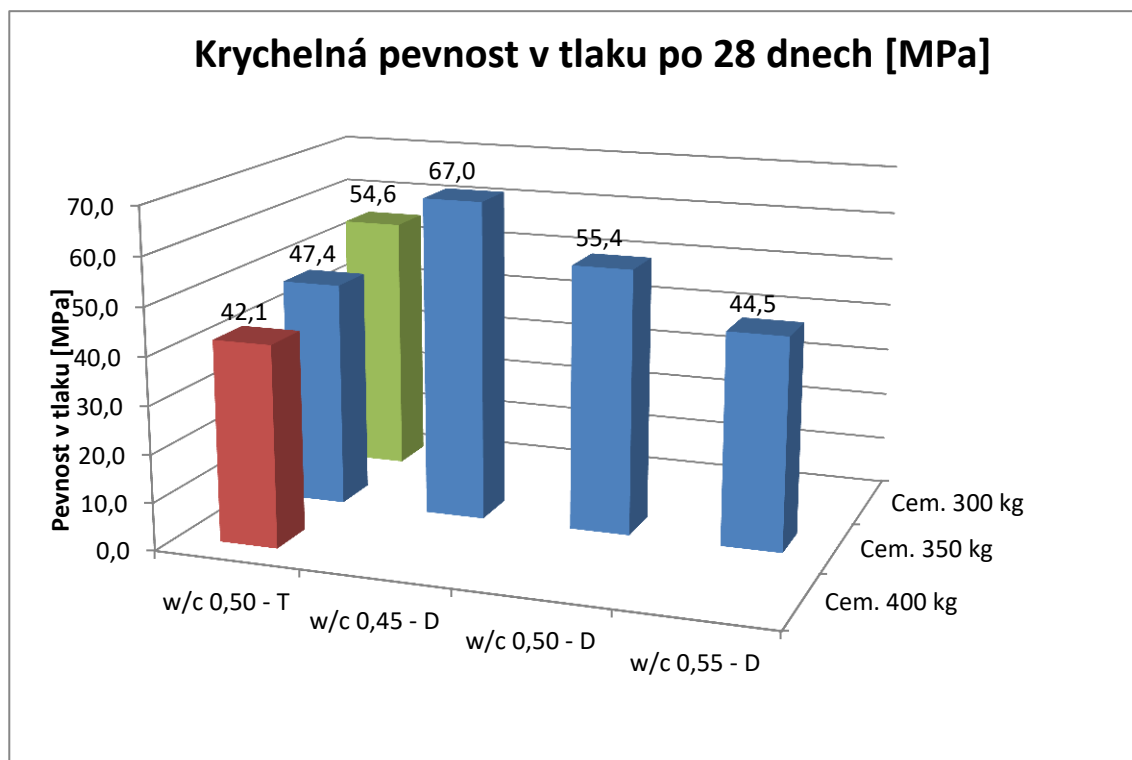
Krychelná pevnost v tlaku po 28 dnech						
Receptura	1. etapa			2. etapa		
	PZ300-T50	PZ350-T50	PZ400-T50	PZ350-D45	PZ350-D50	PZ350-D55
Pevnost [MPa]	54,6	47,4	42,1	67,0	55,4	66,4

Tab. 3.14- Výsledky krychelných pevností v tlaku po 28 dnech



Graf 3.02- Krychelná pevnost v tlaku po 2, 7 a 28 dnech

Následující graf (3.03) znázorňuje pevnosti v tlaku na základě různého vodního součinitele a různého množství cementu. Je zde také zohledněna změna v recepturách, tedy použití těžného kameniva, znázorněného písmenem T a drceného kameniva znázorněného písmenem D.



Graf 3.03- Znázornění pevností v tlaku na základě množství cementu a vodního součinitele

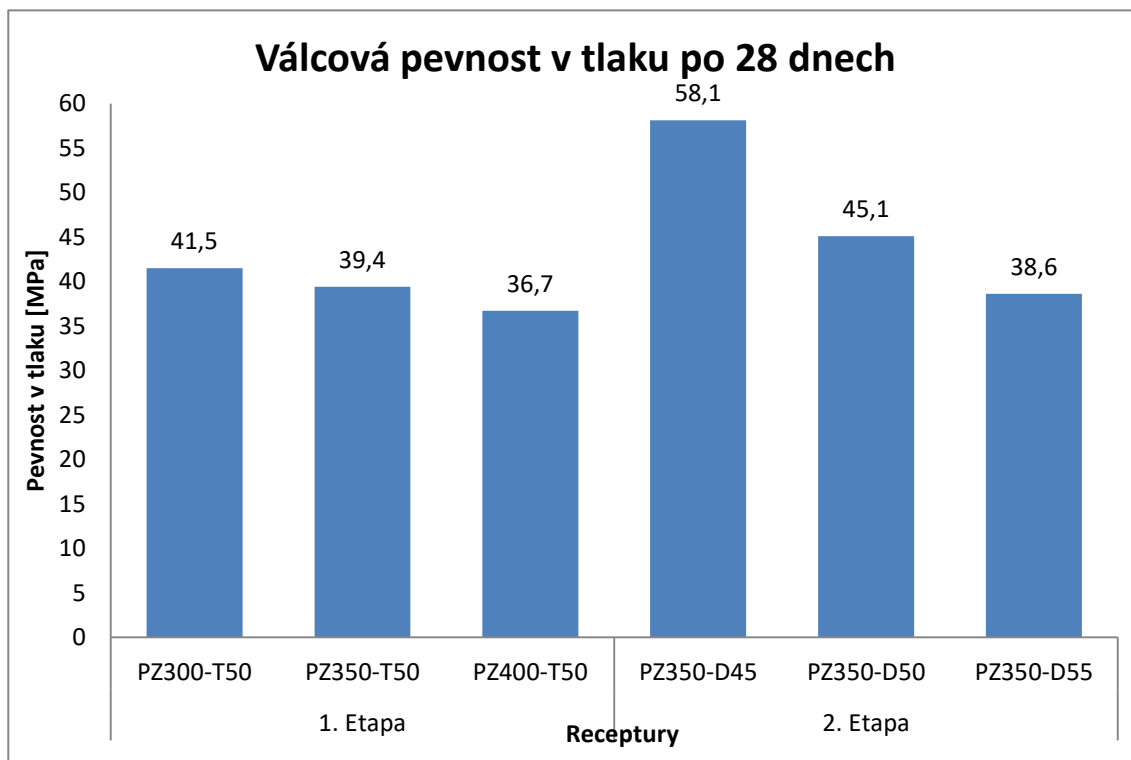
Pokud se zaměříme na druhou etapu míchání, tedy porovnání receptur s různým vodním součinitelem a stejným množstvím cementu, nikoho pravděpodobně nepřekvapí, že se zvyšujícím se vodním součinitelem klesá pevnost betonu v tlaku. Tento fakt souvisí s množstvím vody v betonové směsi, čím větší vodní součinitel, tím více vody v betonu, tím bude větší pórovitost a tím bude menší pevnost. Tento vztah je dlouhodobě odzkoušený a obecně přijímaný a poprvé ho popsal T. C. Powers v roce 1958. Zkoušky provedené jak po 2, po 7, nebo po 28 dnech potvrzují tuto teorii. [20]

Když se podíváme na první etapu, tedy receptury, které mají stejný vodní součinitel, ale různé množství cementu, výsledky ukazují, že se vzrůstajícím množstvím cementu klesá pevnost betonu v tlaku. Pravděpodobně tedy nezáleží tolik na množství cementu v betonu, ale více záleží na množství vody a tedy na výsledné pórovitosti. Je pravda, že při dalším snižování množství cementu se můžeme dostat až na kritickou

dávku cementu, která by výrazně ovlivnila pevnost. Nicméně 300 kg v 1 m³ touto dávkou určitě nebude.

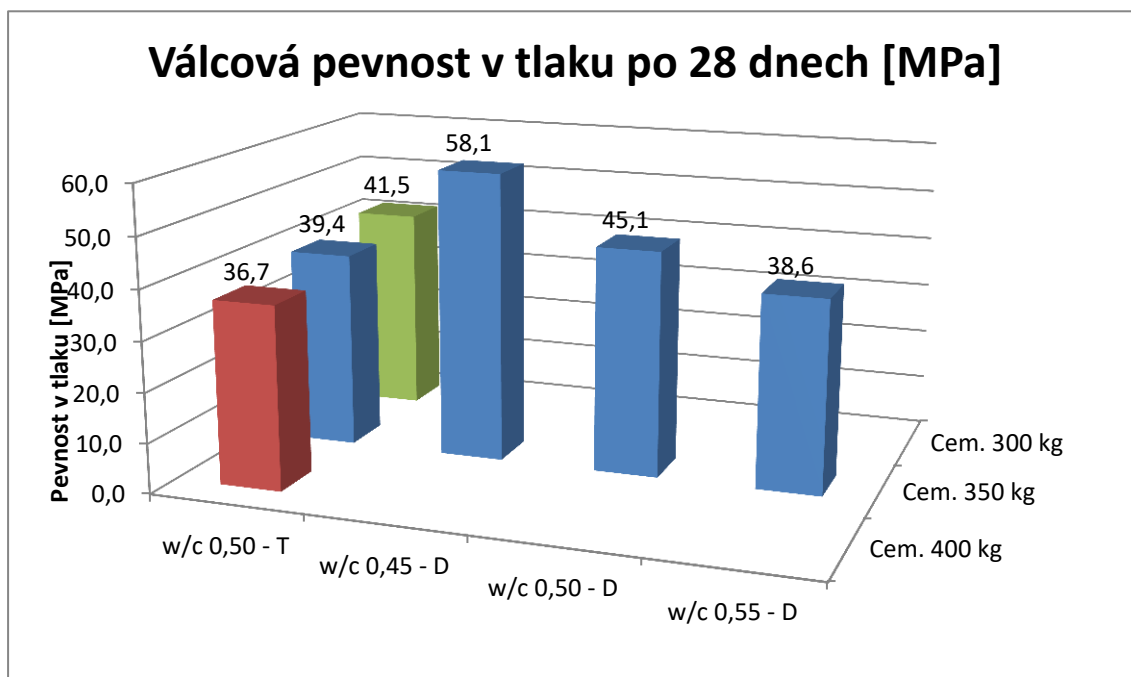
Při porovnání konkrétních receptur PZ350-T50 a PZ350-D50, které se od sebe liší pouze jiným typem kameniva frakce 11/22 zjistíme, že receptura PZ350-D50 dosáhla v průměru o 8 MPa vyšší pevnosti než receptura PZ350-T50. Z tohoto rozdílu můžeme usoudit, že i nepatrná změna ve složení receptury může mít velký vliv na konečné vlastnosti.

Dále stojí za zmínku nárůst pevností, který jde přibližně ve stejném duchu u všech receptur. Tento trend potvrzuje teorii, že na rychlost náběhu pevností má hlavní vliv typ cementu a jemnost mletí. Protože byl použit jednotný typ cementu (CEM II 32,5) je nárůst pevností přibližně stejný.



Graf 3.04- Výsledky pevnosti v tlaku na válcích

Pevnosti v tlaku na válcích jsou v podobném trendu jako na krychlích. Pouze v první etapě, tedy u receptur PZ300-T50, PZ350-T50 a PZ400-T50 nejsou rozdíly tak markantní.



Graf 3.05- Výsledky pevnosti v tlaku na válcích

Válcová pevnost v tlaku by měla odpovídat zhruba 80% krychelné pevnosti v tlaku. Následující tabulka znázorňuje poměr mezi válcovou pevností v tlaku po 28 dnech a krychelnou pevností v tlaku po 28 dnech.

Poměr mezi válcovou a krychelnou pevností v tlaku po 28 dnech						
Receptura	1. etapa			2. etapa		
	PZ300-T50	PZ350-T50	PZ400-T50	PZ350-D45	PZ350-D50	PZ350-D55
[-]	0,76	0,83	0,87	0,87	0,81	0,87

Tab. 3.15- Výsledky válcových a krychelných pevností v tlaku po 28 dnech

Válcová pevnost v tlaku by měla odpovídat zhruba 80% krychelné pevnosti v tlaku. Jediná receptura PZ300-T50 na tento předpoklad nedosáhla a receptury PZ400-T50, PZ350-D45 a PZ350-D55 tento předpoklad výrazně překonaly. U receptur kde se měnilo množství cementu a vodní součinitel zůstával stále stejný, tedy receptury PZ300-T50, PZ350-T50 a PZ400-T50, narůstá poměr pevností s množstvím cementu. Pro zobecnění tohoto trendu bylo vyzkoušeno velmi málo vzorků na málo recepturách, takže se může jednat pouze o náhodu, nicméně to může být impuls pro vytvoření dalších zkoušek.



Obr. 3.07- Zkouška krychelné pevnosti v tlaku



Obr. 3.08- Zkouška válcové pevnosti v tlaku

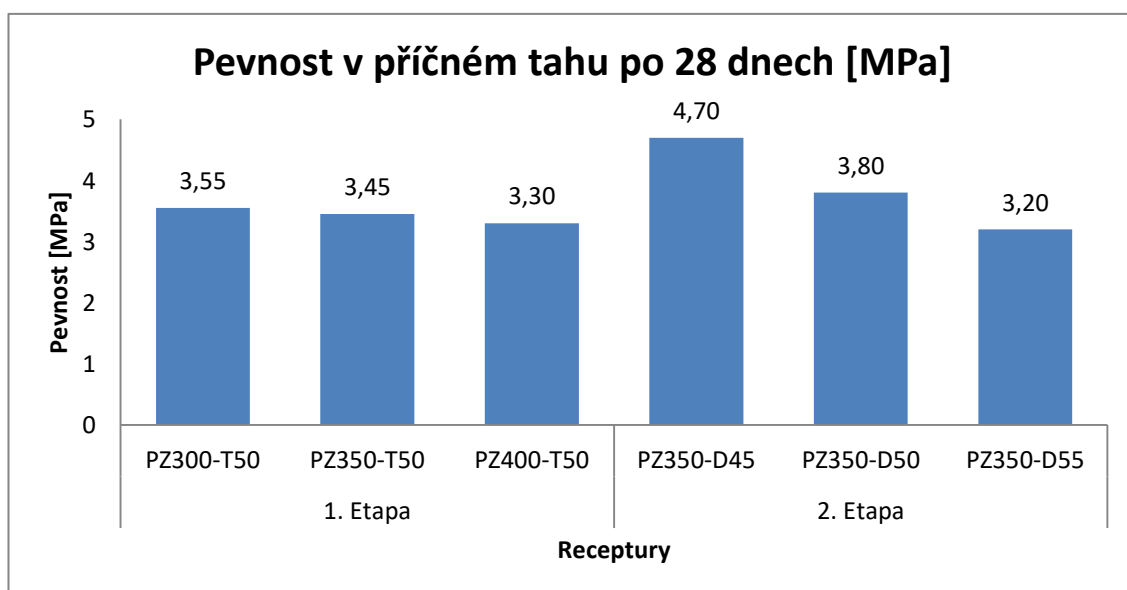
3.5.2. Pevnost v příčném tahu

Pevnost v příčném tahu byla zkoušena na krychlích o hraně 150 mm. Množství vzorků je uvedeno v tabulce 3.08 Množství vyrobených vzorků.

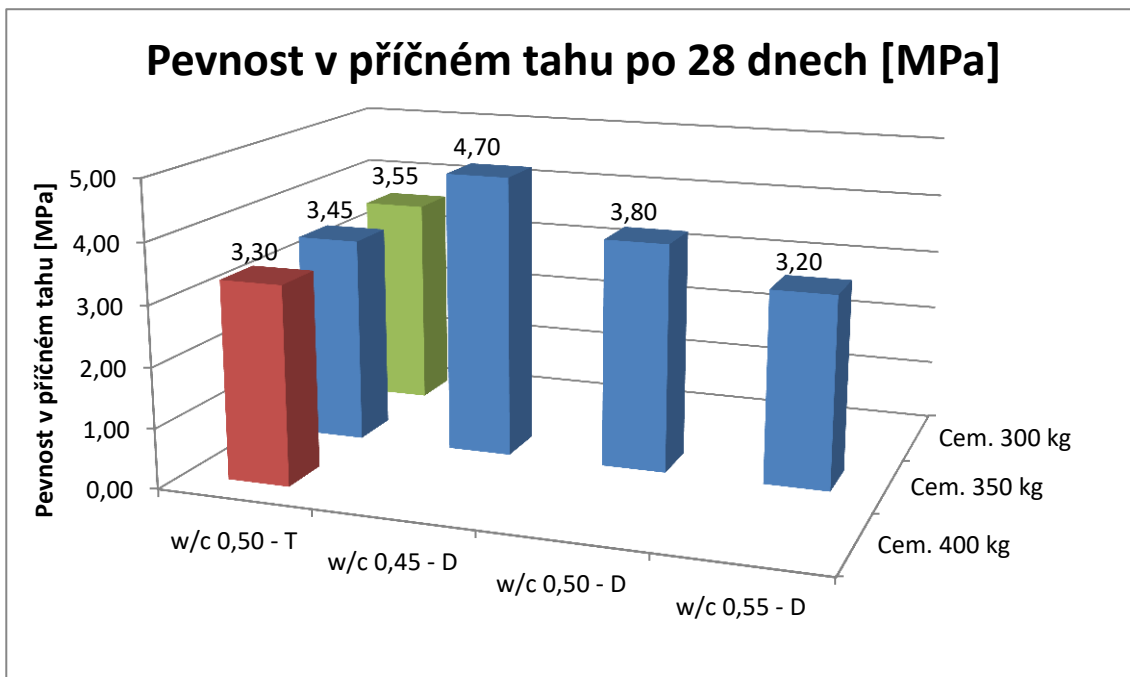
V následující tabulce (3.16) a grafu (3.06 a 3.07) jsou znázorněny výsledky zkoušky pevnost v příčném tahu. Kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze 3.

Pevnost v příčném tahu						
Receptura	1. etapa			2. etapa		
	PZ300-T50	PZ350-T50	PZ400-T50	PZ350-D45	PZ350-D50	PZ350-D55
Pevnost [MPa]	3,55	3,45	3,30	4,70	3,80	3,20

Tab. 3.16- Výsledky pevnosti v příčném tahu po 28 dnech



Graf 3.06- Výsledky pevnosti v příčném tahu



Graf 3.07- Výsledky pevnosti v příčném tahu

Pevnost v příčném tahu má stejný trend jako pevnost zkoušená na válcích, tedy se zvyšujícím se množstvím cementu při stejném vodním součiniteli klesá pevnost v příčném tahu a se zvyšujícím se vodním součinitelem klesá pevnost v příčném tahu. Jak již bylo zmíněno, tento trend pravděpodobně souvisí s množstvím vody v betonové směsi a s následnou pórovitostí ztvrdlého betonu.

V první etapě jsou rozdíly velmi malé a tendence změny pevnosti je lineární. Zatímco v druhé etapě je rozdíl mezi PZ350-D45 a PZ350-D50 o 33% větší než rozdíl mezi PZ350-D50 a PT350-D55. Dále je vidět, že změna kameniva z těžného na drcené má kladný dopad na pevnost v příčném tahu.



Obr. 3.09- Zkouška krychelné pevnosti v tlaku

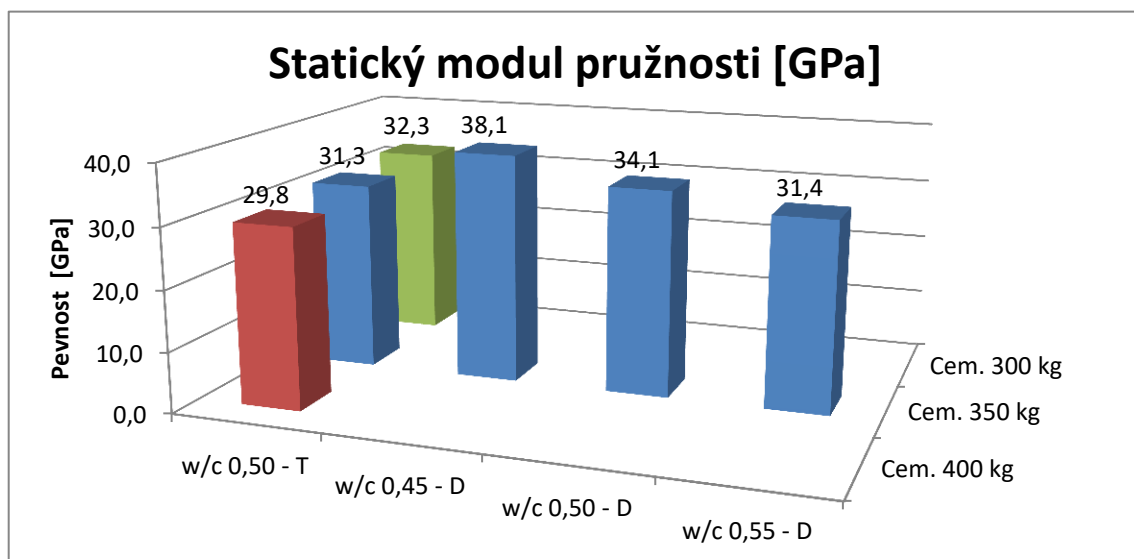
3.5.3. Modul pružnosti

Modul pružnosti byl zkoušen na válcích o průměru podstavy 150 mm a výšce 300 mm. Množství vzorků je uvedeno v tabulce 3.08 Množství vyrobených vzorků. Stáří vzorků bylo 28 dní.

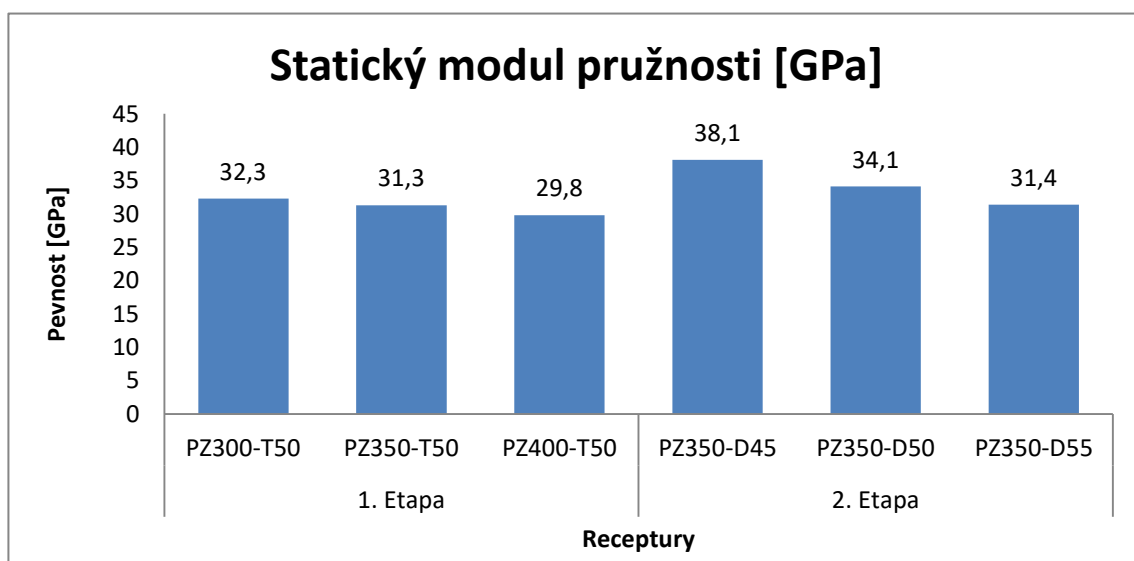
V následující tabulce (3.17) a grafech (3.08 a 3.09) jsou znázorněny výsledky statického modulu pružnosti. Kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze 4.

Statický modul pružnosti						
Receptura	1. etapa			2. etapa		
	PZ300-T50	PZ350-T50	PZ400-T50	PZ350-D45	PZ350-D50	PZ350-D55
Pevnost [GPa]	32,3	31,3	29,8	38,1	34,1	31,4

Tab. 3.17- Výsledky stanovení statického modulu pružnosti po 28 dnech



Graf 3.08- Výsledky stanovení statického modulu pružnosti



Graf 3.09- Výsledky stanovení statického modulu pružnosti

Modul pružnosti závisí na složení, hutnění a ošetřování betonu. V našem případě bylo hutnění a ošetřování betonu stejné pro všechny vzorky, rozdíl ve výsledcích je tedy způsoben různým složením betonové směsi.

Z výsledků z první etapy vyplývá, že při stejném vodním součiniteli klesá modul pružnosti s rostoucím množstvím cementu. Tento efekt bude pravděpodobně znovu způsoben různým množstvím vody v recepturách. Zároveň ale rozdíl mezi recepturami je mnohem menší, než u pevností v tlaku. V druhé etapě jsou rozdíly mezi recepturami dramatičtější. Z výsledků je vidět že s rostoucím vodním součinitelem klesá modul pružnosti. Při porovnání receptury PZ350-D50 a PZ350-T50, zjistíme, že při použití drceného kameniva (tufity a břidlice) vzroste modul pružnosti o 2,8 GPa.

Statický modul pružnosti můžeme také vypočítat na základě průměrné válcové pevnosti betonu v tlaku a to podle ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí- Část 2: Betonové mosty-Navrhování a konstrukční zásady (EC2), a nebo podle fib Model Code 2010 (MC2010). [26]

ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [26]

$$E_{cm} = 22 \times \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{0,3} \quad (3.02)$$

Kde E_{cm} je průměrný sečnový modul pružnosti, v Pa
 f_{cm} je průměrná válcová pevnost v tlaku, v Pa

fib Model Code 2010 [26]

$$E_{ci} = E_{c0} \times \alpha_e \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{1/3} \quad (3.03)$$

Kde E_{ci} je průměrný tečnový modul pružnosti, v Pa
 f_{cm} je průměrná válcová pevnost v tlaku, v Pa
 E_{c0} je 21 500 Pa
 α_e je součinitel druhu kameniva, v našem případě: $\alpha_e=1$

$$E_c = E_{ci} \times \alpha_i \quad (3.04)$$

Kde E_{ci} je průměrný tečnový modul pružnosti, v Pa
 E_c je redukovaný modul pružnosti, v Pa

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{f_{cm}}{88} \leq 1 \quad (3.05)$$

Kde α_i je součinitel vyjadřující redukci mezi tečnovým a sečnovým modulem
 f_{cm} je průměrná válcová pevnost v tlaku, v Pa

Redukovaný modul pružnosti (E_c) dává přibližně hodnotu sečnového modulu (E_{cm}) pro hladinu napětí $0,4 f_{cm}$, která je uvažována jako limitní hodnota pro napětí v mezním stavu použitelnosti. V následující tabulce (3.15) jsou tedy porovnány tyto vypočtené moduly pružnosti s naměřenými moduly. [26]

Porovnání metod pro stanovení modulů pružnosti						
Receptura	1. etapa			2. etapa		
	PZ300-T50	PZ350-T50	PZ400-T50	PZ350-D45	PZ350-D50	PZ350-D55
Naměřená pevnost [GPa]	32,3	31,3	29,8	38,1	34,1	31,4
EC2 [GPa]	33,7	33,2	32,5	37,3	34,6	33,0
MC2010 [Gpa]	30,9	30,2	29,3	36,0	32,1	29,9

Tab. 3.18- Porovnání metod pro stanovení modulu pružnosti

Z výsledků je vidět, že Eurokód moduly pružnosti nadhodnocuje, zatímco Model Code je lehce podhodnocuje. Pokud se tedy jedná o specifický projekt, kdy je nutno znát přesný modul pružnosti, měly by se vždy udělat průkazné zkoušky, protože výpočtové metody jsou hlavně orientační.



Obr. 3.10- Zkoušení statického modulu pružnosti

3.5.4. Hloubka průsaku tlakovou vodou

Hloubka průsaku tlakovou vodou byla měřena na krychlích o hraně 150 mm. Následující tabulka ukazuje výsledky zkoušek hloubky průsaku tlakovou vodou.

1. etapa			
Zkouška	Receptura	Průsak [mm]	Průměrný průsak [mm]
Průsak tlakovou vodou	PZ300-T50	32	32
	PZ350-T50	0	0
	PZ400-T50	0	0
2. etapa			
Zkouška	Receptura	Průsak [mm]	Průměrný průsak [mm]
Průsak tlakovou vodou	PZ350-D45	10	15
		16	
		19	
	PZ350-D50	30	20
		18	
		13	
	PZ350-D55	26	28
		25	
		33	

Tab. 3.19- Výsledky zkoušky- Hloubka průsaku tlakovou vodou

Z následující tabulky je vidět, že při první etapě byla z každé receptury vytvořena jen jedna krychle, což se ukázalo jako nevyhovující, protože u receptury PZ350-T50 a PZ400-T50 nebyl naměřen žádný průsak tlakovou vodou, to může být způsobeno buď výbornými vlastnostmi betonu nebo chybou při provádění zkoušky. Výskyt chyby při provádění zkoušky se jeví jako pravděpodobnější vysvětlení. Z tohoto důvodu byly ve druhé etapě vytvořeny vždy 3 vzorky z každé receptury.

Zároveň po zhodnocení výsledků z druhé etapy bylo domluveno, že se zopakují zkoušky na průsak tlakovou vodou z první etapy. Jak již bylo zmíněno, bohužel se na betonárně z ekonomických důvodů změnila největší frakce kameniva 11/22 z těžného na drcené. Opakované receptury PZ300-T50, PZ350-T50 a PZ400-T50 budou změněny na PZ300-D50, PZ350-D50 a PZ400-D50. Byly vytvořeny tři krychle o hraně 150 mm z každé nové receptury. Tyto vzorky nyní čekají na dosažení stáří 28 dnů.

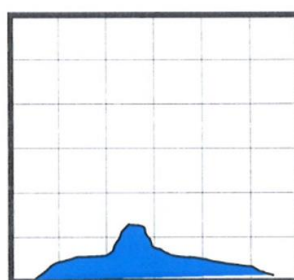
Výsledky z druhé etapy ukazují, že změna vodního součinitele má vliv na hloubku průsaku tlakovou vodou, se zvyšujícím se vodním součinitelem stoupá i hloubka průsaku tlakovou vodou. Na průsak má zásadní vliv pórovitost ztvrdlého betonu, a to

velikost pórů, otevřenost pórů a množství pórů. Se zvýšenou dávkou vody roste množství pórů ve ztvrdlém betonu.

Rozdíly mezi vzorky z receptury PZ350-D50 jsou poměrně značné, nejmenší naměřený průsak byl 13 mm a největší naměřený průsak 30 mm. Tyto rozdíly jsou pravděpodobně způsobeny nehomogenitou materiálu, nebo různým ukládáním a hutněním vzorků.

Následující obrázky (Obr. 3.10) graficky znázorňují průsaky jednotlivých vzorků.

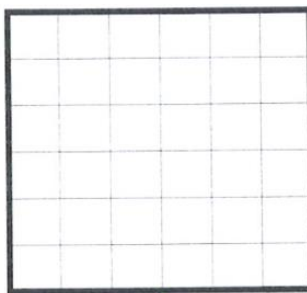
PZ300-T50



Směr působení vodního tlaku

Obr. 3.11- vzorek 1, průsak 32 [mm]

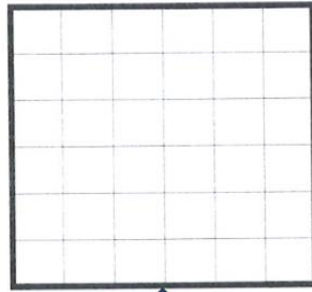
PZ350-T50



Směr působení vodního tlaku

Obr. 3.12- vzorek 1, průsak 0 [mm]

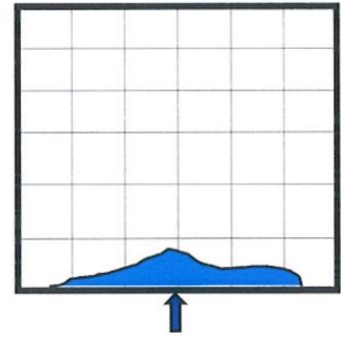
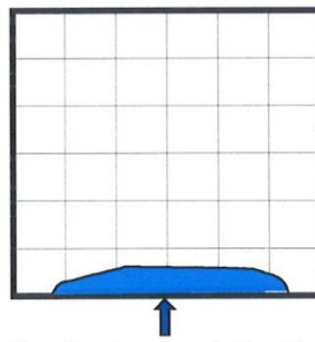
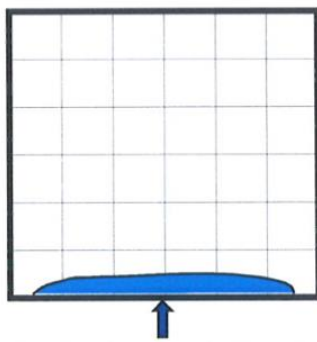
PZ400-T50



Směr působení vodního tlaku

Obr. 3.13- vzorek 1, průsak 0 [mm]

PZ350-D45



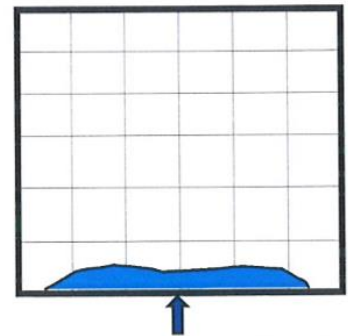
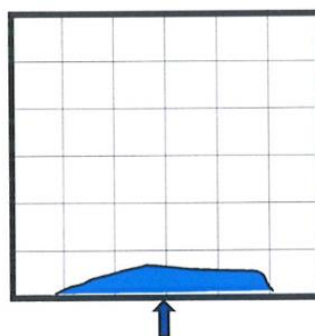
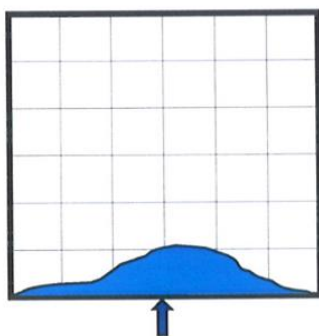
Směr působení vodního tlaku

Obr. 3.14- v. 1, průsak 10 [mm]

Obr. 3.15- v. 2, průsak 16 [mm]

Obr. 3.16- v. 3, průsak 19 [mm]

PZ350-D50



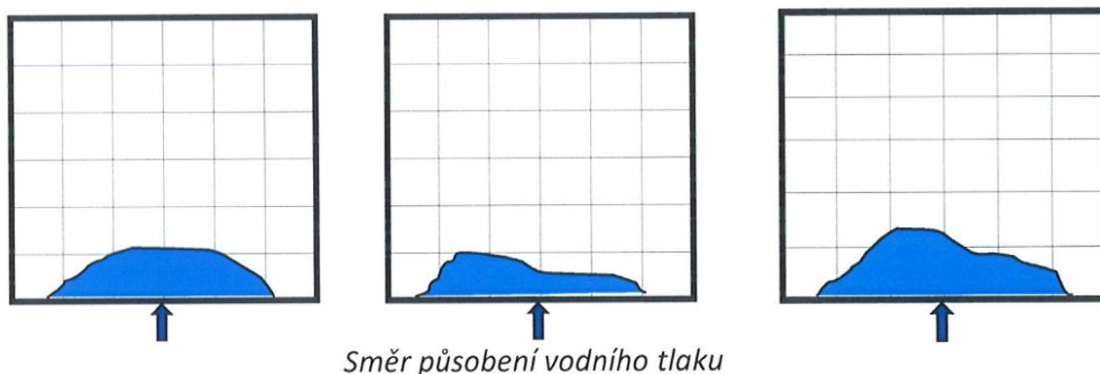
Směr působení vodního tlaku

Obr. 3.17- v. 1, průsak 30 [mm]

Obr. 3.18- v. 2, průsak 18 [mm]

Obr. 3.19- v. 3, průsak 13 [mm]

PZ350-D55



Obr. 3.20- v. 1, průsak 26 [mm]

Obr. 3.21- v. 2, průsak 25 [mm]

Obr. 3.22- v. 3, průsak 33 [mm]

Jak již bylo zmíněno, kvůli nevyhovujícím výsledkům byly opakovány zkoušky na hloubku průsaku tlakovou vodou u receptur: PZ300-D50, PZ350-D50 a PZ400-D50, tedy u receptur, kde se mění pouze množství cementu. Bohužel nemůžeme tyto receptury porovnávat s původními: PZ300-T50, PZ350-T50 a PZ400-T50, protože těžené kamenivo frakce 11/22 bylo z ekonomických důvodů nahrazeno drceným kamenivem. Nicméně transparentnost jevu, kdy porovnáváme stejné receptury se stejným vodním součinitelem, ale různým množstvím cementu, zůstává zachována.

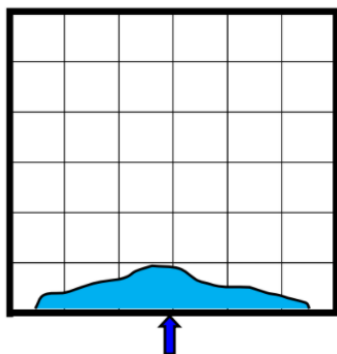
3. Etapa			
Zkouška	Receptura	Průsak [mm]	Průměrný průsak [mm]
Průsak tlakovou vodou	PZ300-D50	24	17
		12	
		15	
	PZ350-D50	21	20
		25	
		15	
	PZ400-D50	30	22
		22	
		14	

Tab. 3.20- Výsledky zkoušky- Hloubka průsaku tlakovou vodou (3. Etapa)

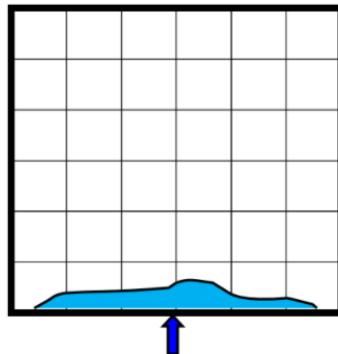
Rozptyly jednotlivých vzorků jsou poměrně výrazné, ale trend, že se zvyšujícím se množstvím cementu při stejném vodním součiniteli se zhoršují výsledné vlastnosti, zůstává stejný. Znovu to bude pravděpodobně způsobeno celkovým množstvím vody v záměsi. Tedy čím více vody použijeme, tím více vznikne pórů a tím větší bude průsak tlakovou vodou. Dalším vlivem je také podíl jemných částic, to bude pravděpodobně

důvod, proč se od sebe výsledky tolik neliší, receptura PZ400-D50 má sice nejvíce vody a tím pádem nejvíce pórů, ale má také největší podíl jemných částic, který příznivě působí na hloubku průsaku tlakovou vodou.

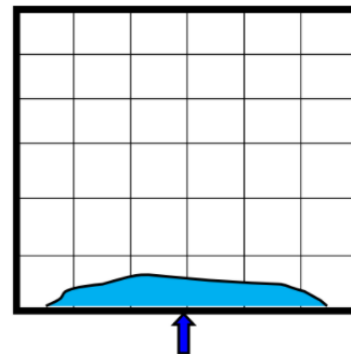
PZ300-D50



Obr. 3.23- v. 1, průsak 24 [mm]



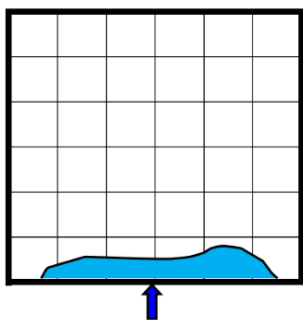
Obr. 3.24- v. 2, průsak 12 [mm]



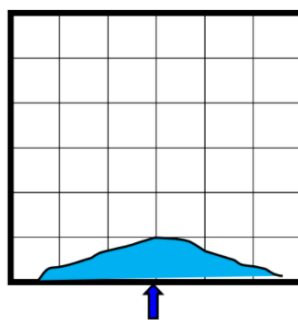
Obr. 3.25- v. 3, průsak 15 [mm]

Směr působení vodního tlaku

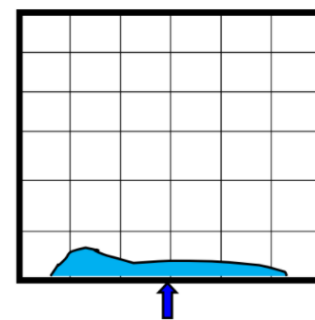
PZ350-D50



Obr. 3.26- v. 1, průsak 21 [mm]



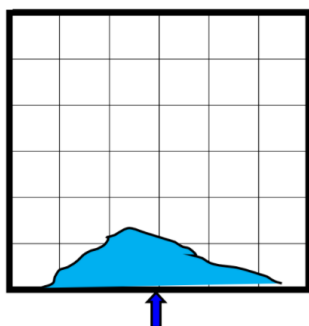
Obr. 3.27- v. 2, průsak 25 [mm]



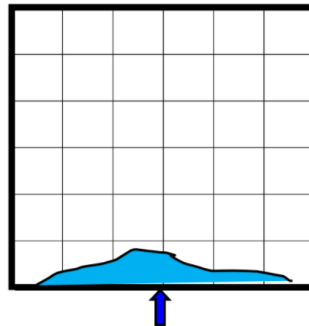
Obr. 3.28- v. 3, průsak 15 [mm]

Směr působení vodního tlaku

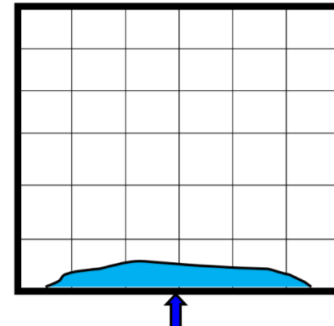
PZ400-D50



Obr. 3.29- v. 1, průsak 30 [mm]



Obr. 3.30- v. 2, průsak 22 [mm]



Obr. 3.31- v. 3, průsak 14 [mm]

Směr působení vodního tlaku

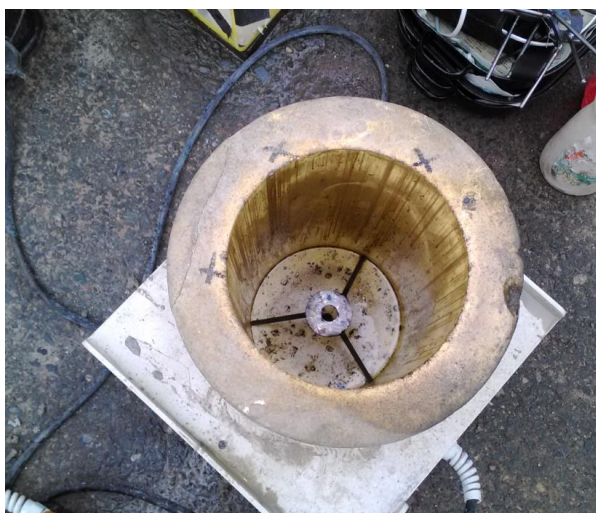
3.5.5. Smrštění

Smrštění bylo měřeno na válcích o průměru podstavy 150 mm a výšce 300 mm, pomocí zabetonovaných strunových tenzometrů TES/5.5/T. Vzorky byly uloženy v normálním laboratorním prostředí po dobu 48 hodin, poté byly odbedněny a uloženy do klimatizované místnosti s řízenou teplotou a vlhkostí ($T= 18- 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $rH= 60- 70\%$).

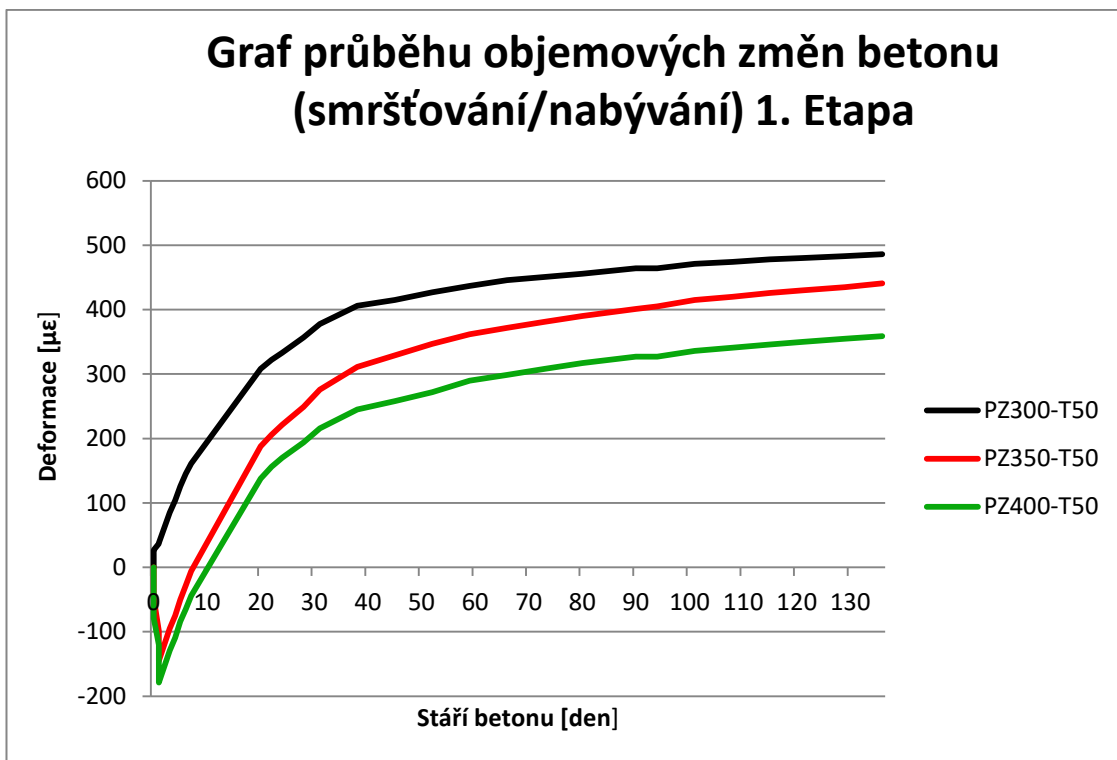
Obecně můžeme smrštění rozdělit na autogenní a plastické. Objem složek před hydratací cementu je větší, než objem složek po hydrataci, tedy objem ztvrdlého betonu, tento jev nazýváme autogenní smrštění. Naopak plastické smrštění je způsobeno vysycháním betonu, tedy unikáním vody do okolí před začátkem tuhnutí betonu. Autogenní smrštění můžeme ovlivnit pouze složením betonu, zatímco plastické smrštění můžeme výrazně ovlivnit množstvím vody a správným ošetřováním betonu. Smrštění od vysychání (plastické smrštění) může paradoxně snižovat zvyšování množství cementu v betonové směsi. Pokud zvýšíme množství cementu, větší podíl vody zhydratuje s cementem a zbyde tedy méně vody pro vysychání betonu. Nakonec tedy bude mírně zvýšené autogenní smrštění ale snížené plastické smrštění. [8][25]

Protože se naše vzorky nacházely vždy ve stejných laboratorních podmínkách, můžou být rozdíly mezi objemovými změnami betonu přičítány pouze různému složení receptur. Z následujících předpokladů vyplývá, že pokud zvýšíme množství vody, zvýší se plastické smrštění a pokud zvýšíme množství cementu, zvýší se autogenní smrštění. Na celkové smrštění má dále vliv velikost frakce kameniva a křivka zrnitosti.

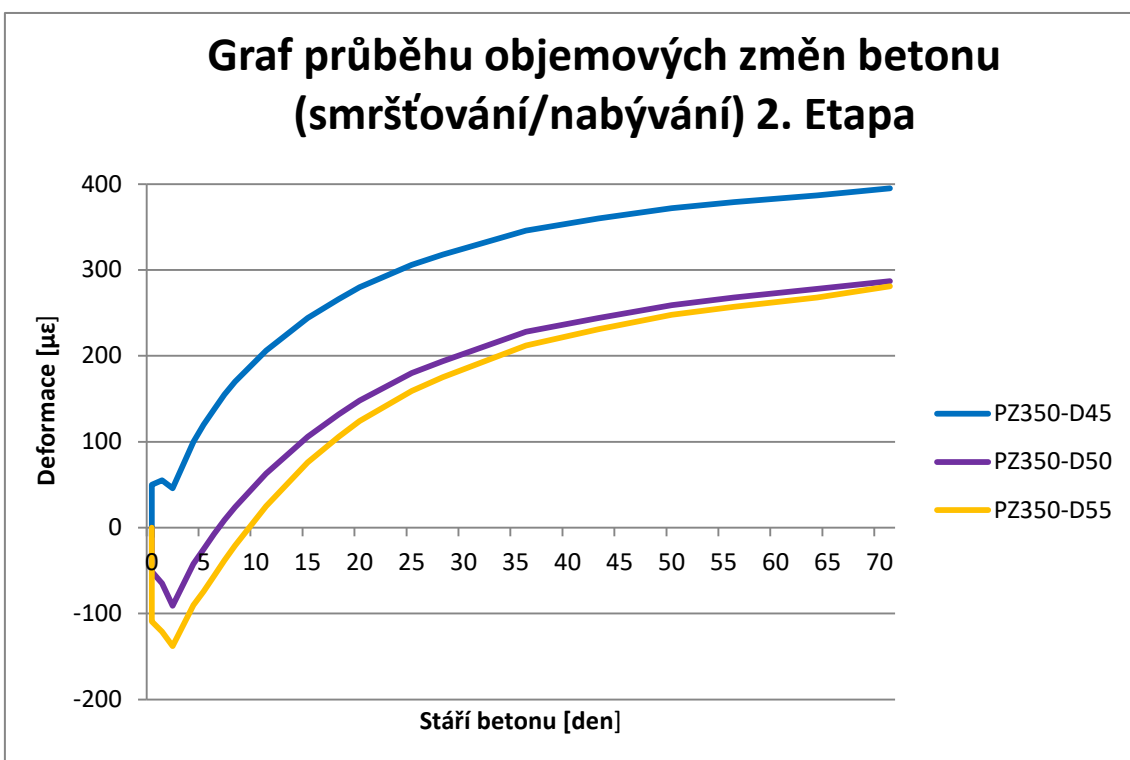
V následujících grafech (Graf: 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15) jsou znázorněny objemové změny betonu. Kompletní záznamy jsou uvedeny v příloze 5.



Obr. 3.32- Osazení tenzometru



Graf 3.10- Průběh objemových změn (nabývání i smrštění), 1. Etapa



Graf 3.11- Průběh objemových změn (nabývání i smrštění), 2. Etapa

Z výsledků vyplývá, že nabývání betonu se zvyšuje společně se zvýšením množství cementu, nebo zvýšením množství záměsové vody. Pokud tedy budeme uvažovat objemové změny betonu celkově a to jak bobtnání tak smrštění betonu, zjistíme, že předem zmíněné předpoklady o závislosti množství cementu a množství záměsové vody na smrštění nejsou zcela relevantní. Například v 1. etapě, při porovnání receptur PZ300-D50, PZ350-D50 a PZ400-D50, receptura PZ400-D50 obsahuje největší množství cementu a největší množství vody. Tato receptura vykazuje největší bobtnání a tím pádem výsledné smrštění je menší, než u zbylých receptur a receptura PZ300-D50, tedy receptura s nejmenším množstvím cementu a nejmenším množstvím vody vykazuje největší smrštění, protože nedošlo ke změřitelnému bobtnání.

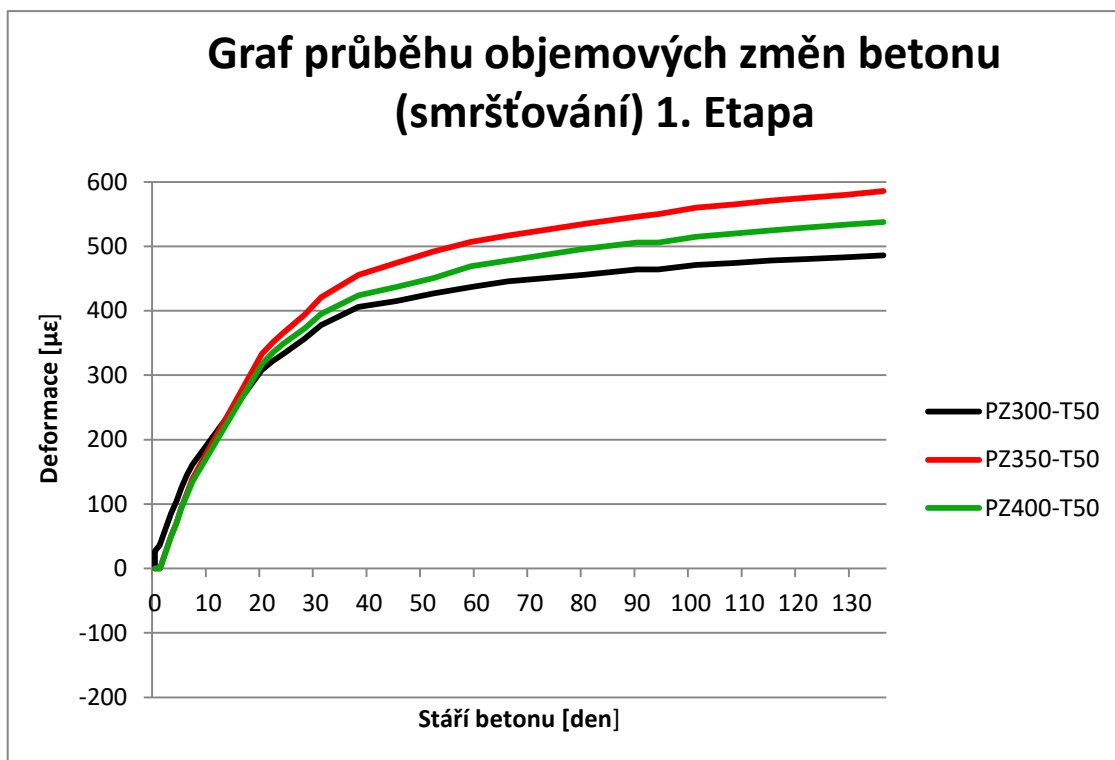
Podobný trend ukazují i výsledky z 2. etapy, kde se mění pouze množství vody a množství cementu zůstává pořád stejné. Receptura s největším množstvím vody PZ350-D55 vykazuje největší bobtnání a celkové smrštění po 71 dnech je nejmenší. Nicméně tato receptura vykazuje strmější náběh smrštění, je tedy možné, že za delší časový úsek bude celkové smrštění větší než u PZ350-D50 a PZ350-D45.

Aby bylo docíleno stejné konzistence, bylo u receptury PZ300-T50 a PZ350-D45 použito velké množství plastifikačních přísad (viz složení receptur). To může být jeden z důvodů, proč u nich není znatelné bobtnání betonu. Dalšími důvody budou malá dávka cementu a záměsové vody.

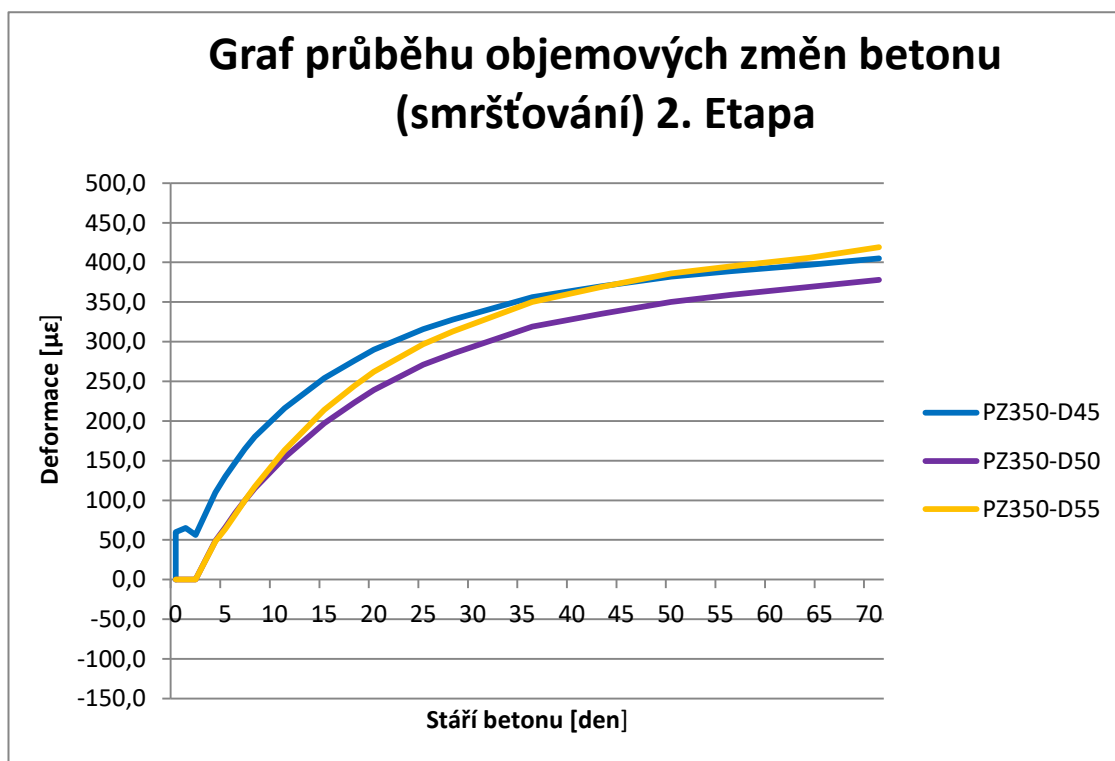
Další možností pohledu na celkové smrštění je, neuvažovat bobtnání betonu, ale pouze jeho celkové smrštění. V následujících dvou grafech (Graf 3.08 a 3.09) je zaznamenáno pouze smrštění betonových směsí bez vlivu bobtnání.



Obr. 3.33- Osazení tenzometru



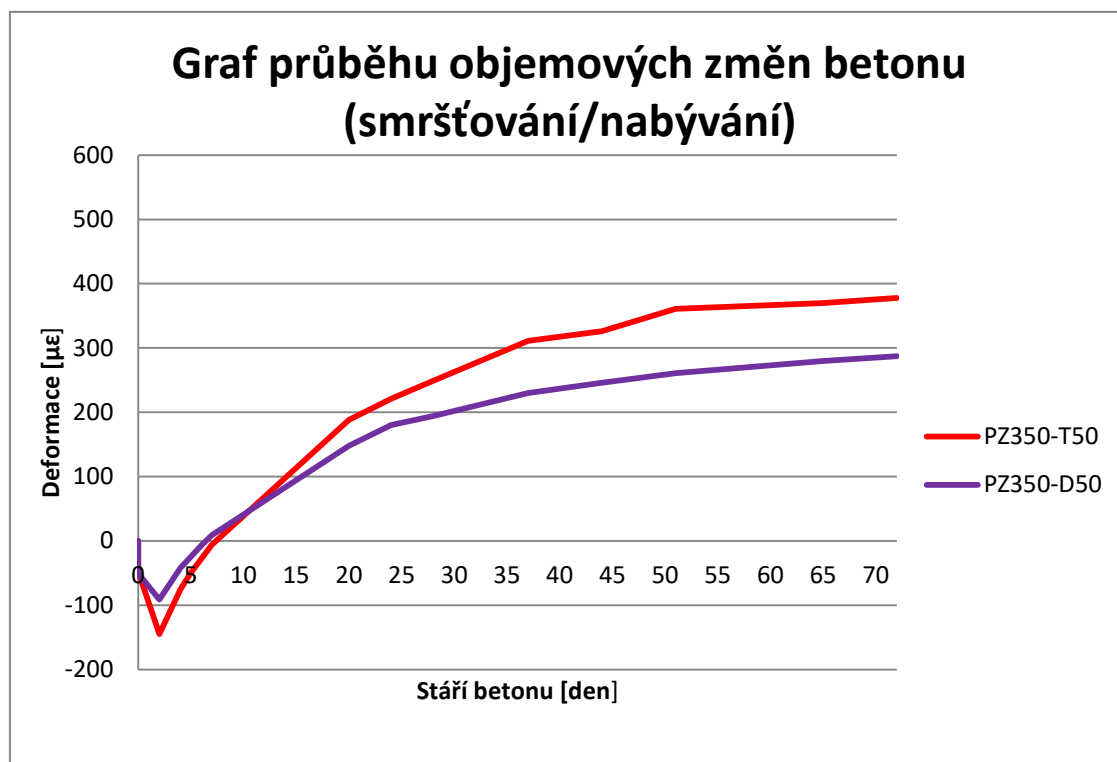
Graf 3.12- Průběh smršťování, 1. etapa



Graf 3.13- Průběh smršťování, 2. etapa

Pokud si odmyslíme bobtnání a budeme uvažovat pouze smrštění betonu, zjistíme, že v 1. Etapě receptura PZ300-T50 vykazuje nejmenší smrštění, což odpovídá předpokladům (nejmenší množství cementu a nejmenší množství vody, znamená nejmenší smrštění). Při porovnání receptur PZ350-T50 a PZ400-T50 zjistíme, že PZ400-T50 má výsledné smrštění menší než PZ350-T50, to bude pravděpodobně zapříčiněno již zmíněným paradoxem, že pokud zvýšíme množství cementu, zhydratuje více vody, autogenní smrštění se mírně zvýší, ale plastické smrštění se sníží, tím pádem se sníží i celkové smrštění. Je ale otázka, zda se tento jev uplatní i při stejném vodním součiniteli.

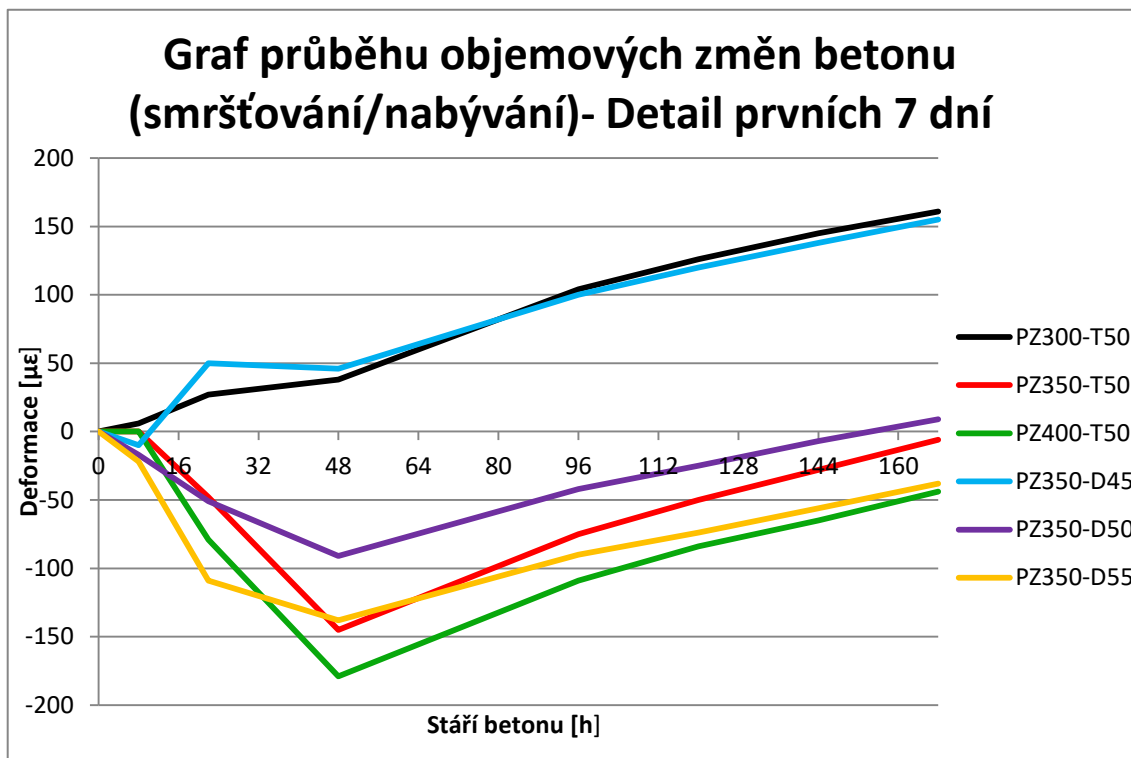
V 2. Etapě je situace poněkud jasnější. Receptura s největším vodním součinitelem PZ350-D55 vykazuje největší smrštění. Úvodní předpoklady ale částečně vyvrací porovnání receptur PZ350-D45 a PZ350-D50, kde receptura PZ350-D45 má větší smrštění jak receptura PZ350-D50. Je ale pravda, že křivky se k sobě lehce přibližují, takže je možné, že se tento rozdíl časem vyrovná.



Graf 3.14- Porovnání receptur PZ350-T50 a PZ350-D50

Pokud porovnáme pouze receptury PZ350-D50 a PZ-350T50, které mají stejný vodní součinitel a stejné množství cementu, takže jejich složení se liší pouze typem kameniva frakce 11/22. Zjistíme, že nejen velikost kameniva a čára zrnitosti má vliv na

objemové změny betonu, ale také typ kameniva. Receptura s drceným kamenivem (PZ350-D50) má výrazně menší smrštění, než receptura s těžným kamenivem (PZ350-T50).



Graf 3.15- Porovnání receptur PZ350-T50 a PZ350-D50

Graf 3.11 detailně znázorňuje prvních 7 dní. Zde je vidět, že pouze u 2 receptur, PZ300-T50 a PZ350-D45, nedochází k zdatelnému bobtnání betonu. Zároveň je zde patrné, že konec bobtnání nastává vždy po 48 hodinách (2 dnech), kdy došlo k odbednění vzorků.



Obr. 3.34- Měření objemových změn betonu



Obr. 3.35- Měření objemových změn

4. ZÁVĚR

4.1. Cíle práce

- Cílem bakalářské práce bylo popsat a porovnat dva základní přístupy k návrhu betonové směsi, porovnání jejich výhod a nevýhod a objasnění základních principů. Toto porovnání je zpracováno v teoretické části práce.
- Dalším cílem práce bylo navrhnout receptury a následně z nich vyrobit vzorky, které budou podrobeny zkouškám pevnosti v tlaku, pevnosti v příčném tahu, stanovení modulu pružnosti, stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou a stanovení objemových změn. Výroba vzorků, provedení zkoušek a následné vyhodnocení výsledků je zpracováno v experimentální části práce.

4.2. Závěry plynoucí z výsledků zkoušek

- Z výsledků z první etapy míchání vyplývá, že receptura s množstvím cementu 400 kg/m^3 má oproti receptuře s množstvím cementu 300 kg/m^3 při stejném vodním součiniteli výrazně nižší pevnost v tlaku, pevnost v příčném tahu, modul pružnosti, větší hloubku průsaku tlakovou vodou, vyšší ekonomickou a ekologickou náročnost a jedinou výhodou této receptury je lepší zpracovatelnost.
- Výsledky z druhé etapy dokazují, že vodní součinitel má zásadní vliv na výsledné vlastnosti betonu. Se zvyšujícím se vodním součinitelem klesá pevnost v tlaku, pevnost v příčném tahu, modul pružnosti, roste hloubka průsaku tlakovou vodou, ale zlepšuje se zpracovatelnost. Tento jev platí u receptur, které mají stejné množství cementu a příměsí.
- Rozhodující podíl na výsledných vlastnostech má celkové množství vody v záměsí.
- Receptury s vyšším množstvím vody v záměsí mají v našem případě horší životnost, než receptury s nižším množstvím vody, posuzováno dle hloubky průsaku tlakovou vodou.
- Změna již jedné složky receptury (v našem případě kameniva frakce 11/22 z těžného na drcené) má zásadní vliv na konečné vlastnosti betonu.
- Celkové smrštění nezávisí pouze na množství vody, množství cementu a ošetřování, ale také na velikosti počátečního bobtnání.

4.3. Shrnutí výsledků z hlediska performance-based návrhu

- V České republice je podle ČSN EN 206 a ČSN P 73 2404 striktně předepsána hodnota maximálního vodního součinitele a minimálního množství cementu, kvůli zajištění požadované životnosti betonu v daném prostředí. Na základě provedeného výzkumu lze formulovat některé otázky a konstatování do určité míry zpochybňující předepsaný postup.
- Je nutné se striktně držet těchto preskriptivních požadavků?
- Je nutné omezovat maximální vodní součinitel, když je nezjistitelný u ztvrdlého betonu.
- Je nutné omezit minimální množství cementu, pokud z výsledků jasně plyne, že s rostoucím množstvím cementu při stejném vodním součiniteli klesají kvalitativní vlastnosti?
- Určitě by bylo prospěšnější, více se soustředit na potřebné finální vlastnosti betonu, než předpisovat, jak se k těmto vlastnostem dostat.
- Při používání místních zdrojů se mohou výrazně měnit vstupní suroviny a tím pádem i výsledné vlastnosti betonu.
- Performance-based specifikace je uzpůsobena k využití místních surovin.
- Performance-based specifikace i preskriptivní specifikace mají své výhody i úskalí a každá z nich se bude pravděpodobně více hodit pro jiný typ projektu, právě proto by investor, projektant a hlavně výrobce betonu měli mít možnost volby mezi preskriptivním návrhem betonu a performance-based návrhem.

4.4. Předmět dalšího výzkumu

- Porovnat receptury při zkouškách na odolnost vůči CHLR (chemické rozmrazovací látky) a mrazuvzdornost.
- Ověřit správnost měření počátečního smršťování/nabývání pomocí strunových tenzometrů.
- Podrobnějším sledováním zjistit podmínky vzniku počátečního nabývání, s ohledem na složení betonu
- Zjistit případnou závislost počátečního nabývání na způsobu ošetřování betonu

5. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BICKEY, John, R. Doug HOOTON, Kenneth C. HOVER. Preparation of a Performance-based Specification for Cast-In-Place Concrete. In: *NRMCA research and engineering* [online]. RMC Research Foundation, 2006. [cit. 14-2-2017]. Dostupné z: <http://www.nrmca.org/P2P/Phase%20I%20Report%20Final%20January%202006.pdf>
- [2] ACI Committee 329. *Report on Performance-Based Requirements for Concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014. P. 46. IBSN 978-0-87031-974-7
- [3] LOBO, Colin, Lionel LEMAY, Karthik OBLA. Performance-Based Specifications for Concrete. In: *NRMCA research and engineering* [online]. NRMCA, 2012. [cit. 16-2-2017]. Dostupné z: <https://www.nrmca.org/research/Performance-based%20Specifications%20for%20Concrete%20Paper%20for%20AE%20Conference.pdf>
- [4] TEPLÝ, Břetislav. Performance-based navrhování betonových konstrukcí a specifikace betonu. *Beton TKS*, 2009, 2, pp. 42-45. ISSN 1213-3116
- [5] KULKARNI, Vijay. Why Performance-based Specifications for Concrete?. In: *Indian Concrete Institute* [online]. Indian Concrete Institute. 2012 [cit. 24-2-2017]. Dostupné z: <http://www.indianconcreteinstitute.org/images/stories/paper%201%20why%20performance%20specs%20by%20v%20kulkarni.pdf>
- [6] ČSN EN 206, *Beton- Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014
- [7] ČSN P 73 2404, *Beton- Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda-doplňující informace*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016
- [8] *Ebeton, slovník pojmů* [online]. Svaz výrobců betonu ČR. [cit. 13-3-2017]. Dostupnost z: <http://www.ebeton.cz/pojmy>
- [9] *P2P Initiative* [online]. NMRCA, 2013. [cit. 28-3-2017]. Dostupné z: https://www.nrmca.org/research_engineering/P2P/About5.htm
- [10] PYTLÍK, Petr, *Technologie betonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2000. IBSN 80-214-1647-5

- [11] ČSN EN 12350-2, *Zkoušení čerstvého betonu- Část 2: Zkouška sednutím*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [12] ČSN EN 12350-6, *Zkoušení čerstvého betonu- Část 6: Objemová hmotnost*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [13] ČSN EN 12350-7, *Zkoušení čerstvého betonu- Část 7: Obsah vzduchu- Tlakové metody*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [14] ČSN EN 12390-3, *Zkoušení ztvrdlého betonu- Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [15] ČSN EN 12390-6, *Zkoušení ztvrdlého betonu- Část 3: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010
- [16] ČSN EN 12390-8, *Zkoušení ztvrdlého betonu- Část 3: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [17] ČSN ISO 1920-10, *Zkoušení betonu- Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016
- [18] ČSN EN 73 1320, *Stanovení objemových změn betonu*. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1988
- [19] TP 226, č.l. 2.5.4, *Vysokohodnotné betony pro mosty PK*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, obor silniční infrastruktury, 2009
- [20] PAVLÍKOVÁ, Milena, Zbyšek Pavlík, Jiří Hošek. *Materiálové inženýrství I druhé rozšířené vydání*. Praha, 2011
- [21] Sednutí kužele. In: *Ebeton* [online]. Svaz výrobců betonu, CZ SVB. [vid. 24. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/sednuti-kuzele>
- [22] Pevnost v tlaku. In: *Ebeton* [online]. Svaz výrobců betonu, CZ SVB. [vid. 24. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku-zkouska>

- [23] Pevnost v příčném tahu. In: *Ebeton* [online]. Svaz výrobců betonu, CZ SVB. [vid. 24. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-pricnem-tahu-zkouska>
- [24] ANTON, Ondřej. *Zkušebnictví a technologie: Modul BI02-M04 Laboratorní cvičení*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2004, 64 s
- [25] COUFAL, Robert. Parametry betonu- Specifikace, předpoklady a realita. *Beton TKS*, no. 2/2017, vol. 17, pp. 34- 37, ISSN 1213-3116
- [26] VÍTEK, Jan Ladislav, Jiří Kolísko, Robert Coufal, Petr Huňka, Michal Števula. *Technická pravidla ČBS 05: Modul pružnosti Betonu*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2016

6. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1- Tabulka celkových propadů

Příloha č. 2- Kompletní výsledky pevnosti v tlaku

Příloha č. 3- Kompletní výsledky pevnosti v příčném tahu

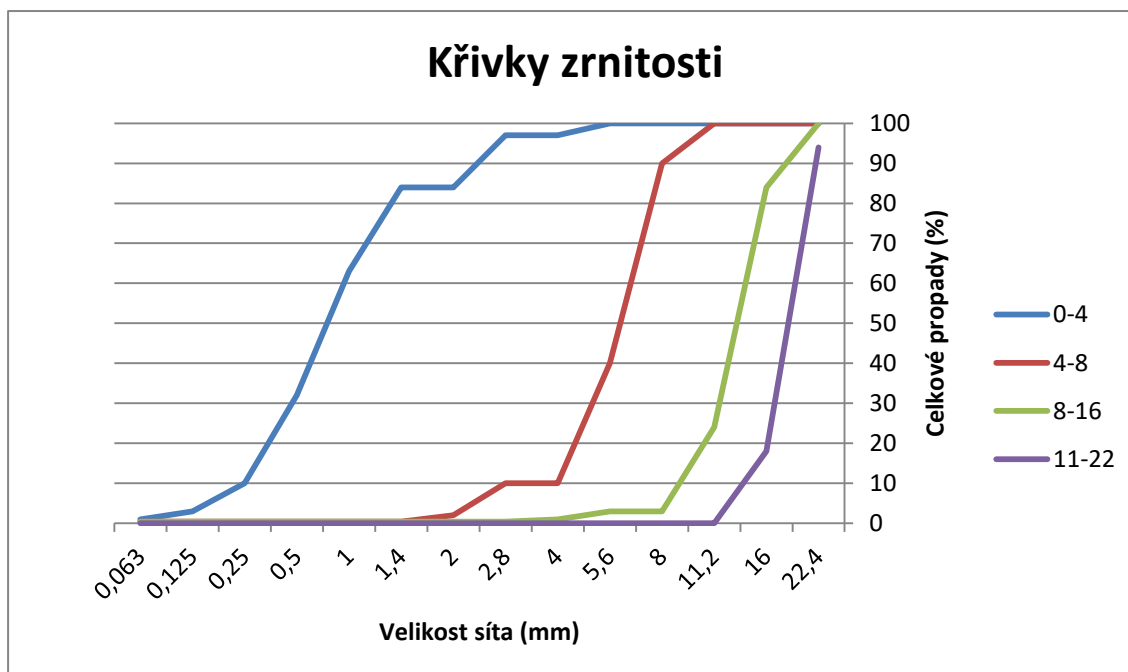
Příloha č. 4- Kompletní výsledky modulu pružnosti

Příloha č. 5- Kompletní výsledky smrštění

7. PŘÍLOHY

Příloha č. 1- tabulka celkových propadů

		Celkové propady (%)			
Frakce [mm]		0-4	4-8	8-16	11-22
Velikost síta (mm)	22,4	100	100	100	94
	16	100	100	84	18
	11,2	100	100	24	0
	8	100	90	3	0
	5,6	100	40	3	0
	4	97	10	1	0
	2,8	97	10	0,4	0
	2	84	2	0,4	0
	1,4	84	0,4	0,4	0
	1	63	0,4	0,4	0
	0,5	32	0,4	0,4	0
	0,25	10	0,4	0,4	0
	0,125	3	0,4	0,4	0
	0,063	1	0,4	0,4	0



Příloha č. 2- Kompletní výsledky pevnosti v tlaku

1. etapa					
Zkouška	Receptura	Vzorek	Stáří [den]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
Krychelná pevnost v tlaku po 2 dnech [MPa]	PZ300-T50	6392/1	2	16,9	17,0
		6392/2	2	17,1	
		6392/3	2	16,9	
	PZ350-T50	6391/1	2	12,8	13,3
		6391/2	2	13,5	
		6391/3	2	13,6	
	PZ400-T50	6393/1	2	11,9	11,6
		6393/2	2	11,1	
		6393/3	2	11,8	
Krychelná pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	PZ300-T50	6393/4	7	35,4	35,4
	PZ350-T50	6391/4	7	28,8	28,8
	PZ400-T50	6393/4	7	27,3	27,3
Krychelná pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	PZ300-T50	6392/5	28	54,9	54,6
		6392/6	28	55,1	
		6392/7	28	53,8	
	PZ350-T50	6391/5	28	46,4	47,4
		6391/6	28	47,6	
		6391/7	28	48,2	
	PZ400-T50	6393/5	28	42,7	42,1
		6393/6	28	41,1	
		6393/7	28	42,6	
2. etapa					
Zkouška	Receptura	Vzorek	Stáří [den]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
Krychelná pevnost v tlaku po 2 dnech [MPa]	PZ350-D45	6541/1	2	26,8	27,9
		6541/2	2	27,0	
		6541/3	2	29,9	
	PZ350-D50	6539/1	2	20,2	20,1
		6539/2	2	19,2	
		6539/3	2	20,8	
	PZ350-D55	6540/1	2	15,0	15,5
		6540/2	2	15,7	
		6540/3	2	15,9	
Krychelná pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	PZ350-D45	6541/4	7	46,9	46,9
	PZ350-D50	6539/4	7	35,9	35,9
	PZ350-D55	6540/4	7	27,6	27,6

Příloha č. 2- Kompletní výsledky pevnosti v tlaku

Krychelná pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	PZ350-D45	6541/5	28	66,2	67,0
		6541/6	28	67,4	
		6541/7	28	67,5	
	PZ350-D50	6539/5	28	55,4	55,4
		6539/6	28	54,9	
		6539/7	28	56,0	
	PZ350-D55	6540/5	28	44,5	44,5
		6540/6	28	43,5	
		6540/7	28	45,4	

1. etapa					
Zkouška	Receptura	Vzorek	Stáří [den]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
Válcová pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	PZ300-T50	6392/12	28	43,3	41,5
		6392/13	28	44,0	
		6392/14	28	39,5	
		6392/15	28	39,3	
	PZ350-T50	6391/12	28	39,1	39,4
		6391/13	28	39,9	
		6391/14	28	39,4	
		6391/15	28	39,0	
	PZ400-T50	6393/12	28	35,9	36,7
		6393/13	28	36,8	
		6393/14	28	37,2	
		6393/15	28	36,8	
2. etapa					
Zkouška	Receptura	Vzorek	Stáří [den]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
Válcová pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	PZ350-D45	6541/14	28	58,5	58,1
		6541/15	28	59,1	
		6541/16	28	55,2	
		6541/17	28	59,4	
	PZ350-D50	6539/14	28	46,0	45,1
		6539/15	28	45,0	
		6539/16	28	45,5	
		6539/17	28	43,8	
	PZ350-D55	6540/14	28	39,2	38,6
		6540/15	28	38,2	
		6540/16	28	37,7	
		6540/17	28	39,1	

Příloha č. 3- Kompletní výsledky pevnosti v příčném tahu

1. etapa					
Zkouška	Receptura	Vzorek	Stáří [den]	Pevnost v příčném tahu [MPa]	Průměrná pevnost v příčném tahu [MPa]
Pevnost v příčném tahu [MPa]	PZ300-T50	6392/9	28	3,56	3,55
		6392/10	28	3,49	
		6392/11	28	3,61	
	PZ350-T50	6391/9	28	3,58	3,45
		6391/10	28	3,63	
		6391/11	28	3,20	
	PZ400-T50	6393/9	28	3,44	3,30
		6393/10	28	3,26	
		6393/11	28	3,18	
2. etapa					
Zkouška	Receptura	Vzorek	Stáří [den]	Pevnost v příčném tahu [MPa]	Průměrná pevnost v příčném tahu [MPa]
Pevnost v příčném tahu [MPa]	PZ350-D45	6541/11	28	4,55	4,70
		6541/12	28	4,76	
		6541/13	28	4,85	
	PZ350-D50	6539/11	28	3,64	3,80
		6539/12	28	3,93	
		6539/13	28	3,82	
	PZ400-D55	6540/11	28	3,19	3,20
		6540/12	28	3,10	
		6540/13	28	3,26	

Příloha č. 4- Kompletní výsledky modulu pružnosti

1. etapa					
Zkouška	Receptura	Vzorek	Stáří [den]	Statický modul pružnosti [GPa]	Průměrný statický modul pružnosti [GPa]
Stanovení modulu pružnosti	PZ300-T50	6392/13	28	31,9	32,3
		6392/14	28	31,5	
		6392/15	28	33,5	
	PZ350-T50	6391/13	28	31,2	31,3
		6391/14	28	31,4	
		6391/15	28	31,4	
	PZ400-T50	6393/13	28	29,9	29,8
		6393/14	28	29,8	
		6393/15	28	29,8	
2. etapa					
Zkouška	Receptura	Vzorek	Stáří [den]	Statický modul pružnosti [GPa]	Průměrný statický modul pružnosti [GPa]
Stanovení modulu pružnosti	PZ350-D45	6541/15	28	38,2	38,1
		6541/16	28	37,8	
		6541/17	28	38,3	
	PZ350-D50	6539/15	28	33,3	34,1
		6539/16	28	34,9	
		6539/17	28	34,0	
	PZ350-D55	6540/15	28	31,2	31,4
		6540/16	28	31,5	
		6540/17	28	31,4	

Příloha č. 5- Kompletní výsledky smrštění

PZ300-T50				
Stáří	Smrštění	Smrštění	Telota	rel. Vlhkost
[den]	[$\mu\epsilon$]	[‰]	[°C]	[%]
0	0	0,00	11,7	
0,3	6	0,01	13,7	
0,9	27	0,03	18,8	
1,3	37	0,04	21,0	52,0
1,9	38	0,04	24,4	53,7
3,2	85	0,09	20,6	63,3
4	104	0,10	21,3	62,4
5	126	0,13	21,3	63,7
6	145	0,15	21,5	63,5
7	161	0,16	21,3	61,8
20	308	0,31	21,4	62,5
22	322	0,32	21,5	62,7
24	333	0,33	21,3	62,4
28	357	0,36	21,7	61,5
31	378	0,38	21,0	65,2
38	406	0,41	21,7	63,0
45	415	0,41	21,0	62,0
52	427	0,43	21,1	63,0
59	437	0,44	21,3	63,3
66	446	0,45	20,8	69,5
73	451	0,46	20,9	62,6
80	456	0,46	21,0	61,3
90	464	0,46	20,9	63,7
94	464	0,46	21,3	63,4

PZ350-T50				
Stáří	Smrštění	Smrštění	Telota	rel. Vlhkost
[den]	[$\mu\epsilon$]	[‰]	[°C]	[%]
0	0	0,00	10,6	
0,3	0	0,00	17,2	
0,9	-48	-0,05	20,5	
1,3	-99	-0,10	22,2	52,0
1,9	-145	-0,15	25,0	55,3
3,2	-95	-0,09	20,7	63,7
4	-75	-0,08	21,3	62,9
5	-50	-0,05	21,3	62,6
6	-28	-0,03	21,5	63,6
7	-6	-0,01	21,3	62,1
20	188	0,19	21,5	62,9
22	206	0,21	21,7	63,8
24	221	0,22	21,4	61,9

28	249	0,25	21,8	61,9
31	276	0,28	21,7	65,9
38	311	0,31	21,7	62,0
45	329	0,33	21,1	62,6
52	347	0,35	21,3	63,0
59	362	0,36	21,9	63,5
66	372	0,37	18,9	69,0
73	381	0,38	21,6	63,0
80	390	0,39	21,4	61,5
90	401	0,4	21,7	63,6
94	405	0,4	21,9	63,4

PZ400-T50				
Stáří	Smrštění	Smrštění	Telota	rel. Vlhkost
[den]	[$\mu\epsilon$]	[‰]	[°C]	[%]
0	0	0,00	10,6	
0,3	0	0,00	12,9	
0,9	-79	-0,08	21,3	
1,3	-120	-0,12	21,7	51,2
1,9	-179	-0,18	24,1	54,9
3,2	-129	-0,13	20,5	63,6
4	-109	-0,11	21,2	62,4
5	-84	-0,08	21,2	62,6
6	-65	-0,07	21,4	63,8
7	-44	-0,04	21,3	62,4
20	138	0,14	21,3	62,6
22	156	0,16	21,5	62,7
24	170	0,17	21,4	61,9
28	194	0,19	21,7	62,2
31	216	0,22	21,0	65,2
38	245	0,24	21,7	60,9
45	258	0,26	21,0	62,5
52	272	0,27	21,1	63,2
59	290	0,29	21,3	63,5
66	299	0,3	20,8	67,4
73	308	0,31	21,1	63,0
80	317	0,32	21,0	61,2
90	327	0,33	20,9	63,1
94	327	0,33	21,4	63,3

PZ350-D45				
Stáří	Smrštění	Smrštění	Telota	rel. Vlhkost
[den]	[$\mu\epsilon$]	[‰]	[°C]	[%]
0	0	0,00	13,3	47,1
0,1	-5	0,00	13,9	48,7

0,2	-10	-0,01	15,7	47,0
0,8	32	0,03	21,8	42,0
0,9	50	0,05	24,0	54,9
1	55	0,05	26,0	47,8
2	46	0,05	23,3	44,4
4	100	0,10	21,1	62,9
5	120	0,12	21,5	63,7
6	138	0,14	21,1	63,1
7	155	0,15	21,3	63,3
8	170	0,17	21,0	63,0
11	206	0,21	20,8	67,0
15	244	0,24	21,1	63,6
18	266	0,27	21,1	63,5
20	280	0,28	21,2	63,3
25	306	0,31	20,9	63,2
28	318	0,32	19,6	63,5

PZ350-D50				
Stáří	Smrštění	Smrštění	Telota	rel. Vlhkost
[den]	[$\mu\epsilon$]	[‰]	[°C]	[%]
0	0	0,00	10,1	47,5
0,1	-7	-0,01	11,6	48,2
0,2	-17	-0,02	14,3	50,1
0,8	-40	-0,04	23,3	41,5
0,9	-51	-0,05	24,4	55,2
1	-65	-0,06	25,6	50,3
2	-91	-0,09	22,8	44,2
4	-42	-0,04	21,0	63,2
5	-25	-0,03	21,5	63,4
6	-7	-0,01	21,1	63,3
7	9	0,01	21,2	63,3
8	24	0,02	21,3	63,6
11	63	0,06	20,8	66,2
15	106	0,11	21,2	63,6
18	132	0,13	21,0	63,6
20	148	0,15	21,2	63,2
25	180	0,18	20,9	63,3
28	194	0,19	19,5	65,1

PZ350-D55				
Stáří	Smrštění	Smrštění	Telota	rel. Vlhkost
[den]	[$\mu\epsilon$]	[‰]	[°C]	[%]
0	0	0,00	12,3	47,3
0,1	-8	-0,01	13,8	49,3

0,2	-22	-0,02	16,4	48,4
0,8	-96	-0,10	25,0	41,8
0,9	-109	-0,11	25,4	54,8
1	-121	-0,12	25,7	47,5
2	-138	-0,14	22,6	43,5
4	-90	-0,09	21,1	62,9
5	-74	-0,07	21,5	63,5
6	-56	-0,06	21,1	63,1
7	-38	-0,04	21,2	63,2
8	-21	-0,02	21,0	63,5
11	25	0,02	20,8	69,2
15	76	0,08	21,2	63,5
18	106	0,11	21,1	63,4
20	124	0,12	21,3	63,2
25	159	0,16	21,1	63,4
28	175	0,18	19,6	64,2