

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

**Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu  
s ohledem na zpracování**

**Selected mechanical properties of alkali-activated concrete  
with regard to processing**

Bakalářská práce

Student:

Jiří Němec

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D.

Ostrava 2023

# Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Němec**

Studijní program: B0732A260001 Stavební inženýrství

Specializace: S07 Stavební hmoty a diagnostika staveb

Téma: **Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s  
ohledem na zpracování**  
**Selected mechanical properties of alkali-activated concrete with regard  
to processing**

Jazyk vypracování: čeština

## Zásady pro vypracování:

Zpracujte bakalářskou práci na téma mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu, kde zhodnotíte přístupy k volbě složení a možnosti testování. Experimentální program bude zahrnovat variantní řešení návrhu receptury s ohledem na výrobu a zpracování směsi. U zkoušek se zaměřte na vyhodnocení pevnosti v tlaku a tříbodové ohybové zkoušky. V rámci práce se provede ucelené vyhodnocení zkoušek se zhodnocením výhod a nevýhod. Zaměřte se také na stanovení vhodného času na odbednění a vývoj nárůstu pevnosti v tlaku v čase pro vybranou směs. V rámci experimentálního programu využijte také nedestruktivního testování, např. pro stanovení dynamického modulu pružnosti.

## Seznam doporučené odborné literatury:

1. Provis, J.L., Palomo, A. and Shi, C. (2015) Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 78 (Part A). pp. 110-125.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013>
2. Model Code 2010 – Final Draft, fib, Bulletin No 65 and 66. 1-2. 2012.
3. RILEM (2011): About Rilem [Online], url: <https://www.rilem.net> [Accessed on 4 May 2011].
4. <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18218-nelinearni-analyza-zelezobetonoveho-nosniku-bez-smykove-vyztuze-na-zaklade-charakteristik-betonu>
5. Sucharda, O., Bilek, V., Mateckova, P., Pazdera, L., AAM for Structure Beams and Analysis of Beam without Shear Reinforcement. In *Solid State Phenomena*, Vol. 292, pp. 3–8.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2022

Datum odevzdání: 02.05.2023

Garant studijního programu: prof. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.

V IS EDISON zadáno: 09.11.2022 07:03:14

Bakalářská práce  
Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

**Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:.....

.....

podpis studenta

**Prohlašuji, že:**

- Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Autorský zákon zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnutou licenci k jejímu využití - mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby.

V Ostravě:.....

.....

Podpis studenta

## **Poděkování**

Touto cestou chci vyjádřit poděkování panu doc. Ing. Bc. Oldřichu Suchardovi, Ph.D. za cenné rady, odbornou pomoc a dohled při vypracování teoretické části a zejména pak za pomoc při výrobě a testování vzorků pro experimentální část. Dále chci vyjádřit poděkování Ing. Radce Hédlové, Ing. Davidu Bujdošovi, Ing. Janu Jeřábkoví a Ing. Radoslavu Gandelovi za pomoc s přípravou a testováním vzorků a za jejich odborné rady. Andree Pěčnickové a Jaromíru Vařákovi bych také rád poděkoval za asistenci při výrobě vzorků a jejich testování. Poslední poděkování patří mojí rodině a přítelkyni za podporu po celou dobu studia.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se věnuje mechanickým a trvanlivostním vlastnostem alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování. Práce se skládá ze dvou částí, první část je teoretická a druhá je experimentální. V teoretické části je popsáno, co jsou to alkalicky aktivované materiály, jaké suroviny se používají pro jejich výrobu, jaké chemické reakce u nich vznikají, kde se tyto materiály používají a jaké mají vlastnosti. Dále jsou zde popsány zkušební metody používané pro zjištění vlastností ztvrdlého betonu. V experimentální části jsou srovnány tři různé alkalicky aktivované materiály, a to v pevnosti v tlaku, v pevnosti v příčném tahu a v pevnosti v tahu za ohybu. U těchto materiálů je dále porovnávána jejich trvanlivost, a to konkrétně mrazuvzdornost, odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám a odolnost proti zvýšené teplotě.

## **Klíčová slova**

Alkalicky aktivovaný materiál, geopolymery, beton, mechanické vlastnosti, trvanlivost

## **Annotation**

This bachelor's thesis focuses on the mechanical and durability properties of alkali-activated concrete with respect to processing. The thesis consists of two parts, the first part is theoretical, and the second part is experimental. In the theoretical part, it is described what are alkali-activated materials, what raw materials are used for their production, what chemical reactions occur in them, where these materials are used and what their properties are. The test methods used to determine the properties of hardened concrete are also described. In the experimental part, three different alkali-activated materials are compared in terms of compressive strength, transverse tensile strength, and flexural tensile strength. The durability of these materials is further compared, specifically their frost resistance, resistance to chemical thawing agents and resistance to elevated temperature.

## **Key words**

Alkali-activated material, geopolymers, concrete, mechanical properties, durability

### Seznam použitých zkratk

AAM	alkalicky aktivovaný materiál
AAM+L	alkalicky aktivovaný materiál s liaporem
AAM+P	alkalicky aktivovaný materiál s popínkem
CHRL	chemické rozmrazovací látky
Např.	například
Ozn.	Označení
UZ	ultrazvuk

### Seznam použitých veličin

$A_c$	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha
$E_{cu}$	[GPa]	Dynamický modul pružnosti
$F$	[N]	Síla
$f_{ck}$	[MPa]	Pevnost betonu v tlaku
$f_{ct}$	[MPa]	Pevnost betonu v příčném tahu
$f_{ctm}$	[MPa]	Pevnost betonu v tahu za ohybu
$k$	[-]	Součinitel rozměrnosti prostředí
$l$	[mm]	Délka
$m$	[kg]	Hmotnost
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost
$\rho_a$	[g/m <sup>2</sup> ]	Hmotnost odpadu na jednotku plochy
$T$	[μs]	Čas
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem
$v_L$	[km/s]	Rychlost UZ impulzu



## Obsah

1. Úvod.....	1
2. Historie alkalicky aktivovaných materiálů .....	2
3. Podstata alkalicky aktivovaných materiálů.....	3
4. Suroviny pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů.....	3
4.1. Prášková pojiva (nebo Reaktivní pevné složky).....	3
4.1.1. Popílek.....	3
4.1.2. Vysokopevní struska .....	4
4.1.3. Metakaolin.....	5
4.2. Alkalické aktivátory .....	7
4.2.1. Roztoky alkalických hydroxidů .....	7
4.2.2. Roztoky alkalických křemičitanů.....	9
4.2.3. Další alkalické aktivátory.....	10
5. Alkalicky aktivovaný beton .....	10
6. Zkoušky prováděné na ztvrdlém betonu .....	11
6.1. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.....	11
6.2. Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu.....	11
6.3. Pevnost v tahu za ohybu .....	12
6.4. Pevnost v příčném tahu.....	13
6.5. Dynamický modul pružnosti ztvrdlého betonu .....	14
6.6. Mrazuvzdornost betonu .....	15
6.7. Odolnost betonu proti působení chemických rozmrazovacích látek.....	15
7. Vlastnosti ztvrdlého alkalicky aktivovaného betonu .....	18
7.1. Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého alkalicky aktivovaného betonu .....	18
7.1.1. Alkalicky aktivovaný materiál .....	19
7.1.2. Alkalicky aktivovaný materiál + popílek.....	20
7.1.3. Alkalicky aktivovaný materiál + liapor.....	22

## Bakalářská práce

### Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

7.2.	Stanovení pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu.....	24
7.2.1.	Odbedňovací pevnosti v tlaku polovin trámů.....	24
7.2.2.	14denní pevnosti v tlaku polovin trámů.....	26
7.2.3.	28denní pevnosti v tlaku polovin trámů.....	27
7.2.4.	28denní pevnosti v tlaku krychlí o hraně 100 mm.....	29
7.2.5.	28denní pevnosti v tlaku krychlí o hraně 150 mm.....	30
7.2.6.	Vývoj pevnosti v tlaku polovin trámů.....	32
7.3.	Stanovení pevnosti v tahu ohybem ztvrdlého betonu.....	34
7.3.1.	Odbedňovací pevnosti v tahu ohybem.....	34
7.3.2.	14denní pevnosti v tahu ohybem.....	36
7.3.3.	28denní pevnosti v tahu ohybem.....	37
7.3.4.	Vývoj pevnosti v tahu ohybem.....	38
7.4.	Stanovení pevnosti v příčném tahu ztvrdlého betonu.....	41
7.5.	Dynamický modul pružnosti.....	43
7.6.	Vliv zvýšené teploty na vlastnosti ztvrdlého betonu.....	45
7.6.1.	Vliv zvýšené teploty na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu.....	46
7.6.2.	Vliv zvýšené teploty na rychlost prostupu ultrazvukového impulzu.....	48
7.6.3.	Vliv zvýšené teploty na pevnost v tahu ohybem.....	49
7.6.4.	Vliv zvýšené teploty na pevnost v tlaku.....	51
7.7.	Mrazuvzdornost betonu.....	53
7.7.1.	Vliv zkoušky mrazuvzdornosti na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu.....	54
7.7.2.	Vliv zkoušky mrazuvzdornosti na rychlost prostupu ultrazvukového impulzu ztvrdlým betonem.....	57
7.7.3.	Vliv zkoušky mrazuvzdornosti na pevnost v tahu ohybem.....	59
7.7.4.	Vliv zkoušky mrazuvzdornosti na pevnost v tlaku.....	61
7.8.	Odolnost povrchu betonu proti působení chemických rozmrazovacích látek.....	63
7.8.1.	AAM.....	63

## Bakalářská práce

### Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

7.8.2.	AAM+P .....	64
7.8.3.	AAM+L.....	65
8.	Vlastnosti čerstvé alkalicky aktivované betonové směsi .....	67
9.	Závěr .....	69
10.	Seznam zdrojů.....	71
11.	Seznam obrázků .....	73
12.	Seznam grafů .....	74
13.	Seznam tabulek .....	75

## 1. Úvod

Alkalicky aktivované materiály jsou relativně novým stavebním materiálem v porovnání s klasickým betonem, dřevem nebo keramickými materiály. První novodobé využití se datuje k roku 1940, kdy byl použit materiál s názvem Purdon (využití metalurgické strusky s vysokým obsahem vápníku) [1]. Pojivovou složku alkalicky aktivovaných materiálů tvoří aluminosilikáty v kombinaci s vhodným alkalickým aktivátorem. Dnes se pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů nejčastěji používají vysokopecní strusky, ulétávě popílky vzniklé spalováním antracitu nebo černého uhlí, popřípadě i metakaoliny. Jako alkalické aktivátory pak používáme nejčastěji alkalické silikáty, hydroxidy a karbonáty. Výzkum těchto materiálů je zajímavý proto, že beton je v současnosti nejpoužívanější stavební materiál a při jeho výrobě vzniká velké množství  $\text{CO}_2$ , který způsobuje globální oteplování. Alkalicky aktivované materiály oproti betonu z portlandského cementu nezanechávají tak velkou uhlíkovou stopu, protože velkou část surovin tvoří odpadní materiál nebo druhotné suroviny. Zároveň je pro některé aplikace použití těchto materiálů vhodnější než použití klasických betonů.

Téma této práce jsem si vybral, protože se zajímám o ekologii, udržitelný rozvoj stavebnictví, obnovitelné zdroje, recyklaci a také o vývoj materiálů na bázi odpadů. Alkalicky aktivované materiály se mi jeví jako relativně neprobádané a pro širokou veřejnost téměř neznámé. Teoretická část této práce se věnuje historii alkalicky aktivovaných materiálů, tomu, jaké vlastnosti většinou mají tyto materiály, a jak se liší na základě použitých surovin. Také je věnována pozornost chemismu těchto materiálů, a jaký má vliv na trvanlivost a mechanické vlastnosti těchto materiálů. V experimentální části bude popsána receptura tří druhů alkalicky aktivovaných betonů. Následně zde budou popsány zkušební tělesa z těchto tří materiálů. Na vyrobených tělesech budou zkoumány mechanické a trvanlivostní vlastnosti jednotlivých materiálů a následně budou tyto vlastnosti porovnány mezi jednotlivými materiály.

Znalost těchto vlastností nám pomůže prohloubit znalosti o alkalicky aktivovaných materiálech a pomůže nám upřesnit, na které vlastnosti se zaměřit při dalším zkoumání těchto materiálů. Také nám tyto znalosti mohou napomoci při hledání vhodného využití pro tyto materiály.

## I. Teoretická část

### 2. Historie alkalicky aktivovaných materiálů

Novodobé výzkumy spekulují o tom, že obdobné materiály byly použity již před rokem 1940. Konkrétně se jejich první použití datuje už do starověku, kdy měly být tyto materiály použity při výstavbě pyramid. S touto teorií přišel poprvé Joseph Davidovits v roce 1974. Řekl, že pyramidy jsou postaveny z umělého kamene a nazval tento materiál geopolymery [2]. Také se spekuluje, že alkalicky aktivované materiály používali i civilizace ve Střední a Jižní Americe a také, že byli použity u staveb starověkého Říma. Na základě toho, co víme o vyspělosti těchto civilizací, jejich zeměpisné poloze, ekonomické situaci a na základě toho co bylo zjištěno z chemických analýz těchto staveb lze předpokládat, že tyto civilizace mohli být schopné takovéto materiály vyrobit [3].

Novodobá historie alkalicky aktivovaných materiálů sahá do roku 1934, kdy bylo zaznamenáno jedno z prvních použití alkalicky aktivovaného materiálu na bázi kaolínu a uhličitanu sodného při teplotě 150 °C v keramických závodech Olsen. V roce 1937 představil svoji práci Kühn a následně v roce 1940 Purdon, oba se zabývali účinky roztoků alkalických hydroxidů (sodný a draselný) na mletou vysokopecní strusku [3], [4]. V 50. letech se alkalickou aktivací významněji zabýval profesor Gluchovskij. V roce 1959 vydal knihu s názvem „Gruntosilikáty“, kde nazval betony na bázi alkalické aktivace strusky jako „gruntocementy“ [3].

V 60. letech byla na Ukrajině postavena první stavba z gruntosilikátových bloků [3], [5]. V roce 1978 jako první použil Davidovits pojem geopolymery pro alkalicky aktivované materiály na bázi metakaolínu, dnes bývají tímto pojmem označovány všechny alkalicky aktivované materiály bez ohledu na použité suroviny. V roce 1989 byla postavena dvacetiposchodová stavba v ruském městě Lipeck ze struskoalkalického betonu bez použití portlandského cementu [3].

### 3. Podstata alkalicky aktivovaných materiálů

V dnešní době je pojmem alkalicky aktivovaný materiál (zkráceně geopolymery) myšlen materiál, který vzniknul smísením pojiva, které je buď latentně hydraulické nebo pucolánové. Takovéto pojivo po smísení s vodou projeví svoji hydraulicitu pouze tehdy, je-li do této směsi přidán i alkalický aktivátor, který nastartuje reakci, které se říká alkalická aktivace [3].

Alkalická aktivace je chemická reakce látky s vysokým obsahem alkálií (alkalického roztoku) s reaktivním aluminosilikátovým práškem. Smícháním těchto složek dojde k vytvoření neuspořádané alkalicko-aluminosilikátové gelové fáze, známé jako geopolymerní gelové fáze pojiva. Tato fáze se vyznačuje tím, že jsou v ní uloženy nezreagované pevné částice prekurzorů a síť pórů gelu obsahuje vodu, která byla použita při míchání prekurzorů (obvykle dodávanou prostřednictvím alkalického „aktivačního roztoku“). To, že voda netvoří nedílnou součást chemické struktury geopolymery jako je tomu např. u klasických cementových tmelů, je příčinou různých výhod i nevýhod. Základní kostra gelu je tvořená vysoce propojenou trojrozměrnou sítí hlinitanových a křemičitanových tetraedrů [6].

### 4. Suroviny pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů

#### 4.1. Prášková pojiva (nebo Reaktivní pevné složky)

##### 4.1.1. Popílek

Jedná se o anorganické práškové neshořelé zbytky topiv, kde většinu obsahu tvoří zbytky jílu a písků obsažených v uhlí. Vznikají jako odpad při spalování hnědého a černého uhlí. Popílký mají sypanou hmotnost 800-1200 kg/m<sup>3</sup>, objemová hmotnost 2000 - 2500 kg/m<sup>3</sup> [7]. Popílek tvoří zpravidla malé sférické skleněné částice, které vzniknou roztavením v peci a následným prudkým ochlazením, popílek ovšem obsahuje i krystalické fáze. Složení a vlastnosti popílku jsou velmi závislé na množství a druhu nečistot obsažených v uhlí před spalováním a také na způsobu spalování a hašení uhlí a na metodě, kterou je popílek zachycen, to ovlivňuje například velikost zrn [6].

Mechanismy rozpouštění uhelného popílku při syntéze anorganických polymerů a vliv těchto mechanismů na výsledný zpevněný materiál jsou dosud nejasné. Je to z části způsobeno tím, že výzkumy se většinou provádí na jednom vzorku popílku, a ne na různých popílcích. Při alkalické aktivaci popílku vznikají alkalické aluminosilikátové gely [6].

Podle obsahu vápníku dělíme popílky na dvě třídy. Popílky třídy F obsahující méně vápníku se většinou používají pro výrobu geopolymérů, protože popílky třídy C, které obsahují více vápníku, mohou začnou tuhnout velmi rychle [6].

Fluidní popílek získáváme spalováním jemně mletého černého uhlí v kotli se suchým dnem a následným zachycením pomocí elektrostatického sběru, protože při spalování tímto způsobem odchází přibližně 80% veškerého vyprodukovaného popela se spalinami z kotle. Popílek vzniklý tímto způsobem se od ostatních elektrárenských popílků liší velikostí částic (fluidní popílky mají menší velikost zrn), složením (obsahuje větší množství CaO), z těchto důvodů se také liší ve svém využití [6], [7].

Částice uhlí jsou unášeny proudem plynu a jsou vystaveny vysokým teplotám jen krátce, proto je zde jen malá šance pro interakci mezi jednotlivými úlomky. Znamená to také to, že minerální látky obsažené v částicích jsou také krátce vystaveny vysokým teplotám, které mohou způsobit fyzikální a chemickou přeměnu minerálů [6].

Výhodami popílku jsou rozložení velikosti částic, chemické složení, obecně kulovitý tvar částic a nízká cena. Z těchto důvodů je popílek velmi vhodný jako přísada do cementu.

Vliv popílku na beton:

- Zlepšuje zpracovatelnost čerstvé směsi svými sférickými částicemi a také snižuje potřebné množství vody a tím se snižuje separace vody (cementového mléka) z betonu tzv. krvácení betonu.
- V důsledku snížení vodního součinitele také zvyšuje pevnost betonu v tlaku.
- Snižuje náklady na výrobu, protože popílek je levnější než cement.
- Zlepšuje trvanlivost tím, že zvyšuje objem hydrátu vápenatokřemičitého pojiva, které vyplňuje póry a dutiny a beton je tak méně propustný (zlepšení odolnosti proti tlakové vodě), dochází k tomu při hydrataci díky pucolánové reakci s hydroxidem vápenatým [6].

#### 4.1.2. Vysokopecní struska

Vzniká při odpichu vysoké pece jako vedlejší produkt výroby železa ve vysokých pecích. Při výrobě železa na sebe struska váže veškeré neželezné části železné rudy [8]. Dá se obecně popsat jako směs slabě krystalických fází složených, která připomíná svým složením gehlenit, akermanit a také depolymerizovaná skla křemičitanu vápenatého. Reaktivita vysokopecní strusky je z části ovlivněna stupněm depolymerizace.

Ve strusce je obsaženo více než dostatečné množství vápence k vyvážení hliníku a přebytek přispívá k depolymerizaci skelné sítě (složení nadměrně vyváženého vápenato - hliníkokřemičitého rámce). Tento přebytek vápníku je zapříčiněn způsobem vzniku strusky, ta totiž vzniká jako vedlejší produkt výroby železa ve vysoké peci při teplotě přibližně 1600°C jako kapalina, která se následně hasí. V porovnání s popílky mají strusky několika násobně vyšší obsah vápence [6].

Pro geopolymery jsou u strusek nejdůležitější kationty, které tvoří skelnou síť  $Al^{3+}$  a  $Si^{4+}$ , dvojmocné  $Ca^{2+}$  a  $Mg^{2+}$ , které působí jako modifikátory sítě spolu s přítomnými alkáliemi. Pro využití strusky ať už jako příměsí do cementu tak i pro výrobu geopolimerů je důležité, aby struska z konkrétní vysoké pece měla relativně ustálené fyzikální a mechanické vlastnosti. Strusky z různých pecí a různých rud mají také rozdílné složení, a proto i fyzikální a chemické vlastnosti [6].

Reaktivita strusek v alkalicky aktivovaných materiálech je poměrně dobře známá díky práci Shi et al. (2006) a dalších. Ohledně specifické síťové struktury fází přítomných v každém konkrétním typu strusky a jejich vlivu na průběh alkalicky aktivačních reakcí je potřeba zjistit stále mnoho nového. Také bylo zjištěno, že při reakcích strusky dominují těmto reakcím malé částice. Částice nad 20  $\mu m$  reagují jen pomalu, ale částice pod 2  $\mu m$  reagují do 24 hodin jak při použití ve směsných cementech, tak v alkalicky aktivovaných systémech. Pečlivou kontrolu distribuce velikosti částic strusky lze využít pro řízení vývoje pevnosti, alkalicky aktivovaných systémů. Alkalická aktivace strusky má za následek vznik C-S-H gelů [6].

Vysoko pecní strusky patří dnes k nejvíce využívanému pojivu při výrobě alkalicky aktivovaných systému, výsledné systémy totiž dosahují nejvyšších pevností, v porovnání se systémy, které využívají jako pojivo popílky nebo metakaoliny. Ovšem oproti popílkům se vysokopecní struska postupně začíná stávat nedostatkovou surovinou.

#### 4.1.3. Metakaolin

Jedná se o pucolán a poměrně složitý materiál. Metakaolin vzniká řízeným výpalem mletých kaolinů a kaolinitických jíílů při teplotách 500–800°C podle čistoty a krystalinity vstupní suroviny. Výpal se provádí z důvodu odstranění hydroxylových skupin z vrstevnaté struktury kaolinitu (dehydroxylace), to znamená, že i když se rentgenové analýze jeví struktura metakaolinu jeví jako neuspořádaná, tak na určitém stupni musí zůstat uspořádaná, což dokazuje i elektronová difrakce. Dehydroxylace a jí vyvolané napětí ve vazebné síti je obecně uznávána jako klíč k reaktivitě metakaolinu [6].



Oproti popílku a strusce má tedy metakaolin nevýhodu v tom, že nevzniká jako odpad nebo vedlejší produkt při výrobě jiné suroviny a jeho samotná výroba má dopad na životní prostředí produkcí CO<sub>2</sub>. Pro výrobu geopolymérů na bázi metakaolinu je také za potřeby většího množství vody než pro výrobu geopolymérů na bázi strusky a popílku, což je způsobeno tím, že částice metakaolinu mají deskovitý tvar a také tím, že měrný povrch metakaolinu se pohybuje přibližně mezi hodnotami 91000 – 183000 cm<sup>2</sup>/g, v závislosti na způsobu výroby a vstupním materiálu. Zatímco měrný povrch popílku je přibližně 2150 – 3960 cm<sup>2</sup>/g (fluidní přibližně až 9050 cm<sup>2</sup>/g) a vysokopeční strusky přibližně 3050 – 6000 cm<sup>2</sup>/g [6], [9], [10], [11], [12]. Tento problém následně ovlivňuje i to, jak probíhá tvrdnutí alkalicky aktivované směsi na bázi metakaolinu. Při vysychání ztvrdlého materiálu totiž dochází k velkým deformacím vlivem smrštění a následnému vzniku smršťovacích trhlin. Další nevýhodou použití metakaolinu pro výrobu alkalicky aktivovaných systémů je vysoká pravděpodobnost vzniku výkvětů při přidání většího než potřebného množství alkalického roztoku do záměsi. Metakaolin totiž oproti popílku obsahuje větší množství alkálií [6].

I přes tyto nevýhody má metakaolin své využití v alkalicky aktivovaných systémech. Vzhledem k uzavřenosti struktury geopolymérů na bázi metakaolinu mají tyto materiály výbornou odolnost proti tlakové vodě, ale také proti působení agresivního prostředí síranů, mořské vody a obecně kyselin. Dále mají dobrou odolnost proti alkalicko-křemičité reakci, korozi oceli a dobrou požární odolnost. Výhody geopolymérů jsou více rozvedeny v dalších kapitolách. Metakaolin stejně jako struska a popílek nachází své využití také jako přísada do cementu (pucolánová přísada) nebo se dá aktivovat přímo smícháním s vápnem [6].

Jedná se pravděpodobně o chemicky nejjednodušší verzi alkalicky aktivovaného systému. Alkalickou aktivací metakaolinu vzniká jeden nebo více různých zeolitů za mírně zvýšených teplot. Reakcí alkalického roztoku s metakaolinem dochází k uvolnění křemičitanů a hlinitanů do roztoku. Dále dochází k reakci mezi malými rozpuštěnými druhy a křemičitany obsaženými v aktivačním roztoku za vzniku hlinitokřemičtanových oligomerů. Rozpuštění hlinitanu trvá až do té doby, než je jeho koncentrace v roztoku dostatečně velká na to, aby destabilizovala křemičitanový roztok a následně začalo srážení rozpuštěných druhů za vzniku gelu. „*Geopolymerní gel narůstá do bodu, kdy reagující suspenze tuhne.*“ [6] Doba počátku tuhnutí závisí na složení metakaolinu a aktivátoru, na okolní teplotě a také na tom, zda směs obsahuje kontaminanty. Proto může tuhnutí být téměř okamžité, ale může trvat i řadu dní [6].

Stejně jako u klasických cementových gelů probíhají reakce i po skončení tuhnutí, což nám stejně jako například u betonu dokazuje nárůst pevností způsobený růstem zeolitických krystalů. Při alkalické aktivaci metakaolinu vznikají alkalické aluminosilikátové gely [6].

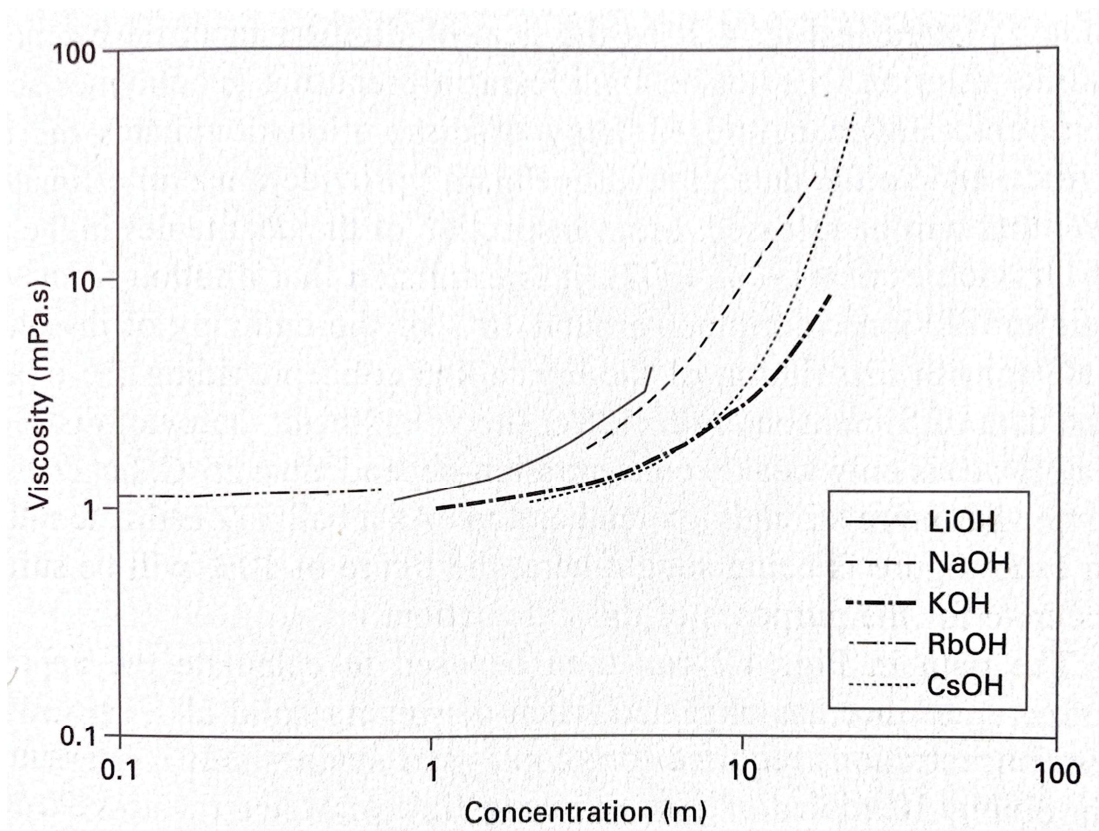
Vzhledem k tomu, že vzniklý gel neobsahuje dostatek vázaných hydroxylů, tak obsažená voda je většinou lokalizována v pórech. Vyskytuje se od nanopórů až po makropóry, a to v takovém poměru, který je závislý na chemickém složení a tepelné historii vzorku. Tato vlastnost patří k jednomu z hlavních rozdílů mezi hlinitokřemičitanovým geopolymérem a hydratovanými křemičitany vápenatými, které jsou základem velkého množství vazebných fází v portlandských cementových betonech. To znamená, že matrice geopolymérů nejsou na vodě závislé jako na jejich integrálně vázané složce [6], [13].

## 4.2. Alkalické aktivátory

Obecně se pro alkalickou aktivaci nejčastěji používají hydroxidové nebo křemičitanové roztoky s vysokým pH, jedná se tedy o kyseliny. Méně časté je pak využití roztoků uhličitanů nebo síranů a také využití hlinitanu sodného [6].

### 4.2.1. Roztoky alkalických hydroxidů

Nejčastěji se používají roztoky hydroxidu sodného a draselného, mezi ty méně používané patří hydroxid lithný, hydroxid rubidný a hydroxid cesný. Roztoky hydroxidů používané pro aktivaci mají vysokou korozivitu. Jak můžeme vidět na Obrázku 1 s narůstající koncentrací roztoku se také zvyšuje viskozita alkalického aktivátoru a je také očividné, že nárůst koncentrace má podobný vliv na všechny na Obrázku 1 uvedené roztoky. Údaje uvedené na Obrázku 1 byli zjištěny při teplotě 25°C. Při alkalické aktivaci pomocí hydroxidů dochází k vývinu tepla podobně jako při hydrataci cementu k vývinu tzv. hydratačního tepla. K výraznému zvýšení teploty dojde už při samotné přípravě roztoku hydroxidu, a to může být problematické. Toto zvýšení teploty ve vysoce žíravém roztoku je nutné sledovat a brát na něj zřetel, pokud se hydroxidové roztoky z pevných prekurzorů mají běžně připravovat v průmyslové výrobě [6], [13]. Hydroxid cesný a rubidný se v alkalické aktivaci v podstatě nepoužívají a ani jejich výzkum není příliš obsáhlý, a to především proto, že oba tyto hydroxidy jsou poměrně vzácné, a tudíž i drahé. Hydroxid lithný se většinou používá spíše jako urychlovač alkalické aktivace. Mimo to nemá hydroxid lithný v geopolymerech v podstatě využití, především kvůli tomu, že jeho rozpustnost (5,4 m) je na spodní hranici užitečného rozsahu alkality pro hydroxidové alkalické aktivátory [6].



Obrázek 1: Vliv koncentrace roztoku na viskozitu [6]

Hydroxid sodný (NaOH) je nejpoužívanějším hydroxidovým aktivátorem vůbec, protože je velmi rozšířený a díky tomu také cenově dostupný. Díky své nízké viskozitě je velmi využíván pro aktivaci popílků a metakaolinů. Dobře rozpouští pevná pojiva při teplotě 25°C (rozpustnost 28,57 m), ale při poklesu teploty pod 0°C se tato rozpustnost zhoršuje na 10,73m [6].

Hydroxid draselný (KOH) má rozpustnost při 25°C přibližně 21 m, klesající teplota nemá na rozpustnost takový vliv jako je tomu u hydroxidu sodného. Jeho fázový diagram je také jednodušší, než je tomu u NaOH, a proto je nepravděpodobné, že by při běžných podmínkách došlo k nějakému problému při aktivaci nebo tuhnutí. Výhodou je také to, že ke krystalizaci zeolitů při kombinaci KOH s metakaolinem dochází pomaleji než při použití NaOH k aktivaci metakaolinu. Při použití KOH pro aktivaci popílku je tato krystalizace dokonce výrazně potlačena oproti aktivaci popílku za pomoci NaOH [6], [13].

Nevýhodou alkalických hydroxidů je jejich vysoká korozivita, která je problém, pokud bychom chtěli provozovat výrobu velkých objemů podobně jako je tomu u výroby betonu. Pro takovou výrobu by bylo za potřebí velmi specializovaného zařízení [6], [13].

Krystalizace zeolitů souvisí také se snižováním pevnosti, avšak není zatím jasné, zda se jedná o přímý účinek. U geopolymérů s příliš vysokou koncentrací roztoků hydroxidů dochází ke tvorbě bílých krystalů uhličitanu sodného nebo hydrogenuhličitanu. Tento jev se nazývá eflorescence a způsobuje ho to, jak reaguje přebytek alkálií s atmosférickým  $\text{CO}_2$ . Eflorescence působí negativně na estetiku, ale nemusí vždy působit negativně i na mechanické vlastnosti materiálu. Výroba hydroxidu draselného i sodného je také příčinou produkce  $\text{CO}_2$ . Naopak výhodou oproti křemičitanům je jejich viskozita [6], [13].

#### 4.2.2. Roztoky alkalických křemičitanů

Nejpoužívanějšími křemičitany pro alkalickou aktivaci jsou bezpochyby křemičitany draselné a křemičitany sodné. Křemičitany draselné mají mnohem širší rozsah stability homogenního vodného roztoku a ke srážení jejich hydratovaných fází dochází méně často, než je tomu u křemičitanů sodných. Křemičitany lithia nejsou tak často používané kvůli jejich horší rozpustnosti a křemičitany rubidia a cesia nebyly ani rozsáhle studovány. Křemičitany draselné a sodné se od těch lithných liší také tím, že jsou většinou připravovány přímým rozpouštěním skel vhodného složení ve vodě. Oproti tomu křemičitany lithné jsou připravovány rozpouštěním amorfního oxidu křemičitého ve vodném roztoku  $\text{LiOH}$ . Křemičité alkalické roztoky mají většinou pH 11-12. Jejich výhodou oproti hydroxidům je pufrovací efekt, který poskytuje pohotový zdroj bazických druhů. Díky tomuto efektu zvládnou poskytovat větší míru alkality než hydroxidové alkalické roztoky při stejném pH [6].

U roztoků křemičitanů draselných i sodných jejich viskozita velmi závisí na složení, a to konkrétně na obsahu oxidu křemičitého. Při jeho vyšším obsahu viskozita dramaticky roste. Výrazně nižší viskozitu mají roztoky křemičitanů draselných oproti roztokům křemičitanů sodných, čehož můžeme využít, pokud chceme dosáhnout větší tekutosti čerstvé směsi. Možným problémem, ke kterému může dojít při použití křemičitanu sodného je, že se výsledná směs lepí na míchací zařízení. Dalším úskalím použití roztoků křemičitanu sodného může být vliv teploty na jejich viskozitu, která se s rostoucí teplotou snižuje. Například při zahřátí z  $20^\circ\text{C}$  na  $40^\circ\text{C}$  se viskozita sníží přibližně osmkrát. Zahřívání se ovšem nedá považovat za spolehlivý způsob, jak zajistit nebo urychlit rozpouštění pevných prekurzorů při přípravě aktivátoru. Například při rozpouštění některých fází metakřemičitanu sodného začíná jejich rozpustnost s rostoucí teplotou klesat. Proto je důležité věnovat větší opatrnost manipulaci a skladování křemičitanů sodných (např. delší dobu před využitím), protože při nevhodné manipulaci nebo skladování by mohlo dojít k neočekávanému nebo nepříznivému vlivu na výsledné vlastnosti [6], [13].

Stejně jako alkalické hydroxidy potřebují pro svoji výrobu množství energie což sebou nese i produkci  $\text{CO}_2$ , ovšem v porovnání s množstvím  $\text{CO}_2$  vyprodukovaným výrobou portlandského cementu je toto množství na tunu pojiva rozhodně menší, a to i proto, že aktivátoru není potřeba pro tuto výrobu tolik kolik cementu [13].

#### 4.2.3. Další alkalické aktivátory

V posledních desetiletích se provádělo několik výzkumů, které se zabývali možností použití alkalických uhličitanových roztoků jako alkalických aktivátorů pro geopolymery. Tyto aktivátory se používali zejména pro aktivaci strusek, a to zpravidla těch s vysokým obsahem vápníku. Pro alkalickou aktivaci popílku se v těchto výzkumech používali výrazně méně. Také bylo provedeno několik studií, kde byl jako aktivátor využit hlinitan sodný [6].

## 5. Alkalicky aktivovaný beton

O alkalicky aktivovaném betonu je nutné vědět, že voda nehraje žádnou roli v alkalické aktivaci a slouží jen pro zajištění zpracovatelnosti výsledné čerstvé směsi. Voda se během alkalické aktivace a následného tuhnutí a tvrdnutí uvolňuje z betonu. Toto uvolňování vody má za následek vznik nespojitých nanopórů, které zlepšují některé vlastnosti výsledného materiálu. Při výrobě AA betonu platí pro využití kameniva stejné zásady jako při výrobě betonu. Kamenivo tvoří přibližně 75-80% hmotnosti výsledné směsi. Zároveň je taky možné přidávat do AA betonu plastifikátory a superplastifikátory pro zlepšení zpracovatelnosti výsledné čerstvé směsi. Je prokázáno, že pevnost AA betonu v tlaku je závislá na poměru hmotnosti vody (součet hmotností vody obsažené v aktivátorech a vody přidané do směsi) ku hmotnosti tuhých látek (součet hmotnosti práškových pojiv a hmotnosti tuhých látek obsažených v alkalických aktivátorech). Pevnost v tlaku klesá s rostoucím poměrem hmotnosti vody ku hmotnosti tuhých látek. Pro výrobu AA betonu v míchačce platí podobné zásady jako pro výrobu betonu z portlandského cementu. U některých druhů AAM bylo dokázáno, že jejich vytvrzování v peci zvyšuje jejich pevnost v tlaku, protože napomáhá alkalické aktivaci [6], [13].

## 6. Zkoušky prováděné na ztvrdlém betonu

### 6.1. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Objemovou hmotnost ztvrdlého betonu se může zkoušet na všech typech vzorků, tedy na trámčích, krychlích a válcích, avšak objem vzorků musí být minimálně 0,785 litrů. Pokud je největší zrna frakce kameniva  $D$  je větší než 25 mm, pak objem tělesa musí být minimálně  $50 D^3$ .  $D$  je jmenovitá největší velikost zrna hrubého kameniva v mm.

Princip zkoušky spočívá ve změření tří na sebe kolmých rozměrů zkušebního tělesa (v případě válce výšky a průměru) a vypočítání objemu tělesa, objem zapíšeme v  $m^3$ . K měření se může použít buď posuvné měřítko nebo pravítko. Dále se těleso zváží na digitální váze s přesností na 0,1 g. Zkoušené těleso musí být povrchově osušené. Následně se vypočítá objemová hmotnost pomocí vztahu (1) [14].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Kde je:

$\rho$  objemová hmotnost zkušebního tělesa [ $kg/m^3$ ];

$m$  hmotnost zkušebního tělesa [kg];

$V$  objem zkušebního tělesa [ $m^3$ ].

### 6.2. Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu

Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu se může zkoušet na zlomených trámčích (používají se poloviny trámců vzniklé po zkoušce pevnosti v tahu ohybem), krychlích a válcích. Zkušební těleso se povrchově osuší a očistí od nečistot, následně se umístí do zkušební lisu tak, že směr zatěžování je kolmý na směr plnění. Ve zkušebním lisu jsou vzorky zatěžovány rovnoměrně a konstantní rychlostí až do porušení vzorku. Zapíše se výsledná maximální síla působící na vzorek a následně se dopočítá pevnost v tlaku pomocí vztahu (2) [15]. Schéma viz Obrázek 2.

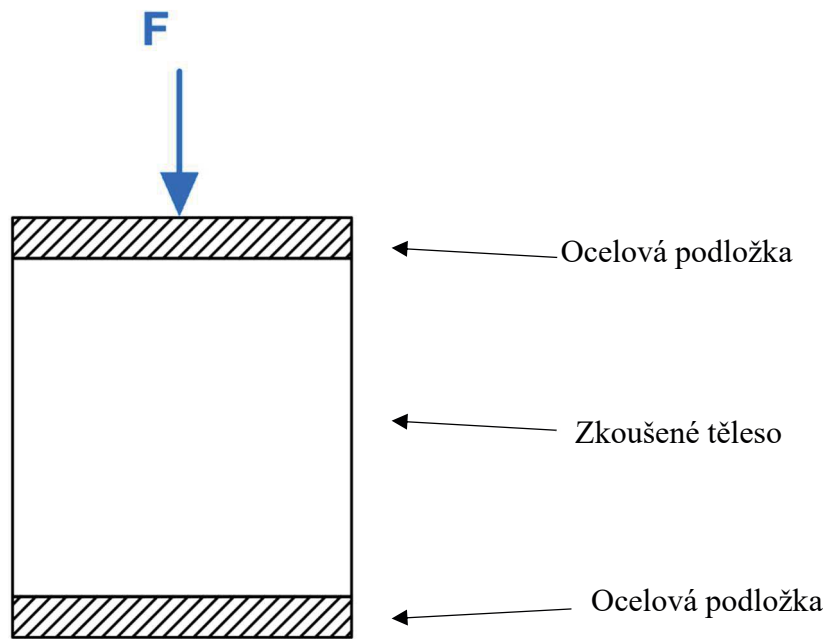
$$f_{ck} = \frac{F}{A_c} \quad (2)$$

Kde je:

$f_{ck}$  pevnost v tlaku [MPa];

$F$  maximální síla působící při porušení [N];

$A_c$  plocha tělesa, na kterou působí zatížení [ $mm^2$ ].



Obrázek 2 Schéma zkoušky pevnosti v tlaku

### 6.3. Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu ztvrdlého betonu se zkouší na trámčích. Zkušební těleso se povrchově osuší a očistí od nečistot, následně se umístí do zkušebního lisu tak, že směr zatěžování je kolmý na směr plnění. Je možné použít pro zkoušku tříbodový nebo čtyřbodový ohyb. Ve zkušebním lisu jsou vzorky zatěžovány rovnoměrně a konstantní rychlostí až do porušení vzorku. Zapiše se výsledná maximální síla působící na vzorek a následně se dopočítá pevnost v tahu za ohybu pomocí vztahu (3) [16].

$$f_{ctm} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \quad (3)$$

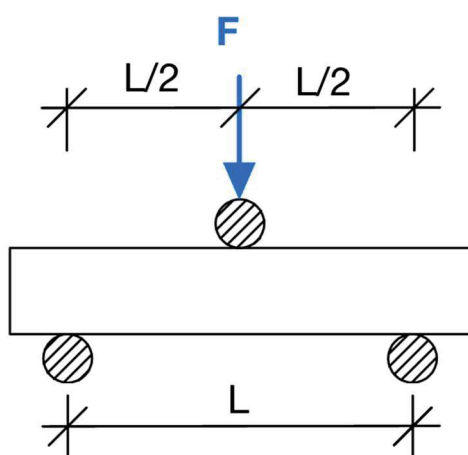
Kde je:

$f_{ctm}$  pevnost v tahu za ohybu [MPa];

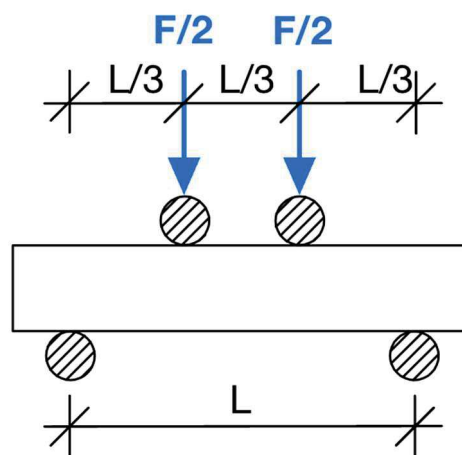
$F$  maximální síla působící při porušení [N];

$l$  vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm];

$d_1$  a  $d_2$  rozměry příčného řezu tělesa [mm].



Obrázek 3 Schéma zkoušky pevnosti v tahu tříbodovým ohybem



Obrázek 4 Schéma zkoušky pevnosti v tahu čtyřbodovým ohybem

Vyšrafované kruhy na Obrázku 3 a 4 znázorňují spodní podpěrné válečky a horní zatěžovací válečky z oceli.

#### 6.4. Pevnost v příčném tahu

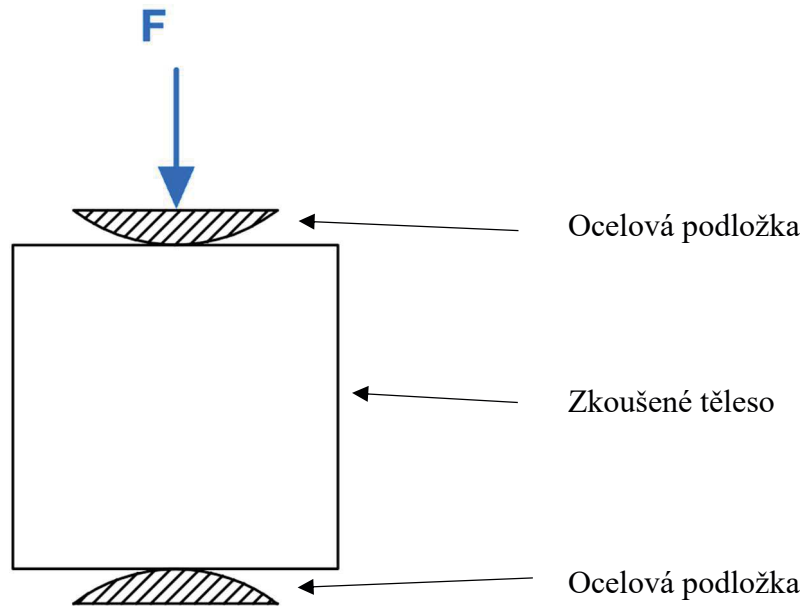
Pevnost v příčném tahu ztvrdlého betonu se obecně dle normy ČSN EN 12390-6 zkouší na zkušebních tělesech tvaru válce. Pokud jsou na zkoušených plochách nerovnosti, musí se tyto plochy obrousit do roviny. Následně se zkušební těleso povrchově osuší a očistí od nečistot a poté se umístí do zkušebního lisu tak, že směr zatěžování je rovnoběžný se směrem plnění. Při zkoušení na krychlich o délce hrany 150 mm není nutné hrany brousit, protože se těleso umísťuje do lisu tak, že směr zatěžování je kolmý na směr plnění. Pro zkoušku pevnosti v příčném tahu se používají zaoblené ocelové podložky (viz Obrázek 5). Ve zkušebním lisu jsou vzorky zatěžovány rovnoměrně a konstantní rychlostí až do porušení vzorku. Zapisuje se výsledná maximální síla působící na vzorek a následně se dopočítá pevnost v příčném tahu pomocí vztahu (4) [17].

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (4)$$

Kde je:

- $f_{ct}$  pevnost v příčném tahu [MPa];
- $F$  maximální síla působící při porušení [N];
- $L$  délka dotykové přímky tělesa [mm];
- $d$  příčný rozměr tělesa [mm].





Obrázek 5 Schéma zkoušky pevnosti v příčném tahu

### 6.5. Dynamický modul pružnosti ztvrdlého betonu

Dynamický modul pružnosti ztvrdlého betonu je možné zkoušet na všech typech vzorků, tedy na trámcích, krychlích a válcích. Princip zkoušky spočívá ve změření času šíření impulsu podélných UZ vln přes měřicí základnu a změření délky měřicí základny zkoušeného tělesa. K měření se může použít buď posuvné měřítko nebo pravítko.

Zkušební přístroj je nutné nejprve zkalibrovat pomocí kalibračního prvku, který se nachází v sadě s přístrojem. Zkoušené těleso musí být povrchově osušené. Pokud těleso obsahuje nerovnosti na měřených plochách, je nutné tyto nerovnosti odstranit pomocí obroušení. Pro lepší kvalitu měření se na obě sondy použije indiferentní gel. Většinou se změří alespoň tři hodnoty, pomocí kterých je dopočten průměrný čas šíření UZ impulsu. Z této hodnoty se následně pomocí vztahu (5) spočítá rychlost šíření UZ impulsu a z této hodnoty se pomocí vztahu (6) dopočítá dynamický modul pružnosti [18].

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (5)$$

Kde je:

$v_L$  rychlost impulsu [km/s];

$L$  délka měřicí základny [mm];

$T$  čas, který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou [ $\mu$ s].

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (6)$$

Kde je:

$E_{cu}$  dynamický modul pružnosti [GPa];

$\rho$  objemová hmotnost zkušební tělesa [ $\text{kg/m}^3$ ];

$v_L$  rychlost impulzu [km/s];

$k$  součinitel rozměrnosti prostředí (pro trámce= 1) [-].

## 6.6. Mrazuvzdornost betonu

Mrazuvzdornost betonu se zkouší na trámcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Princip zkoušky spočívá ve výpočtu součinitele mrazuvzdornosti na základě znalosti pevnosti materiálu před zkouškou a pevnosti materiálu po zkoušce.

Zkušební přístroj zajišťuje střídání cyklů zmrazování a rozmrazování. Při zmrazování je uvnitř zkušební zařízení teplota -15 až -20 °C a při rozmrazování stoupá teplota až na +20 °C. Zkoušené těleso musí být nasycené vodou před začátkem zkoušky. Jeden cyklus je složen ze 4 hodin zmrazování a 2 hodin rozmrazování. Rozmrazování se zajišťuje zatopením vodou o teplotě přibližně 20 °C. Po uplynutí požadovaného počtu cyklů jsou vzorky vyjmuty ze zmrazovacího zařízení, povrchově se osuší a odstraní se z nich nečistoty. Následně jsou vzorky změřeny ve třech na sebe kolmých směrech a zváží se. Poté jsou vzorky vyzkoušeny na pevnost v tahu ohybem a na pevnost v tlaku. Z těchto hodnot se následně spočítá součinitel mrazuvzdornosti jako podíl pevnosti po zkoušce mrazuvzdornosti ku pevnosti před zkouškou mrazuvzdornosti. Výsledná hodnota se zaokrouhlí na celá procenta [19].

## 6.7. Odolnost betonu proti působení chemických rozmrazovacích látek

Odolnost betonu proti působení CHRL se může zkoušet na trámcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, krychlich o délce hrany 150 mm nebo na válcích o průměru 150 mm. Princip zkoušky spočívá ve výpočtu celkového množství odpadu v  $\text{g/m}^2$  po určitém počtu cyklů na základě znalosti množství odpadu v g a znalosti zkoušeného povrchu v  $\text{m}^2$ .

Zkušební přístroj zajišťuje střídání cyklů zmrazování a rozmrazování. Nejnižší teplota je -15 °C a nejvyšší je +20 °C. Doba, po kterou se snižuje teplota z +20 °C na -15 °C, je 45 až 50 minut, při zvyšování teploty z -15 °C na +20 °C je tato doba stejná.

Doba, po kterou je teplota konstantní na minimální a maximální hodnotě, je přibližně 15 minut. Zkoušené těleso musí být nasycené vodou před začátkem zkoušky. Zkoušené těleso je umístěno do nekorodující misky s 3% roztokem NaCl, do roztoku je ponořeno těleso  $5 \pm 1$  mm. Po každých 25 cyklech jsou vzorky vytaženy ze zkušebního zařízení, pomocí vody jsou z nich do jejich přidělené misky očištěny odpady. Tyto misky s odpady a vodou se umístí do sušárny, kde se voda kompletně odpaří a poté se zváží samotné odpady po těchto 25 cyklech. Očištěné vzorky jsou mezitím znovu umístěny do čisté misky bez odpadů a opět je doplněn 3% roztok NaCl.

Tento postup je možné opakovat buď pod dobu předepsaného počtu cyklů, nebo do doby, než je dosaženo maximálního stupně porušení (viz Tabulka 1). Do zkoušené plochy je započítána i plocha svislých stěn, která je ponořena v roztoku. Celkové odpady na  $m^2$  se vypočítají pomocí vztahu (7). Stupeň porušení se určí pomocí Tabulky 1 [20].

$$\rho_a = \frac{\sum m}{A} \quad (7)$$

Kde je:

$\rho_a$  hmotnost odpadu na jednotku plochy [ $g/m^2$ ];

$\sum m$  součet všech hmotností odpadu od 1. do n-tého cyklu [g];

$A$  velikost zkoušeného povrchu [ $m^2$ ].

Stupeň porušení	$\rho_a$ [ $g/m^2$ ]	Charakter odpadu
1 - nenarušený	do 50	velmi jemné prachovité částice do 1 mm
2 - slabě narušený	do 500	jako u stupně 1, větší množství částic do 1 mm, podíl částic do 2 mm menší než 50% hmotnosti odpadu
3 - narušený	do 1000	jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes 500 $g/m^2$
4 - silně narušený	do 3000	jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes 500 $g/m^3$
5 - rozpadlý	přes 3000	jako u stupně 4, podíl částic nad 4 mm více jak 20% hmotnosti odpadu

Tabulka 1 Zatřídění povrchů zkušebních ploch [20]

## II. Experimentální část

Cílem praktické části této bakalářské práce bylo zjistit mechanické a trvanlivostní vlastnosti třech různých směsí alkalicky aktivovaného betonu, následně tyto vlastnosti vyhodnotit a porovnat rozdílnost mezi vlastnostmi těchto tří materiálů (receptury viz Tabulky 2, 3 a 4). Všechny zkoušky popsané v praktické části byly provedeny v laboratořích Fakulty stavební Vysoké školy Báňské – Technické univerzity Ostrava. Jednalo se o zkoušky jak na čerstvé směsi, tak na ztvrdlém betonu a byly použity destruktivní i nedestruktivní metody.

Zjišťovány byly tyto vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu:

- objemová hmotnost ztvrdlého betonu;
- pevnost v tlaku ztvrdlého betonu;
- pevnost v tahu ohybem ztvrdlého betonu;
- pevnost v příčném tahu ztvrdlého betonu;
- dynamický modul pružnosti;
- vliv zvýšené teploty na beton;
- mrazuvzdornost betonu;
- odolnost povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek;
- konzistence pomocí rozlití.

Receptury:

Alkalicky aktivovaný materiál	
Složka	m [kg]
	1 m <sup>3</sup>
Struska JMŠ 420	450
Na-vodní sklo, M <sub>s</sub> = 2,0	56,3
50% roztok KOH	42
Voda	172
Chrysoplast 760	9
0/4 Tovačov	920
4/8 Litice	670

Tabulka 2 Receptura AAM

Alkalicky aktivovaný materiál + Popílek	
Složka	m [kg]
	1 m <sup>3</sup>
Struska JMŠ 420	315
Popílek Dětmrovice	135
Na-vodní sklo, M <sub>s</sub> = 2,0	56,3
50% roztok KOH	42
Voda	172
Chrysoplast 760	9
0/4 Tovačov	920
4/8 Litice	670

Tabulka 3 Receptura AAM+P

Alkalicky aktivovaný materiál + Liapor	
Složka	m [kg]
	1 m <sup>3</sup>
Struska JMŠ 420	450
Na-vodní sklo, M <sub>s</sub> = 2,0	56,3
50% roztok KOH	42
Chrysoplast 760	9
0/4 Tovačov	920
Liapor 1/4, 500	81
4/8 Litice	670
Voda s Liaporem	150
Voda na oplach	22
Voda celkem	172

Tabulka 4 Receptura AAM+L

## 7. Vlastnosti ztvrdlého alkalicky aktivovaného betonu

### 7.1. Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého alkalicky aktivovaného betonu

Objemová hmotnost byla zkoušená na trámčích o stáří 2–3 dny, 14 dní, 28 dní, dále na krychlích o hraně 100 mm a na krychlích o hraně 150 mm. Krychle byly staré 28 dní. Pro stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého alkalicky aktivovaného betonu se použije stejný postup jako při stanovení objemové hmotnosti běžného betonu. Vzorky se den předem vytáhnou z vodní lázně a nechají se oschnout na vzduchu v prostředí laboratoře. Takto připravené vzorky se zváží na digitální váze a poté se posuvným měřítkem změří jejich tři na sebe kolmé rozměry a z těchto rozměrů je vypočten objem zkoušeného vzorku.

## Bakalářská práce

### Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

Poté se pomocí vztahu (1) vypočte objemová hmotnost. Vypočítaná hodnota se zaokrouhlí na 10 kg/m<sup>3</sup>, z těchto hodnot je vypočten průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. Výsledky z měření objemové hmotnosti jsou uvedeny v Tabulce 5 až 22.

#### 7.1.1. Alkalicky aktivovaný materiál

Odbedňovací (2 dny)					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	39,9	40,5	159,6	579,1	2250
2	39,2	40,0	159,3	567,9	2270
3	39,6	40,0	159,6	572,1	2270
4	39,9	40,4	159,5	574,4	2230

Tabulka 5 Objemová hmotnost trámčů po 2 dnech

14denní					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	40,7	40,1	160,9	575,9	2190
2	40,4	39,7	159,9	575,9	2250
3	40,5	41,6	160,1	577,0	2140
4	41,2	40,3	160,3	585,3	2200
5	40,2	40,4	160,5	598,9	2300
6	40,4	42,4	161,1	600,0	2170

Tabulka 6 Objemová hmotnost trámčů po 14 dnech

28denní					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	40,0	39,9	161,8	565,0	2190
2	40,3	40,5	160,3	569,2	2180
3	40,1	39,7	159,4	574,1	2260
4	41,4	40,2	159,7	576,1	2170
5	42,1	40,6	159,3	589,1	2160
6	39,8	40,3	160,0	577,4	2250
7	40,0	40,4	160,3	576,5	2230
8	40,1	40,6	160,2	585,7	2250
9	40,1	40,5	160,9	580,9	2220
10	40,3	40,3	160,0	562,4	2170

Tabulka 7 Objemová hmotnost trámčů po 28 dnech

28denní					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	100,3	100,4	101,5	2262,0	2210
2	100,6	100,5	100,4	2238,9	2210
3	100,1	100,1	100,5	2243,6	2230
4	100,4	96,4	100,3	2174,9	2240
5	100,3	100,6	100,2	2196,9	2170
6	100,8	101,2	97,0	2257,7	2280

Tabulka 8 Objemová hmotnost krychlí o hraně 100 mm

## Bakalářská práce

Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

28denní					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	149,5	149,3	148,5	7594,6	2290
2	149,7	149,8	148,9	7632,8	2290
3	149,3	149,5	147,7	7549,0	2290
4	149,6	149,8	149,9	7535,4	2240
5	149,1	148,2	150,0	7602,5	2290
6	149,8	149,7	149,8	7612,4	2270

*Tabulka 9 Objemová hmotnost krychlí o hraně 150 mm*

	Trámce			Krychle 100 mm	Krychle 150 mm
	2denní	14denní	28denní	28denní	28denní
<b>Průměr [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2260	2210	2210	2220	2280
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	16,6	52,7	36,3	33,5	18,6
<b>Variační koeficient [%]</b>	0,7	2,4	1,6	1,5	0,8

*Tabulka 10 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty objemových hmotností*

### 7.1.2. Alkalicky aktivovaný materiál + popílek

Odbedňovací (2 dny)					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	39,7	40,3	160,4	589,4	2300
2	39,7	39,9	160,0	571,4	2250
3	40,1	40,0	159,9	589,3	2300
4	39,9	40,0	160,3	579,9	2270

*Tabulka 11 Objemová hmotnost trámčů po 2 dnech*

14denní					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	39,9	39,0	160,5	557,3	2230
2	39,7	40,0	160,1	567,9	2240
3	39,6	39,9	161,6	565,9	2210
4	39,9	38,8	160,2	556,2	2240
5	39,6	39,9	160,5	565,1	2230
6	40,0	39,9	160,4	560,9	2190

*Tabulka 12 Objemová hmotnost trámčů po 14 dnech*

Bakalářská práce

Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

28denní					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	39,6	40,0	160,0	552,1	2180
2	40,6	40,0	161,2	565,7	2160
3	40,0	40,2	160,6	560,9	2170
4	40,0	40,6	161,3	560,7	2140
5	40,5	39,9	160,4	559,5	2160
6	40,0	39,3	160,8	551,3	2180
7	40,0	40,2	160,3	549,5	2130
8	40,1	40,3	160,4	550,3	2130
9	40,2	39,4	160,3	549,9	2170
10	39,9	39,9	160,6	556,8	2180

Tabulka 13 Objemová hmotnost trámců po 28 dnech

28denní					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	99,9	99,9	98,9	2192,2	2220
2	99,9	100,0	99,0	2197,6	2220
3	99,8	99,9	96,7	2182,4	2260
4	99,9	99,8	96,6	2188,6	2270
5	100,0	100,1	97,9	2190,6	2240
6	100,5	100,3	95,7	2167,9	2250

Tabulka 14 Objemová hmotnost krychlí o hraně 100 mm

28denní					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	145,9	150,0	149,7	7332,3	2240
2	148,8	150,1	150,0	7431,5	2220
3	150,2	146,5	150,1	7337,7	2220
4	147,2	150,0	150,2	7404,3	2230
5	149,7	145,1	149,7	7369,0	2270
6	149,3	145,2	149,5	7228,8	2230

Tabulka 15 Objemová hmotnost krychlí o hraně 150 mm

	Trámce			Krychle 100 mm	Krychle 150 mm
	2denní	14denní	28denní	28denní	28denní
<b>Průměr [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2280	2220	2160	2240	2240
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	21,2	18,0	19,0	18,9	17,1
<b>Variační koeficient [%]</b>	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8

Tabulka 16 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty objemových hmotností



## 7.1.3. Alkalicky aktivovaný materiál + liapor

Odbedňovací (3 dny)					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	40,3	40,0	160,1	527,1	2040
2	41,0	39,9	160,0	534,5	2040
3	39,5	40,2	160,9	534,9	2100
4	39,6	40,0	161,2	528,1	2070

Tabulka 17 Objemová hmotnost trámů po 3 dnech

14denní					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	39,9	39,3	160,8	527,6	2090
2	39,5	39,6	161,9	538,7	2130
3	40,0	39,8	161,3	544,9	2120
4	39,9	38,5	159,4	520,9	2130
5	39,9	39,3	159,5	527,7	2110
6	39,9	39,5	160,5	536,8	2120

Tabulka 18 Objemová hmotnost trámů po 14 dnech

28denní					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	40,6	40,0	161,6	554,5	2110
2	41,0	40,1	160,4	549,0	2080
3	39,6	39,9	160,2	544,4	2150
4	40,5	40,0	160,5	537,5	2070
5	40,0	40,1	160,4	533,9	2080
6	40,8	40,2	160,5	539,0	2050
7	40,8	40,2	160,8	540,5	2050
8	41,7	40,3	160,3	562,7	2090
9	40,0	40,1	160,8	542,4	2110
10	39,1	40,1	160,7	550,8	2180

Tabulka 19 Objemová hmotnost trámů po 28 dnech

28denní					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	99,2	99,8	99,7	2093,0	2120
2	97,2	99,8	99,8	2086,0	2160
3	97,4	99,8	99,9	2063,0	2130
4	98,4	99,7	99,9	2082,0	2130
5	98,4	99,8	100,1	2108,0	2150
6	98,6	99,9	99,9	2126,0	2160

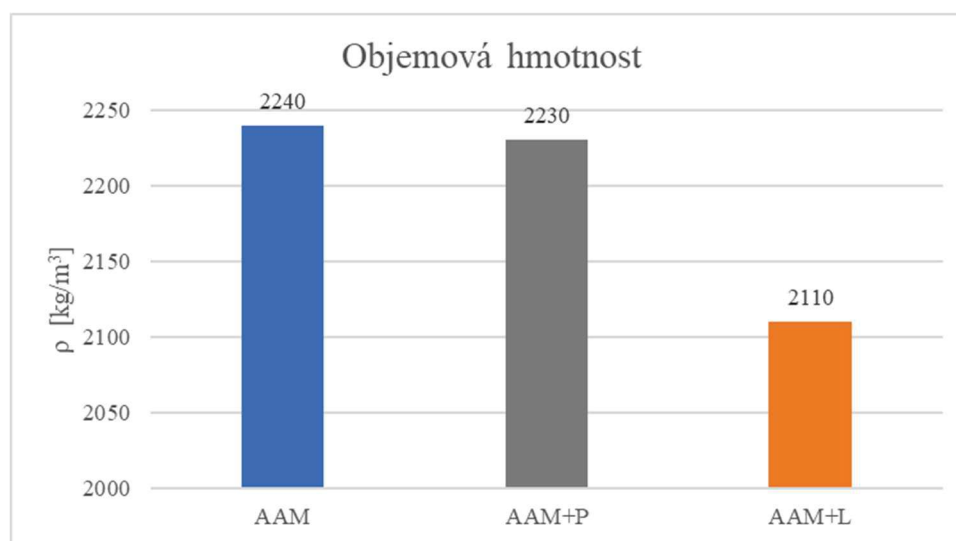
Tabulka 20 Objemová hmotnost krychlí o hraně 100 mm

28denní					
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	148,6	149,7	149,9	7059,2	2120
2	148,8	149,9	149,8	7134,3	2140
3	148,6	149,9	149,4	7122,5	2140
4	147,3	149,7	149,3	7056,9	2140
5	143,4	149,4	149,8	6932,0	2160
6	146,4	149,5	150,2	7029,0	2140

Tabulka 21 Objemová hmotnost krychlí o hraně 150 mm

	Trámce			Krychle 100 mm	Krychle 150 mm
	3denní	14denní	28denní	28denní	28denní
<b>Průměr [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2060	2120	2100	2140	2140
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	24,9	13,7	39,8	15,7	11,5
<b>Variační koeficient [%]</b>	1,2	0,6	1,9	0,7	0,5

Tabulka 22 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty objemových hmotností



Graf 1 Porovnání objemových hmotností

Z porovnání Tabulky 10, 16 a 22 lze zjistit jednoznačně to, že směs s lioporem má nejnižší objemovou hmotnost o průměrné hodnotě 2110 kg/m<sup>3</sup>, což se předpokládalo, jelikož liapor se používá jako lehčené kamenivo právě za účelem snížení objemové hmotnosti. Alkalicky aktivovaný materiál má průměrnou objemovou hmotnost 2240 kg/m<sup>3</sup> a alkalicky aktivovaný materiál s příměsí popílku má průměrnou objemovou hmotnost 2230 kg/m<sup>3</sup>. Variační koeficienty se pohybují v rozmezí od 0,5% do 2,4%. V Grafu 1 je porovnání objemových hmotností jednotlivých materiálů.

## 7.2. Stanovení pevnosti v tlaku ztvrdlého betonu

Pevnost v tlaku byla zkoušena na trámcích (viz Obrázek 6 a 7) o stáří 2–3 dny, 14 dní, 28 dní, dále na krychlích o hraně 100 mm a na krychlích o hraně 150 mm (viz Obrázek 8 a 9). Krychle byly staré 28 dní. Den před samotnou zkouškou byli vzorky vytaženy z kádě s vodou a nechali se vyschnout v prostředí laboratoře. Následně vzorky se změřili ve třech na sebe kolmých směrech, zvážili se a také byla vypočítána jejich objemová hmotnost. Po tomto kroku je možné vzorky umístit do lisu a zatížit tlakem. Vzorky trámců je nutné nejprve vyzkoušet na pevnost v tahu ohybem, kdy se trámce rozlomí na dvě poloviny, které jsou pak samostatně vyzkoušeny na pevnost v tlaku. Hodnotou, která se zapíše, je maximální síla působící na vzorek a následně se z této hodnoty vypočítá pevnost vzorku pomocí vztahu (2). Vypočtená hodnota se zaokrouhlí na 0,1 MPa, z těchto hodnot se vypočítá průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. Výsledky z měření pevnosti v tlaku jsou uvedeny v Tabulce 23 až 45.



Obrázek 7 Polovina trámce připravená na zkoušku pevnosti v tlaku, zdroj: vlastní



Obrázek 6 Typické porušení vzorku při zkoušce pevnosti v tlaku

### 7.2.1. Odbedňovací pevnosti v tlaku polovin trámců

AAM									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	39,9	40,5	159,6	579,1	2250	2,677	2,683	1,7	1,7
2	39,2	40,0	159,3	567,9	2270	3,156	2,626	2,0	1,6
3	39,6	40,0	159,6	572,1	2270	2,558	2,638	1,6	1,6
4	39,9	40,4	159,5	574,4	2230	2,470	2,433	1,5	1,5

Tabulka 23 Pevnost v tlaku AAM po 2 dnech

AAM+P									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	39,7	40,3	160,4	589,4	2300	2,582	2,997	1,6	1,9
2	39,7	39,9	160,0	571,4	2250	2,970	3,151	1,9	2,0
3	40,1	40,0	159,9	589,3	2300	2,859	2,806	1,8	1,8
4	39,9	40,0	160,3	579,9	2270	2,911	3,031	1,8	1,9

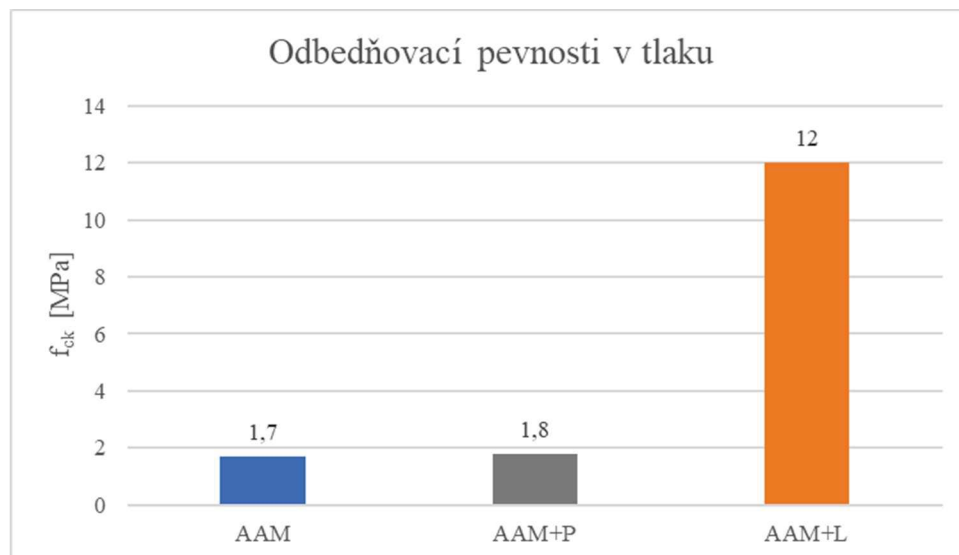
Tabulka 24 Pevnost v tlaku AAM+P po 2 dnech

AAM+L (3denní)									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	40,3	40,0	160,1	527,1	2040	19,11	18,76	11,9	11,7
2	41,0	39,9	160,0	534,5	2040	19,44	19,83	12,2	12,4
3	39,5	40,2	160,9	534,9	2100	18,89	20,78	11,8	13,0
4	39,6	40,0	161,2	528,1	2070	17,72	18,79	11,1	11,7

Tabulka 25 Pevnost v tlaku AAM+L po 2 dnech

	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	1,7	1,8	12,0
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,1	0,1	0,5
<b>Variační koeficient [%]</b>	7,8	5,5	4,4

Tabulka 26 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tlaku po odbednění



Graf 2 Porovnání odbedňovacích pevností v tlaku

## 7.2.2. 14denní pevnosti v tlaku polovin trámců

AAM									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	40,7	40,1	160,9	575,9	2190	56,52	53,83	35,3	33,6
2	40,4	39,7	159,9	575,9	2250	69,17	75,46	43,2	47,2
3	40,5	41,6	160,1	577,0	2140	74,83	72,26	46,8	45,2
4	41,2	40,3	160,3	585,3	2200	80,15	74,06	50,1	46,3
5	40,2	40,4	160,5	598,9	2300	75,56	79,60	47,2	49,8
6	40,4	42,4	161,1	600,0	2170	81,00	77,52	50,6	48,5

Tabulka 27 Pevnost v tlaku AAM po 14 dnech

AAM+P									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	39,9	39,0	160,5	557,3	2230	57,85	59,02	36,2	36,9
2	39,7	40,0	160,1	567,9	2240	56,97	59,29	35,6	37,1
3	39,6	39,9	161,6	565,9	2210	56,92	61,82	35,6	38,6
4	39,9	38,8	160,2	556,2	2240	56,52	58,05	35,3	36,3
5	39,6	39,9	160,5	565,1	2230	57,20	60,11	35,8	37,6
6	40,0	39,9	160,4	560,9	2190	60,03	58,32	37,5	36,5

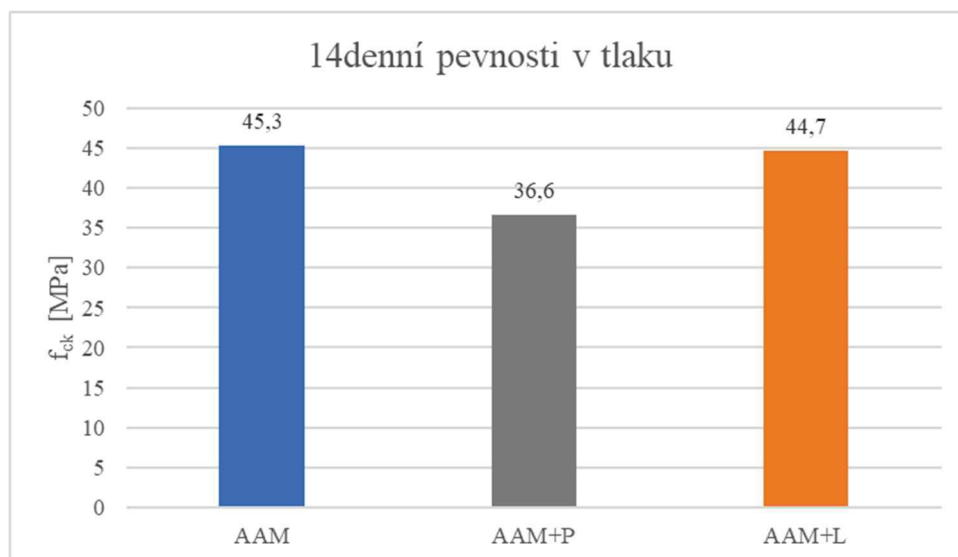
Tabulka 28 Pevnost v tlaku AAM+P po 14 dnech

AAM+L									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	39,9	39,3	160,8	527,6	2090	64,48	67,76	40,3	42,4
2	39,5	39,6	161,9	538,7	2130	70,20	76,34	43,9	47,7
3	40,0	39,8	161,3	544,9	2120	73,69	69,47	46,1	43,4
4	39,9	38,5	159,4	520,9	2130	68,05	76,13	42,5	47,6
5	39,9	39,3	159,5	527,7	2110	75,11	77,68	46,9	48,6
6	39,9	39,5	160,5	536,8	2120	66,00	72,89	41,3	45,6

Tabulka 29 Pevnost v tlaku AAM+L po 14 dnech

	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	45,3	36,6	44,7
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	5,3	1,0	2,6
<b>Variační koeficient [%]</b>	11,6	2,6	5,9

Tabulka 30 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevnosti v tlaku po 14 dnech



Graf 3 Porovnání 14denních pevností v tlaku

## 7.2.3. 28denní pevnosti v tlaku polovin trámčů

AAM									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	40,0	39,9	161,8	565,0	2190	96,88	101,40	60,6	63,4
2	40,3	40,5	160,3	569,2	2180	99,20	94,67	62,0	59,2
3	40,1	39,7	159,4	574,1	2260	95,53	102,65	59,7	64,2
4	41,4	40,2	159,7	576,1	2170	99,37	97,27	62,1	60,8
5	42,1	40,6	159,3	589,1	2160	89,34	104,00	55,8	65,0
6	39,8	40,3	160,0	577,4	2250	105,22	105,74	65,8	66,1
7	40,0	40,4	160,3	576,5	2230	101,32	105,35	63,3	65,8
8	40,1	40,6	160,2	585,7	2250	103,30	105,03	64,6	65,6
9	40,1	40,5	160,9	580,9	2220	100,40	99,56	62,8	62,2
10	40,3	40,3	160,0	562,4	2170	101,98	99,95	63,7	62,5

Tabulka 31 Pevnost v tlaku AAM po 28 dnech

AAM+P									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	39,6	40,0	160,0	552,1	2180	88,23	82,61	55,1	51,6
2	40,6	40,0	161,2	565,7	2160	90,56	89,41	56,6	55,9
3	40,0	40,2	160,6	560,9	2170	85,19	83,89	53,2	52,4
4	40,0	40,6	161,3	560,7	2140	88,08	88,29	55,1	55,2
5	40,5	39,9	160,4	559,5	2160	85,14	79,77	53,2	49,9
6	40,0	39,3	160,8	551,3	2180	87,33	80,47	54,6	50,3
7	40,0	40,2	160,3	549,5	2130	85,36	81,79	53,4	51,1
8	40,1	40,3	160,4	550,3	2130	86,93	87,97	54,3	55,0
9	40,2	39,4	160,3	549,9	2170	87,76	80,80	54,9	50,5
10	39,9	39,9	160,6	556,8	2180	86,35	87,05	54,0	54,4

Tabulka 32 Pevnost v tlaku AAM+P po 28 dnech

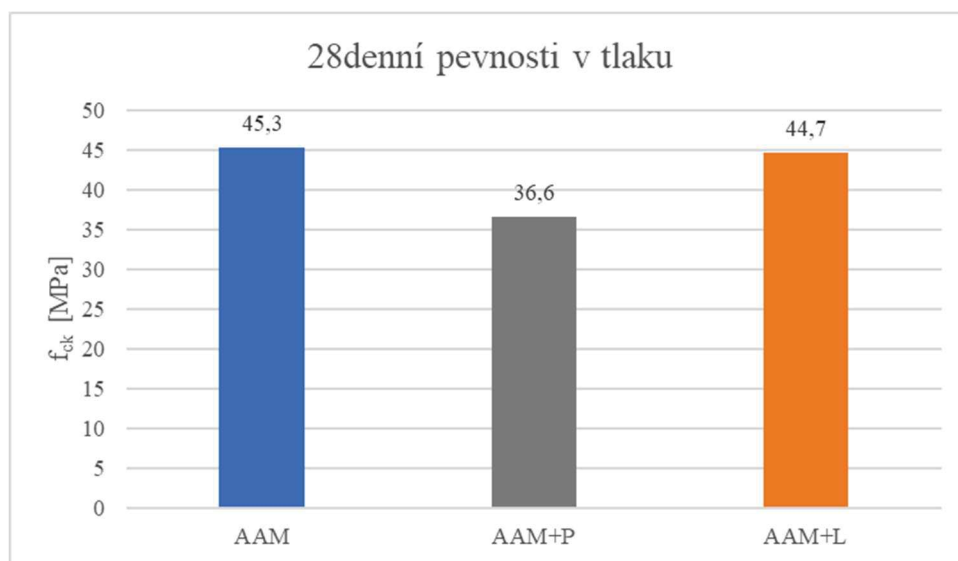
Bakalářská práce  
Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

AAM+L									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	40,6	40,0	161,6	554,5	2110	87,78	85,62	54,9	53,5
2	41,0	40,1	160,4	549,0	2080	79,02	86,74	49,4	54,2
3	39,6	39,9	160,2	544,4	2150	84,56	86,47	52,9	54,0
4	40,5	40,0	160,5	537,5	2070	78,83	82,48	49,3	51,6
5	40,0	40,1	160,4	533,9	2080	78,99	84,43	49,4	52,8
6	40,8	40,2	160,5	539,0	2050	81,17	82,88	50,7	51,8
7	40,8	40,2	160,8	540,5	2050	81,26	88,30	50,8	55,2
8	41,7	40,3	160,3	562,7	2090	95,13	86,92	59,5	54,3
9	40,0	40,1	160,8	542,4	2110	85,09	84,85	53,2	53,0
10	39,1	40,1	160,7	550,8	2180	88,35	81,30	55,2	50,8

Tabulka 33 Pevnost v tlaku AAM+P po 28 dnech

	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	62,8	53,5	52,8
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	2,6	1,9	2,4
<b>Variační koeficient [%]</b>	4,1	3,6	4,6

Tabulka 34 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tlaku po 28 dnech



Graf 4 Porovnání 28denních pevností v tlaku

## 7.2.4. 28denní pevnosti v tlaku krychlí o hraně 100 mm

AAM							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
1	100,3	100,4	101,5	2262,0	2210	651,7	64,7
2	100,6	100,5	100,4	2238,9	2210	639,2	63,2
3	100,1	100,1	100,5	2243,6	2230	635,9	63,4
4	100,4	96,4	100,3	2174,9	2240	585,5	60,5
5	100,3	100,6	100,2	2196,9	2170	602,4	59,7
6	100,8	101,2	97,0	2257,7	2280	660,6	64,8

Tabulka 35 Pevnost v tlaku AAM po 28 dnech

AAM+P							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
1	99,9	99,9	98,9	2192,2	2220	492,3	49,3
2	99,9	100,0	99,0	2197,6	2220	489,6	49,0
3	99,8	99,9	96,7	2182,4	2260	512,6	51,4
4	99,9	99,8	96,6	2188,6	2270	508,4	51,0
5	100,0	100,1	97,9	2190,6	2240	483,5	48,3
6	100,5	100,3	95,7	2167,9	2250	492,2	48,8

Tabulka 36 Pevnost v tlaku AAM+P po 28 dnech

AAM+L							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
1	99,2	99,8	99,7	2093,0	2120	522,7	52,8
2	97,2	99,8	99,8	2086,0	2160	518,2	53,4
3	97,4	99,8	99,9	2063,0	2130	525,2	54,0
4	98,4	99,7	99,9	2082,0	2130	509,4	51,9
5	98,4	99,8	100,1	2108,0	2150	487,9	49,7
6	98,6	99,9	99,9	2126,0	2160	511,0	51,9

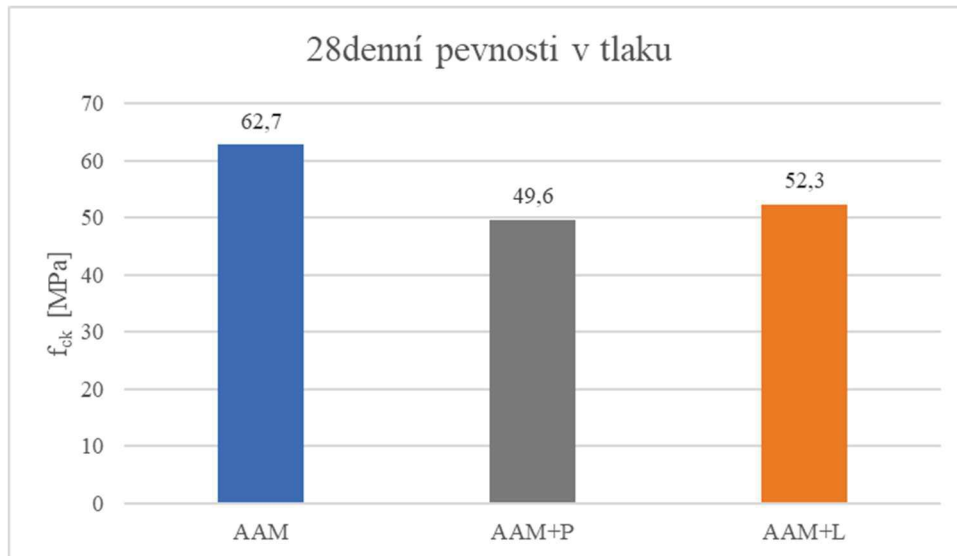
Tabulka 37 Pevnost v tlaku AAM+L po 28 dnech

	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	62,7	49,6	52,3
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	1,9	1,2	1,4
<b>Variační koeficient [%]</b>	3,1	2,3	2,7

Tabulka 38 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevnosti v tlaku po 28 dnech



Bakalářská práce  
Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování



Graf 5 Porovnání 28denních pevností v tlaku na krychlich o hraně 100 mm

7.2.5. 28denní pevnosti v tlaku krychlí o hraně 150 mm



Obrázek 9 Krychle o hraně 150 mm připravená na zkoušku pevnosti v tlaku, zdroj: vlastní



Obrázek 8 Krychle o hraně 150 mm po zkoušce pevnosti v tlaku, zdroj: vlastní

## Bakalářská práce

### Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

AAM							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
1	149,5	149,3	148,5	7594,6	2290	1384,8	62,1
2	149,7	149,8	148,9	7632,8	2290	1330,0	59,3
3	149,3	149,5	147,7	7549,0	2290	1313,6	58,9
4	149,6	149,8	149,9	7535,4	2240	1342,8	59,9
5	149,1	148,2	150,0	7602,5	2290	1377,7	62,4
6	149,8	149,7	149,8	7612,4	2270	1300,8	58,0

*Tabulka 39 Pevnost v tlaku AAM po 28 dnech*

AAM+P							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
1	145,9	150,0	149,7	7332,3	2240	1246,1	56,9
2	148,8	150,1	150,0	7431,5	2220	1237,2	55,4
3	150,2	146,5	150,1	7337,7	2220	1201,6	54,6
4	147,2	150,0	150,2	7404,3	2230	1254,4	56,8
5	149,7	145,1	149,7	7369,0	2270	1111,2	51,1
6	149,3	145,2	149,5	7228,8	2230	1043,6	48,1

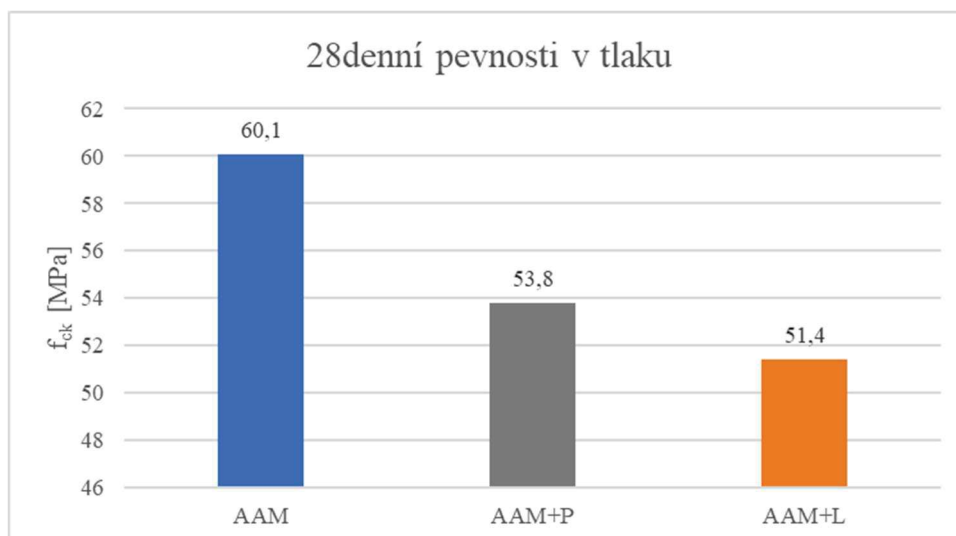
*Tabulka 40 Pevnost v tlaku AAM+P po 28 dnech*

AAM+L							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]
1	148,6	149,7	149,9	7059,2	2120	1015,7	45,7
2	148,8	149,9	149,8	7134,3	2140	1192,8	53,5
3	148,6	149,9	149,4	7122,5	2140	1163,7	52,3
4	147,3	149,7	149,3	7056,9	2140	1141,8	51,8
5	143,4	149,4	149,8	6932,0	2160	1118,5	52,2
6	146,4	149,5	150,2	7029,0	2140	1157,2	52,9

*Tabulka 41 Pevnost v tlaku AAM+L po 28 dnech*

	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	60,1	53,8	51,4
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	1,6	3,2	2,6
<b>Variační koeficient [%]</b>	2,7	5,9	5,1

*Tabulka 42 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tlaku po 28 dnech*

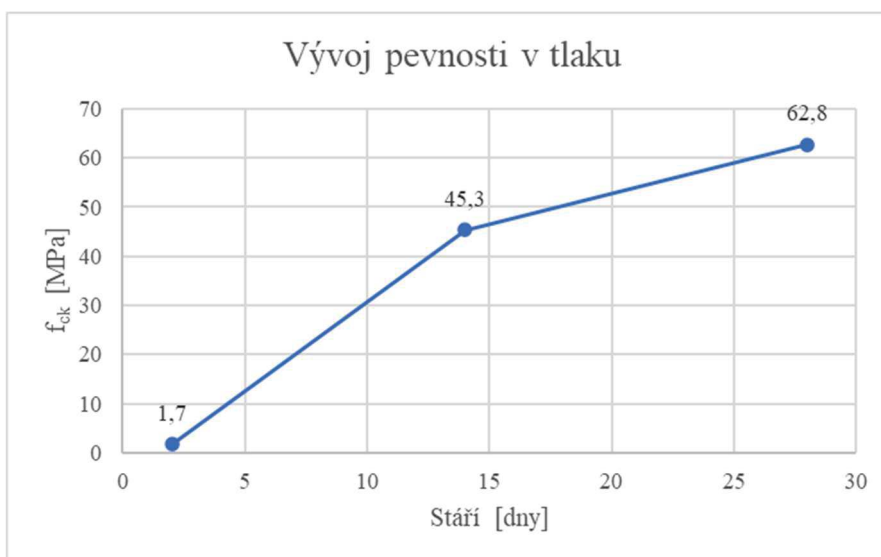


Graf 6 Porovnání 28denních pevností v tlaku

## 7.2.6. Vývoj pevnosti v tlaku polovin trámců

AAM	2denní	14denní	28denní
Průměr [MPa]	1,7	45,3	62,8
Směrodatná odchylka [-]	0,1	5,3	2,6
Variační koeficient [%]	7,8	11,6	4,1

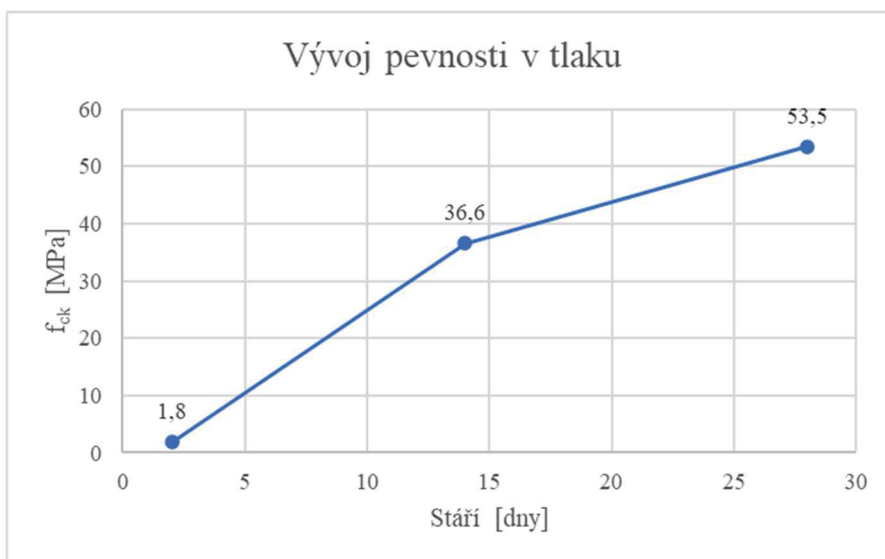
Tabulka 43 Vývoj pevnosti v tlaku AAM



Graf 7 Vývoj pevnosti v tlaku AAM

AAM+P	2denní	14denní	28denní
Průměr [MPa]	1,8	36,6	53,5
Směrodatná odchylka [-]	0,1	1,0	1,9
Variační koeficient [%]	5,5	2,6	3,6

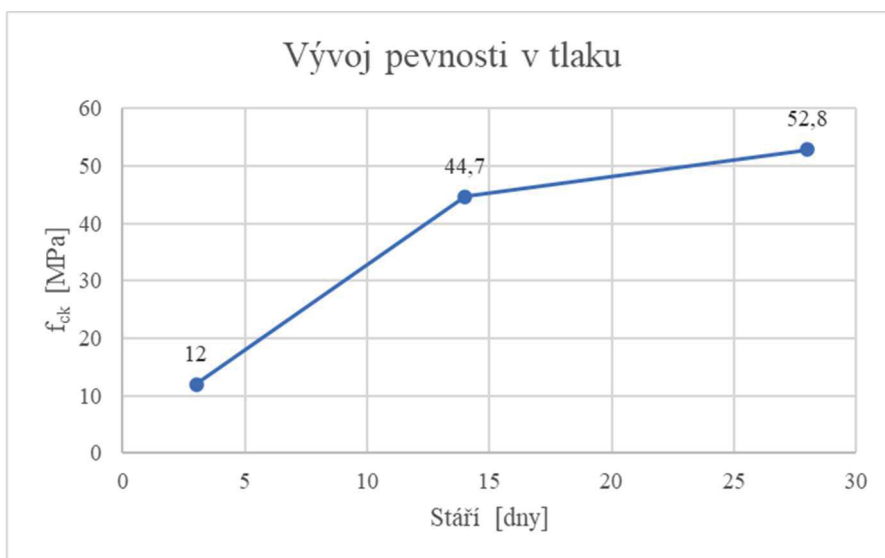
Tabulka 44 Vývoj pevnosti v tlaku AAM+P



Graf 8 Vývoj pevnosti v tlaku AAM+P

AAM+L	3denní	14denní	28denní
<b>Průměr [MPa]</b>	12,0	44,7	52,8
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,5	2,6	2,4
<b>Variační koeficient [%]</b>	4,4	5,9	4,6

Tabulka 45 Vývoj pevnosti v tlaku AAM+L



Graf 9 Vývoj pevnosti v tlaku AAM+L

Graf 2 se nedá považovat za směrodatný pro porovnání odbedňovacích pevností, protože materiál s liaporem byl odbedněn až po 3 dnech na rozdíl od dalších dvou materiálů, které byly odbedněny po 2 dnech. Proto je odbedňovací pevnost materiálu s liaporem řádově vyšší než dalších dvou. Z tohoto faktu je na druhou stranu možné určit to, že mezi 2. a 3. dnem stáří budou mít pravděpodobně všechny tři materiály velký nárůst pevností.

V Tabulce 26 lze vidět, že vzorky s liaporem mají nižší variační koeficient (4,4%), což znamená, že rozptyl naměřených hodnot byl menší.

V Tabulce 30 lze vidět, že největší variační koeficient má AAM (11,6%). Z Grafu 3, 4 a 5 lze určit, že nejvyšších pevností v tlaku dosahuje AAM a nejnižších AAM s popílkem. Toto ovšem platí pro vzorky trámčů o stáří 14 a 28 dní a vzorky krychlí o hraně 100 mm a stáří 28 dní. Pro krychle o hraně 150 mm a stáří 28 dní to neplatí. Na Grafu 6 je možné vidět, že nejvyšších pevností opět dosahuje AAM, ale nejnižších pevností dosahuje AAM s liaporem. Vzhledem k menšímu množství vzorků a poměrně malému rozdílu pevností není možné s jistotou určit, zda rostoucí rozměry vzorků mají vliv na jejich pevnost. Na Grafu 7, 8 a 9 lze vidět, že větší nárůst pevností je mezi odbedňovací a 14denní a mezi 14denní a 28denní je nárůst menší, nejlépe to lze vidět na Grafu 9.

### 7.3. Stanovení pevnosti v tahu ohybem ztvrdlého betonu

Pevnost v tahu ohybem byla zkoušena na trámčích o stáří 2–3 dny, 14 dní, 28 dní. Den před samotnou zkouškou se vzorky vytáhnou z kádě s vodou a nechají se vyschnout v prostředí laboratoře. Následně se vzorky změří ve třech na sebe kolmých směrech, zváží se a také se vypočítá jejich objemová hmotnost. Po tomto kroku je možné vzorky umístit do lisu a zatížit tahem za ohybu, pro naše zkoušky byl použitý tříbodový ohyb. Hodnotou, která se zapíše, je maximální síla působící na vzorek a následně se z této hodnoty vypočítá pevnost vzorku pomocí vztahu (3). Vypočítaná hodnota se zaokrouhlí na 0,1 MPa, z těchto hodnot se vypočítá průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. Výsledky z měření pevnosti v tahu za ohybu jsou uvedeny v Tabulce 46 až 60.

#### 7.3.1. Odbedňovací pevnosti v tahu ohybem

AAM							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu ohybem [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
1	39,9	40,5	159,6	579,1	2250	0,160	0,4
2	39,2	40,0	159,3	567,9	2270	0,220	0,5
3	39,6	40,0	159,6	572,1	2270	0,022	0,1
4	39,9	40,4	159,5	574,4	2230	0,166	0,4

Tabulka 46 Pevnost v tahu ohybem AAM po 2 dnech

Bakalářská práce  
Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

AAM+P							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu ohybem [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
1	39,7	40,3	160,4	589,4	2300	0,170	0,4
2	39,7	39,9	160,0	571,4	2250	0,177	0,4
3	40,1	40,0	159,9	589,3	2300	0,156	0,4
4	39,9	40,0	160,3	579,9	2270	0,154	0,4

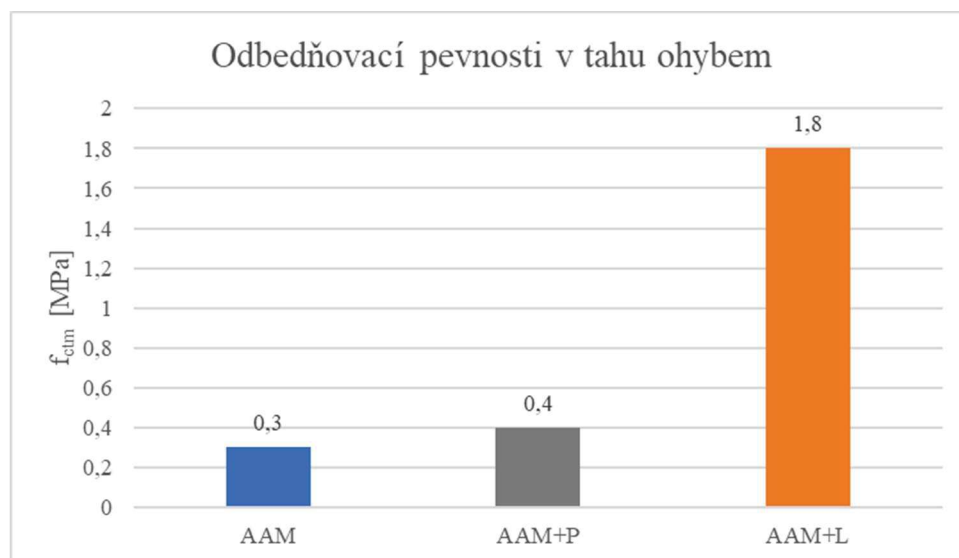
Tabulka 47 Pevnost v tahu ohybem AAM+P po 2 dnech

AAM+L							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu ohybem [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
1	40,3	40,0	160,1	527,1	2040	0,762	1,8
2	41,0	39,9	160,0	534,5	2040	0,766	1,8
3	39,5	40,2	160,9	534,9	2100	0,786	1,9
4	39,6	40,0	161,2	528,1	2070	0,818	1,9

Tabulka 48 Pevnost v tahu ohybem AAM+L po 3 dnech

	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	0,3	0,4	1,8
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,2	0,0	0,1
<b>Variační koeficient [%]</b>	52,1	6,1	3,9

Tabulka 49 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tahu ohybem po 2-3 dnech



Graf 10 Porovnání odbedňovacích pevností v tahu ohybem

## 7.3.2. 14denní pevnosti v tahu ohybem

AAM							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu ohybem [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
1	40,7	40,1	160,9	575,9	2190	1,965	4,5
2	40,4	39,7	159,9	575,9	2250	2,345	5,5
3	40,5	41,6	160,1	577,0	2140	2,301	4,9
4	41,2	40,3	160,3	585,3	2200	2,012	4,5
5	40,2	40,4	160,5	598,9	2300	2,237	5,1
6	40,4	42,4	161,1	600,0	2170	2,166	4,5

Tabulka 50 Pevnost v tahu ohybem AAM po 14 dnech

AAM+P							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu ohybem [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
1	39,9	39,0	160,5	557,3	2230	1,328	3,3
2	39,7	40,0	160,1	567,9	2240	1,448	3,4
3	39,6	39,9	161,6	565,9	2210	1,303	3,1
4	39,9	38,8	160,2	556,2	2240	1,307	3,3
5	39,6	39,9	160,5	565,1	2230	1,279	3,0
6	40,0	39,9	160,4	560,9	2190	1,307	3,1

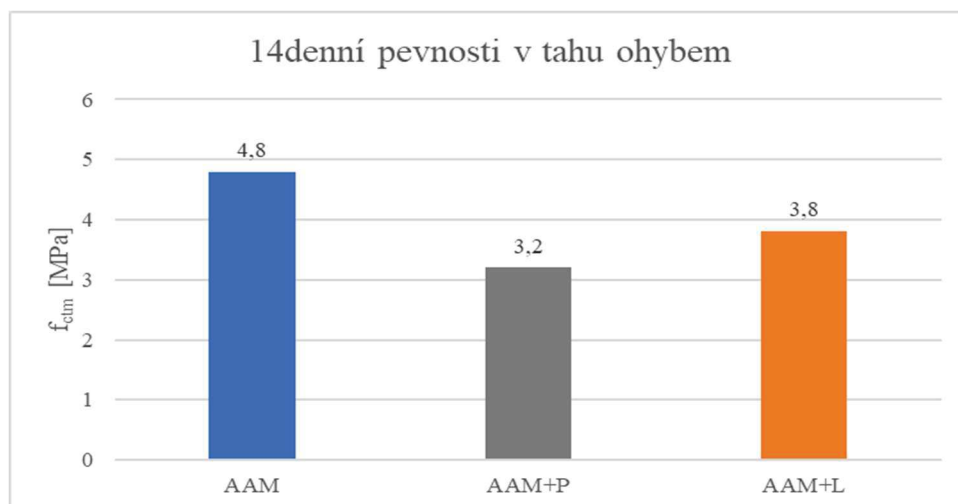
Tabulka 51 Pevnost v tahu ohybem AAM+P po 14 dnech

AAM+L							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu ohybem [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
1	39,9	39,3	160,8	527,6	2090	1,508	3,7
2	39,5	39,6	161,9	538,7	2130	1,649	4,0
3	40,0	39,8	161,3	544,9	2120	1,648	3,9
4	39,9	38,5	159,4	520,9	2130	1,513	3,8
5	39,9	39,3	159,5	527,7	2110	1,515	3,7
6	39,9	39,5	160,5	536,8	2120	1,493	3,6

Tabulka 52 Pevnost v tahu ohybem AAM+L po 14 dnech

	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	4,8	3,2	3,8
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,4	0,1	0,1
<b>Variační koeficient [%]</b>	8,1	4,2	3,8

Tabulka 53 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tahu ohybem po 14 dnech



Graf 11 Porovnání 14denních pevností v tahu ohybem

## 7.3.3. 28denní pevnosti v tahu ohybem

AAM							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu ohybem [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
1	40,0	39,9	161,8	565,0	2190	2,025	4,8
2	40,3	40,5	160,3	569,2	2180	2,462	5,6
3	40,1	39,7	159,4	574,1	2260	2,306	5,5
4	41,4	40,2	159,7	576,1	2170	2,049	4,6
5	42,1	40,6	159,3	589,1	2160	2,163	4,7
6	39,8	40,3	160,0	577,4	2250	1,954	4,5
7	40,0	40,4	160,3	576,5	2230	1,975	4,5
8	40,1	40,6	160,2	585,7	2250	1,915	4,3
9	40,1	40,5	160,9	580,9	2220	2,376	5,4
10	40,3	40,3	160,0	562,4	2170	2,166	5,0

Tabulka 54 Pevnost v tahu ohybem AAM po 28 dnech

AAM+P							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu ohybem [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
1	39,6	40,0	160,0	552,1	2180	1,741	4,1
2	40,6	40,0	161,2	565,7	2160	2,058	4,8
3	40,0	40,2	160,6	560,9	2170	1,817	4,2
4	40,0	40,6	161,3	560,7	2140	2,146	4,9
5	40,5	39,9	160,4	559,5	2160	1,734	4,0
6	40,0	39,3	160,8	551,3	2180	1,905	4,6
7	40,0	40,2	160,3	549,5	2130	1,719	4,0
8	40,1	40,3	160,4	550,3	2130	1,95	4,5
9	40,2	39,4	160,3	549,9	2170	1,919	4,6
10	39,9	39,9	160,6	556,8	2180	1,798	4,2

Tabulka 55 Pevnost v tahu ohybem AAM+P po 28 dnech



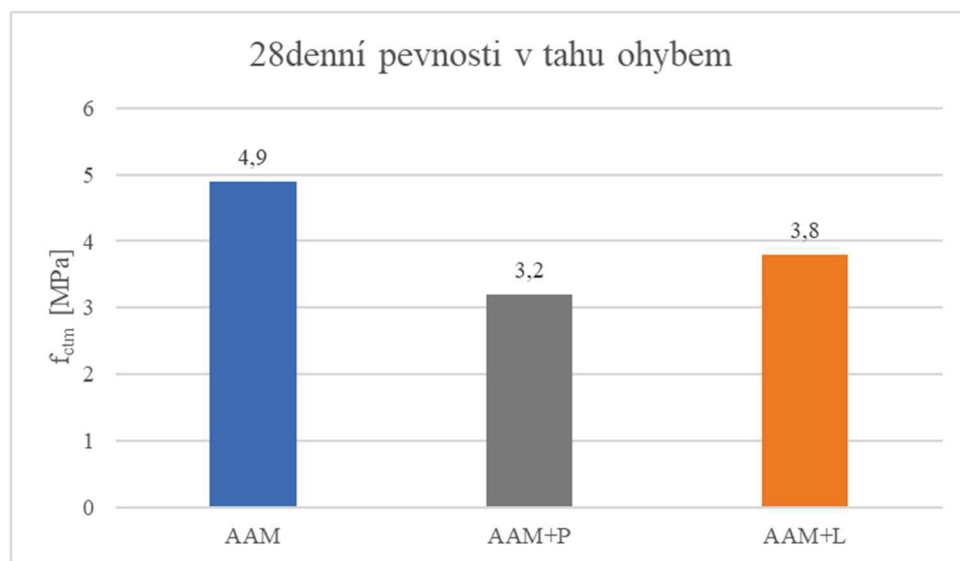
Bakalářská práce  
Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

AAM+L							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu ohybem [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
1	40,6	40,0	161,6	554,5	2110	1,918	4,4
2	41,0	40,1	160,4	549,0	2080	1,687	3,8
3	39,6	39,9	160,2	544,4	2150	1,667	4,0
4	40,5	40,0	160,5	537,5	2070	1,776	4,1
5	40,0	40,1	160,4	533,9	2080	1,723	4,0
6	40,8	40,2	160,5	539,0	2050	1,635	3,7
7	40,8	40,2	160,8	540,5	2050	2,131	4,9
8	41,7	40,3	160,3	562,7	2090	1,865	4,1
9	40,0	40,1	160,8	542,4	2110	1,950	4,6
10	39,1	40,1	160,7	550,8	2180	1,890	4,5

*Tabulka 56 Pevnost v tahu ohybem AAM+L po 28 dnech*

	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	4,9	4,4	4,2
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,4	0,3	0,3
<b>Variační koeficient [%]</b>	8,7	6,9	8,1

*Tabulka 57 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tahu ohybem po 28 dnech*

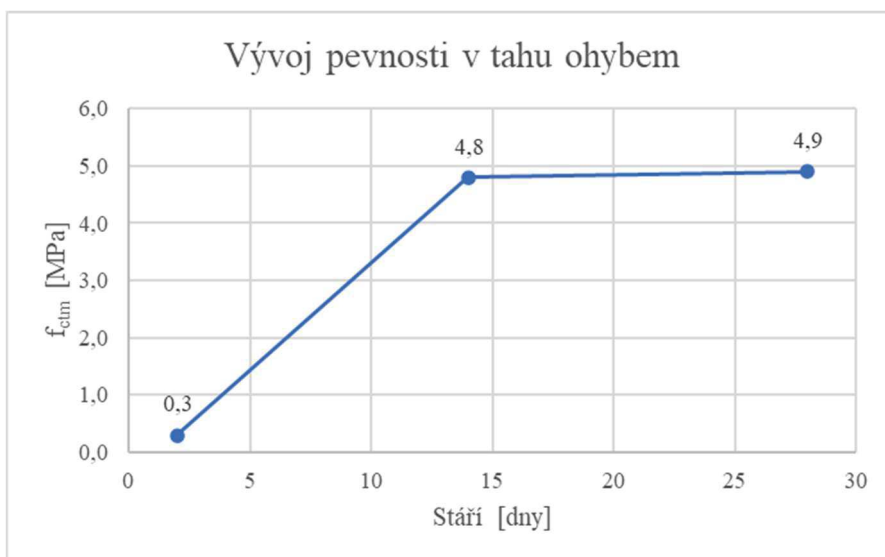


*Graf 12 Porovnání 28denních pevností v tahu ohybem*

### 7.3.4. Vývoj pevnosti v tahu ohybem

AAM	2denní	14denní	28denní
<b>Průměr [MPa]</b>	0,3	4,8	4,9
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,2	0,4	0,4
<b>Variační koeficient [%]</b>	52,1	8,1	8,7

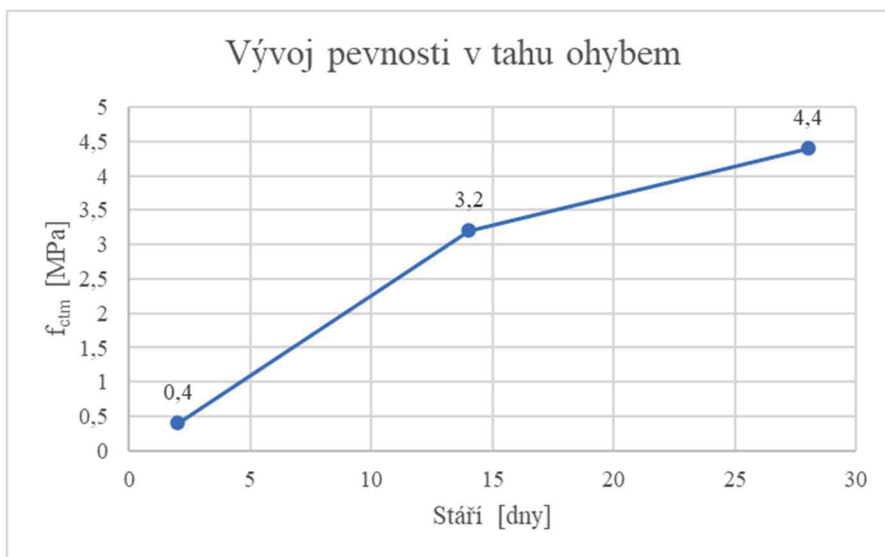
*Tabulka 58 Vývoj pevnosti v tahu ohybem AAM*



Graf 13 Vývoj pevnosti v tahu ohybem AAM

AAM+P	2denní	14denní	28denní
<b>Průměr [MPa]</b>	0,4	3,2	4,4
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,0	0,1	0,3
<b>Variační koeficient [%]</b>	6,1	4,2	6,9

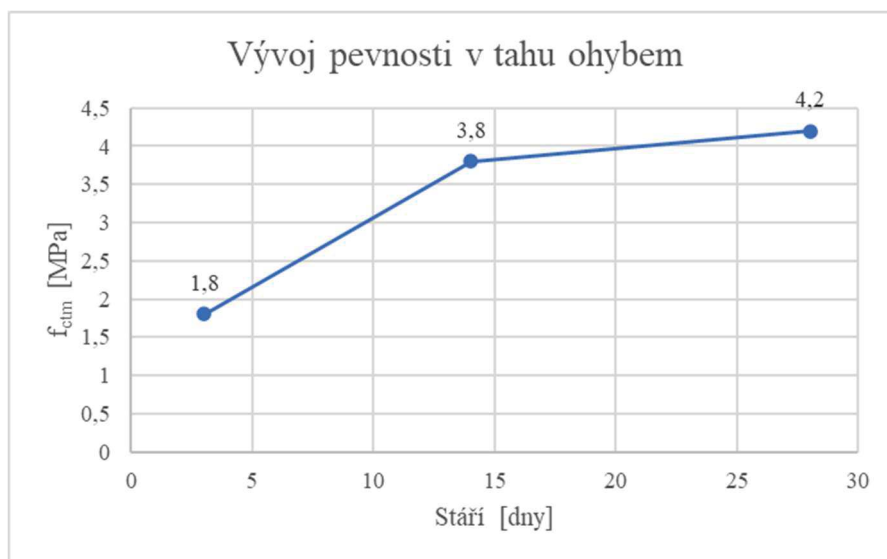
Tabulka 59 Vývoj pevnosti v tahu ohybem AAM+P



Graf 14 Vývoj pevnosti v tahu ohybem AAM+P

AAM+L	2denní	14denní	28denní
<b>Průměr [MPa]</b>	1,8	3,8	4,2
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,1	0,1	0,3
<b>Variační koeficient [%]</b>	3,9	3,8	8,1

Tabulka 60 Vývoj pevnosti v tahu ohybem AAM+L



Graf 15 Vývoj pevnosti v tahu ohybem AAM+L

Graf 10 se nedá považovat za směrodatný pro porovnání odbedňovacích pevností, protože materiál s liaporem byl odbedněn až po 3 dnech na rozdíl od dalších dvou materiálů, které byly odbedněny po 2 dnech. Proto je odbedňovací pevnost materiálu s liaporem řádově vyšší než dalších dvou. Z tohoto faktu je na druhou stranu možné určit to, že mezi 2. a 3. dnem stáří budou mít pravděpodobně všechny tři materiály velký nárůst pevností. V Tabulce 49 a 53 si lze také všimnout, že vzorky AAM mají nejvyšší variační koeficienty (52,1 a 8,1%) což znamená že rozptyl naměřených hodnot byl větší než u dalších materiálů. Především variační koeficient z Tabulky 49 je možné si ověřit v Tabulce 46, kde si lze všimnout, že jedna hodnota se velmi liší od ostatních.

Z Grafu 11 a 12 lze určit, že nejvyšších pevností v tahu ohybem po 14 a 28 dnech dosahuje AAM (4,8 a 4,9 MPa) a nejnižších AAM s popílkem (3,2 a 4,4 MPa). Ačkoliv Graf 10 není možné považovat za zcela směrodatný, dá se z něj určit alespoň to, že odbedňovací pevnosti mají podobné hodnoty pro vzorky AAM i AAM s popílkem. Na Grafu 13, 14 a 15 lze vidět, že větší nárůst pevností je mezi odbedňovací a 14denní a mezi 14denní a 28denní je nárůst menší, nejlépe to lze vidět na Grafu 13. Zajímavé je i to, že na Grafu 14, kde je znázorněn vývoj pevnosti AAM s popílkem, lze vidět, že tento materiál nemá tak strmý nárůst pevnosti v prvních 14 dnech, jako je tomu u zbylých dvou materiálů, ale má strmější nárůst mezi 14. a 28. dnem stáří vzorků.

#### 7.4. Stanovení pevnosti v příčném tahu ztvrdlého betonu

Pevnost v příčném tahu byla zkoušená na krychlích o délce hrany 150 mm (viz Obrázek 10 a 11) a o stáří 28 dní. Den před samotnou zkouškou se vzorky vytáhnou z kádě s vodou a nechají se vyschnout v prostředí laboratoře. Následně se vzorky změří ve třech na sebe kolmých směrech, zváží se a také se vypočítá jejich objemová hmotnost. Po tomto kroku je možné vzorky umístit do lisu a zatížit příčným tahem. Zapiše se hodnota maximální síly působící na vzorek a následně se z této hodnoty vypočítá pevnost vzorku pomocí vztahu (4). Vypočítaná hodnota se zaokrouhlí na 0,05 MPa, z těchto hodnot se vypočítá průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. Výsledky z měření pevnosti v příčném tahu jsou uvedeny v Tabulce 61 až 63.



Obrázek 11 Krychle o hraně 150 mm připravená na zkoušku pevnosti v příčném tahu, zdroj: vlastní



Obrázek 10 Krychle o hraně 150 mm po zkoušce pevnosti v příčném tahu, zdroj: vlastní

AAM							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při příčném tahu [kN]	Pevnost v příčném tahu [MPa]
1	149,6	149,7	146,8	7488,2	2280	132,6	6,05
2	149,8	149,8	147,6	7456,0	2250	128,3	5,80
3	149,7	149,5	147,3	7540,5	2290	135,8	6,15
4	149,1	149,3	145,0	7425,5	2300	150,2	6,95
5	149,2	150,0	145,5	7477,6	2300	135,7	6,20
6	149,4	149,4	146,7	7478,9	2280	131,1	6,00

Tabulka 61 Pevnost v příčném tahu AAM po 28 dnech

## Bakalářská práce

Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

AAM+P							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při příčném tahu [kN]	Pevnost v příčném tahu [MPa]
1	149,2	148,9	149,4	7416,6	2230	110,3	4,95
2	149,7	147,4	150,0	7401,3	2240	97,7	4,40
3	149,2	149,1	149,2	7415,2	2230	101,9	4,60
4	149,7	149,2	147,3	7452,0	2270	107,7	4,90
5	149,6	144,4	149,3	7337,8	2280	109,4	5,05
6	150,0	144,3	149,3	7333,9	2270	92,2	4,30

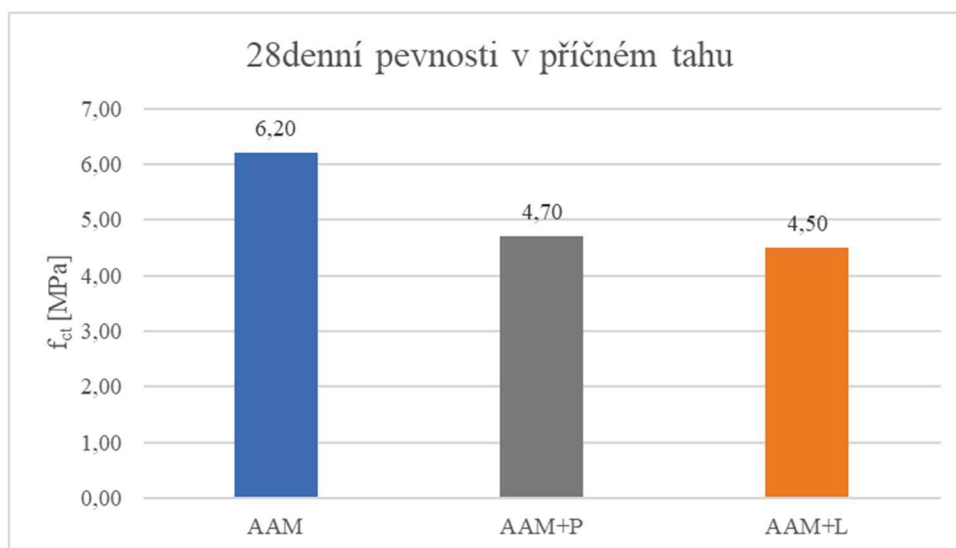
Tabulka 62 Pevnost v příčném tahu AAM+P po 28 dnech

AAM+L							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při příčném tahu [kN]	Pevnost v příčném tahu [MPa]
1	148,4	149,8	149,2	7016,1	2120	93,4	4,20
2	146,5	149,2	149,4	6973,3	2140	98,1	4,40
3	147,1	149,9	149,4	6967,6	2110	106,2	4,75
4	147,8	149,8	149,4	7084,0	2140	109,0	4,85
5	146,7	149,3	150,1	7064,0	2150	102,3	4,55
6	145,9	149,3	150,8	6933,0	2110	97,2	4,30

Tabulka 63 Pevnost v příčném tahu AAM+L po 28 dnech

	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	6,20	4,70	4,50
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,4	0,3	0,2
<b>Variační koeficient [%]</b>	5,8	6,0	5,2

Tabulka 64 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v příčném tahu po 28 dnech



Graf 16 Porovnání 28denních pevností v příčném tahu

V Tabulce 64 lze vidět, že vzorky AAM s popínkem mají nejvyšší variační koeficient (6,0%), což znamená, že rozptyl naměřených hodnot je větší než u dalších materiálů.

Nejmenší variační koeficient má AAM s lioporem (5,2%). Z Grafu 16 lze určit, že nejvyšší pevnosti v příčném tahu po 28 dnech dosahuje AAM (6,20 MPa) a nejnižší AAM s lioporem (4,50 MPa), AAM s popílkem dosahuje pevnosti 4,70 MPa.

### 7.5. Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti se zkoušel na 10 trácích od každé receptury o stáří 28 dní. Den před samotnou zkouškou se vytáhli vzorky z kádě s vodou a nechali se vyschnout v prostředí laboratoře. Následně se vzorky změří ve třech na sebe kolmých směrech, zváží se a také se vypočítá jejich objemová hmotnost. Po tomto kroku je možné vzorky vyzkoušet na dynamický modul pružnosti tak, že se změří doba prostupu ultrazvukového impulzu. Tato hodnota se zapíše a pomocí vztahu (5) se spočítá rychlost prostupu impulzu podélného ultrazvukového vlnění a následně se pomocí vztahu (6) dopočítá dynamický modul pružnosti. Vypočtená hodnota se zaokrouhlí na 0,1 GPa, z těchto hodnot se vypočítá průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. Výsledky z měření dynamického modulu pružnosti jsou uvedeny v Tabulce 65 až 67.

AAM											
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	T [μs]			Průměrné T [μs]	v [km/s]	E <sub>cu</sub> [GPa]
1	40,0	39,9	161,8	565,0	2190	42,6	42,3	42,2	42,4	3,82	31,9
2	40,3	40,5	160,3	569,2	2180	42,7	42,4	42,6	42,6	3,77	30,9
3	40,1	39,7	159,4	574,1	2260	42,6	42,4	42,3	42,4	3,76	31,9
4	41,4	40,2	159,7	576,1	2170	41,2	41,2	41,3	41,2	3,87	32,6
5	42,1	40,6	159,3	589,1	2160	42,6	42,7	42,6	42,6	3,74	30,2
6	39,8	40,3	160,0	577,4	2250	41,1	41,0	41,2	41,1	3,89	34,1
7	40,0	40,4	160,3	576,5	2230	41,4	41,8	41,3	41,5	3,86	33,3
8	40,1	40,6	160,2	585,7	2250	41,3	41,0	41,0	41,1	3,90	34,2
9	40,1	40,5	160,9	580,9	2220	41,3	41,4	41,1	41,3	3,90	33,7
10	40,3	40,3	160,0	562,4	2170	41,4	41,5	41,4	41,4	3,86	32,4

Tabulka 65 Dynamický modul pružnosti AAM po 28 dnech

## Bakalářská práce

### Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

AAM+P											
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	T [μs]			Průměrné T [μs]	v [km/s]	E <sub>cu</sub> [GPa]
1	39,6	40,0	160,0	552,1	2180	45,9	46,1	45,9	46,0	3,48	26,4
2	40,6	40,0	161,2	565,7	2160	45,2	45,3	45,1	45,2	3,57	27,5
3	40,0	40,2	160,6	560,9	2170	45,6	45,6	45,6	45,6	3,52	26,9
4	40,0	40,6	161,3	560,7	2140	45,0	44,9	45,0	45,0	3,59	27,5
5	40,5	39,9	160,4	559,5	2160	44,6	44,6	44,5	44,6	3,60	28,0
6	40,0	39,3	160,8	551,3	2180	44,9	44,9	44,3	44,7	3,60	28,2
7	40,0	40,2	160,3	549,5	2130	45,6	45,5	45,6	45,6	3,52	26,4
8	40,1	40,3	160,4	550,3	2130	45,1	45,1	44,9	45,0	3,56	27,0
9	40,2	39,4	160,3	549,9	2170	45,0	45,0	45,0	45,0	3,56	27,5
10	39,9	39,9	160,6	556,8	2180	44,4	44,4	44,3	44,4	3,62	28,5

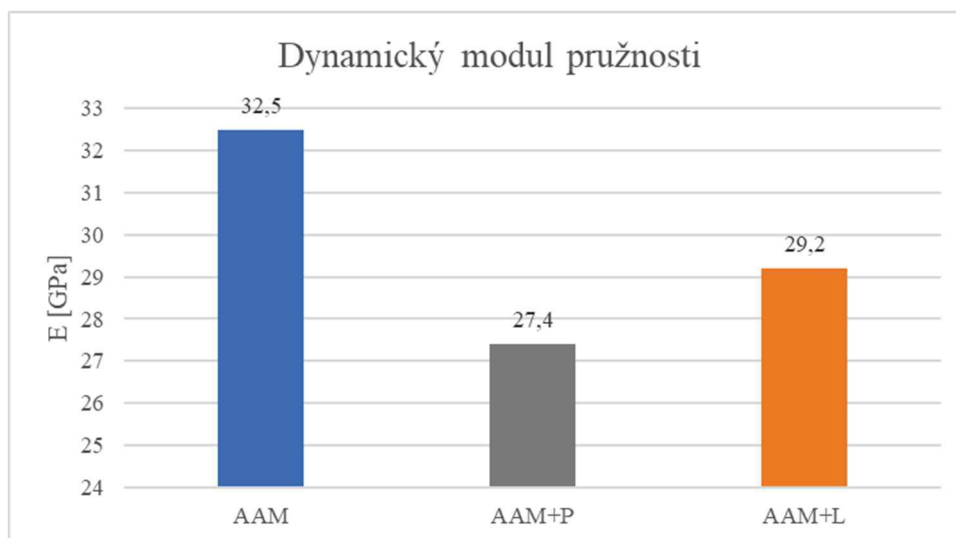
*Tabulka 66 Dynamický modul pružnosti AAM+P po 28 dnech*

AAM+L											
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	T [μs]			Průměrné T [μs]	v [km/s]	E <sub>cu</sub> [GPa]
1	40,6	40,0	161,6	554,5	2110	42,6	42,6	42,7	42,6	3,79	30,3
2	41,0	40,1	160,4	549,0	2080	42,9	42,9	43,0	42,9	3,74	29,0
3	39,6	39,9	160,2	544,4	2150	43,2	43,3	43,3	43,3	3,70	29,5
4	40,5	40,0	160,5	537,5	2070	43,0	42,3	42,4	42,6	3,77	29,4
5	40,0	40,1	160,4	533,9	2080	43,1	43,0	43,1	43,1	3,72	28,9
6	40,8	40,2	160,5	539,0	2050	43,2	42,9	42,8	43,0	3,74	28,6
7	40,8	40,2	160,8	540,5	2050	43,3	43,4	42,9	43,2	3,72	28,4
8	41,7	40,3	160,3	562,7	2090	42,7	42,7	42,6	42,7	3,76	29,5
9	40,0	40,1	160,8	542,4	2110	43,6	43,6	43,7	43,6	3,69	28,7
10	39,1	40,1	160,7	550,8	2180	43,5	43,6	43,4	43,5	3,70	29,8

*Tabulka 67 Dynamický modul pružnosti AAM+L po 28 dnech*

	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [GPa]</b>	32,5	27,4	29,2
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	1,3	0,7	0,6
<b>Variační koeficient [%]</b>	3,9	2,5	1,9

*Tabulka 68 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty dynamický modul pružnosti po 28 dnech*



Graf 17 Porovnání 28denních dynamických modulů pružnosti

V Tabulce 68 je možné si všimnout, že vzorky AAM+P mají nejvyšší variační koeficient (3,9%), což znamená, že rozptyl naměřených hodnot je větší než u dalších materiálů. Nejmenší variační koeficient má AAM+L (1,9%). Z Grafu 17 lze určit, že nejvyšší průměrný dynamický modul pružnosti po 28 dnech má AAM (32,5 GPa) a nejnižší AAM s popílkem (27,4 GPa), AAM s popílkem má průměrný dynamický modul pružnosti 29,2 GPa.

## 7.6. Vliv zvýšené teploty na vlastnosti ztvrdlého betonu

Vliv zvýšené teploty na vlastnosti ztvrdlého alkalického betonu byl zkoušen na trácích o stáří 28 dní a rozměrech 160 x 40 x 40 mm. Pro stanovení vlivu zvýšené teploty na vlastnosti ztvrdlého alkalicky aktivovaného betonu je nutné vzorky několik dní předem vytáhnout z vodní lázně a nechat je oschnout na vzduchu v prostředí laboratoře, následně se na 24 hodin před měřením vloží do sušárny, ve které je udržována teplota 100°C. Takto připravené vzorky se zváží na digitální váze a poté změří posuvným měřítkem jejich tři na sebe kolmé rozměry a z těchto rozměrů se vypočítá objem zkoušeného vzorku. Poté se pomocí vztahu (1) vypočítá objemová hmotnost. Vypočítaná hodnota se zaokrouhlí na 10 kg/m<sup>3</sup>. Po tomto kroku je možné vzorky vyzkoušet na rychlost prostupu UZ impulsu tak, že se změří čas prostupu ultrazvukového impulsu. Tato hodnota se запиše a pomocí vztahu (5) se spočítá rychlost prostupu impulsu ultrazvukového vlnění a tato hodnota se zaokrouhlí na 0,01 km/s.

Dále se umístili vzorky do pece, ve které se pozvolna zvyšovala teplota až na 500°C a následně po dobu 2 hodin zůstala teplota na této hodnotě. Po uplynutí této doby se nechala pec otevřená po dobu 24 hodin, aby vzorky vychladly a bylo možné s nimi manipulovat. Následně se vzorky znovu zvážili a znovu se spočítala jejich objemová hmotnost. Také se u vzorků znovu změřil čas prostupu ultrazvukového impulsu a dopočítala rychlost prostupu.



Nakonec byli vzorky vyzkoušené na pevnost v tahu ohybem a poté i na pevnost v tlaku. Hodnotou, která se zapíše, je maximální síla působící na vzorek a následně se z této hodnoty vypočítá pevnost vzorku pomocí vztahů (2 a 3). Vypočtená hodnota se zaokrouhlí na 0,1 MPa. U všech vypočítaných hodnot je vypočítaný průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient.

#### 7.6.1. Vliv zvýšené teploty na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu

AAM							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Hmotnost po peci [kg]	Objemová hmotnost po peci [kg/m <sup>3</sup> ]
1	40,8	40,5	157,8	525,2	2010	518,4	1990
2	40,2	39,4	160,0	531,5	2100	524,6	2070
3	40,0	40,7	161,0	550,8	2100	542,1	2070
4	40,2	41,1	160,1	543,9	2050	535,5	2020
5	40,1	39,9	158,5	527,1	2080	520,0	2050
6	40,0	41,4	160,6	561,2	2110	552,7	2080
7	39,8	41,0	160,6	557,1	2130	550,3	2100
8	39,8	41,6	158,8	546,4	2080	537,1	2040
9	39,7	42,0	158,6	557,6	2110	549,5	2080
10	39,9	40,0	157,7	527,8	2090	521,4	2070

Tabulka 69 Objemové hmotnosti před výpalem a po výpalu v peci AAM po 28 dnech

AAM+P							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Hmotnost po peci [kg]	Objemová hmotnost po peci [kg/m <sup>3</sup> ]
1	40,0	39,3	160,2	522,8	2080	516,7	2050
2	40,2	39,6	159,7	534,3	2100	528,7	2080
3	40,0	40,0	160,5	538,9	2100	532,9	2080
4	39,9	40,0	160,4	535,2	2090	528,9	2070
5	39,9	39,9	160,1	531,9	2090	526,0	2060
6	40,0	39,1	160,8	523,9	2080	518,0	2060
7	39,9	39,4	160,0	526,3	2090	519,9	2070
8	40,0	40,0	160,3	531,7	2070	525,6	2050
9	39,9	40,1	160,3	534,7	2080	528,6	2060
10	40,0	40,1	160,5	539,1	2090	533,0	2070

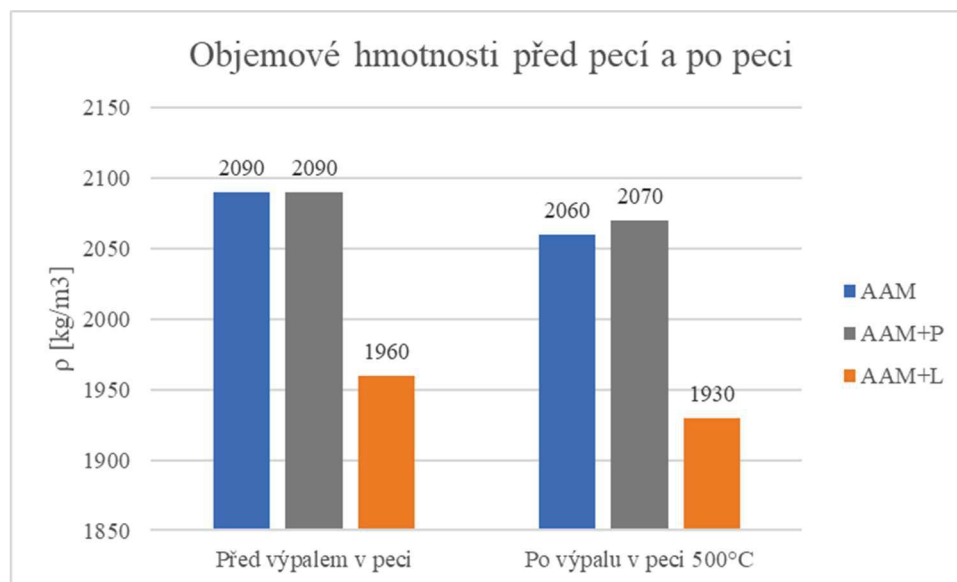
Tabulka 70 Objemové hmotnosti před výpalem a po výpalu v peci AAM+P po 28 dnech

AAM+L							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Hmotnost po peci [kg]	Objemová hmotnost po peci [kg/m <sup>3</sup> ]
1	40,1	40,2	160,4	507,4	1960	500,5	1940
2	40,1	40,2	159,9	511,7	1990	504,9	1960
3	40,0	40,6	160,4	514,0	1970	507,1	1950
4	40,0	40,7	159,9	502,2	1930	495,2	1900
5	40,1	40,0	160,5	506,5	1970	499,8	1940
6	40,0	39,8	160,3	505,4	1980	499,6	1960
7	40,0	40,2	159,8	497,3	1940	491,0	1910
8	40,1	39,5	159,9	491,9	1940	484,9	1910
9	40,2	39,7	160,3	501,3	1960	494,3	1930
10	39,5	39,7	161,1	498	1970	491,0	1940

Tabulka 71 Objemové hmotnosti před výpalem a po výpalu v peci AAM+L po 28 dnech

	Před výpalem v peci			Po výpalu v peci 500°C		
	AAM	AAM+P	AAM+L	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2090	2090	1960	2060	2070	1930
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	32,6	9,0	18,1	31,0	10,2	20,1
<b>Variační koeficient [%]</b>	1,6	0,4	0,9	1,5	0,5	1,0

Tabulka 72 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty objemových hmotností před výpalem a po výpalu v peci



Graf 18 Porovnání 28denních objemových hmotností před výpalem v peci a po výpalu v peci

Z Grafu 18 lze zjistit jednoznačně to, že směs s liaporem má nejnižší objemovou hmotnost o průměrné hodnotě 1960 kg/m<sup>3</sup> (před výpalem) a 1930 kg/m<sup>3</sup> (po výpalu), což se předpokládalo, jelikož liapor se používá jako lehčené kamenivo právě za účelem snížení objemové hmotnosti.

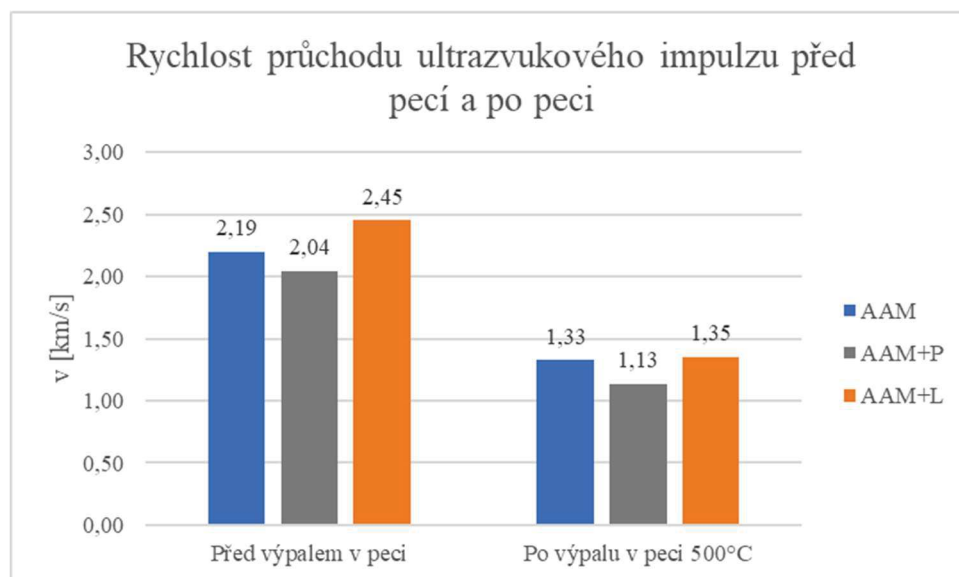
AAM a AAM+P mají průměrnou objemovou hmotnost před výpalem  $2090 \text{ kg/m}^3$ . Po výpalu v peci má AAM objemovou hmotnost  $2060 \text{ kg/m}^3$  a AAM+P  $2070 \text{ kg/m}^3$ . Nejvíce se snížila objemová hmotnost AAM+L (o  $30 \text{ kg/m}^3$ ), což je způsobeno pravděpodobně tím, že liaporové kamenivo má větší nasákavost než kamenivo použité v dalších dvou směsích. Také je vidět, že se více snížila objemová hmotnost AAM než AAM+P. V tomto případě má na tento jev vliv to, že popílek uzavírá strukturu materiálu a napomáhá tak ke snížení nasákavosti materiálu. Výsledky z měření objemové hmotnosti po výpalu jsou uvedeny v Tabulce 69 až 71.

Variační koeficienty se vlivem teploty výrazněji nezměnily. Největší variační koeficient má AAM před výpalem v peci (1,6%) a nejnižší variační koeficient má AAM+P před výpalem v peci (0,4%), viz Tabulka 72.

#### 7.6.2. Vliv zvýšené teploty na rychlost prostupu ultrazvukového impulzu

	Před výpalem v peci			Po výpalu v peci $500^\circ\text{C}$		
	AAM	AAM+P	AAM+L	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [km/s]</b>	2,19	2,04	2,45	1,33	1,13	1,35
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,44	0,07	0,10	0,09	0,04	0,05
<b>Variační koeficient [%]</b>	20,1	3,3	4,0	6,6	3,5	3,4

Tabulka 73 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty rychlosti prostupu ultrazvukového impulzu před výpalem a po výpalu v peci



Graf 19 Porovnání 28denních rychlostí prostupu UZ impulzu před výpalem v peci a po výpalu v peci

Z Grafu 19 lze jednoznačně určit, že AAM+L má nejnižší rychlost prostupu UZ impulsu o průměrné hodnotě 2,19 km/s (před výpalem) a 1,33 km/s (po výpalu), to je pravděpodobně způsobeno pórovitostí liaporu, protože póry zpomalují čas prostupu stejně jako trhliny a mikrotrhliny. Oproti tomu nejvyšší rychlost prostupu UZ impulsu má AAM+P, kde průměrná hodnota je 2,04 km/s (před výpalem) a 1,13 (po výpalu). AAM má průměrnou rychlost prostupu UZ impulsu před výpalem 2,19 km/s a po výpalu v peci 1,33 km/s.

Nejvíce se snížila rychlost prostupu u AAM+L (o 1,1 km/s) což je způsobeno pravděpodobně tím, že liaporové kamenivo má větší nasákavost než kamenivo použité v dalších dvou směsích. Také je vidět, že se více snížila rychlost prostupu u AAM+P než u AAM. V tomto případě pravděpodobně vzniklo u materiálu s popílkem více trhlín a mikrotrhlín.

Vzorky 3 a 6 AAM mají výrazně nižší rychlost prostupu než ostatní vzorky z této sady. Na těchto vzorcích byly na povrchu viditelné malé trhliny. Proto má tento materiál s velkým rozdílem nejvyšší variační koeficient (20,1%), zajímavé je, že po výpalu v peci se u tohoto materiálu variační koeficient snížil na 6,6% (viz Tabulka 73), což nám dokazuje narušení vzorků po výpalu v peci.

### 7.6.3. Vliv zvýšené teploty na pevnost v tahu ohybem

AAM							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost po peci [kg]	Objemová hmotnost po peci [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu ohybem [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
1	40,8	40,5	157,8	518,4	1990	0,819	1,8
2	40,2	39,4	160,0	524,6	2070	0,742	1,8
3	40,0	40,7	161,0	542,1	2070	0,328	0,7
4	40,2	41,1	160,1	535,5	2020	0,806	1,8
5	40,1	39,9	158,5	520,0	2050	0,902	2,1
6	40,0	41,4	160,6	552,7	2080	0,403	0,9
7	39,8	41,0	160,6	550,3	2100	1,085	2,4
8	39,8	41,6	158,8	537,1	2040	1,044	2,3
9	39,7	42,0	158,6	549,5	2080	1,015	2,2
10	39,9	40,0	157,7	521,4	2070	0,749	1,8

Tabulka 74 Pevnost v tahu ohybem po výpalu v peci AAM po 28 dnech

## Bakalářská práce

### Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

AAM+P							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost po peci [kg]	Objemová hmotnost po peci [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu v ohybu [kN]	Pevnost při tahu v ohybu [MPa]
1	40,0	39,3	160,2	516,7	2050	0,766	1,9
2	40,2	39,6	159,7	528,7	2080	0,728	1,7
3	40,0	40,0	160,5	532,9	2080	0,866	2,0
4	39,9	40,0	160,4	528,9	2070	0,706	1,7
5	39,9	39,9	160,1	526,0	2060	0,723	1,7
6	40,0	39,1	160,8	518,0	2060	0,792	1,9
7	39,9	39,4	160,0	519,9	2070	0,839	2,0
8	40,0	40,0	160,3	525,6	2050	0,795	1,9
9	39,9	40,1	160,3	528,6	2060	0,867	2,0
10	40,0	40,1	160,5	533,0	2070	0,770	1,8

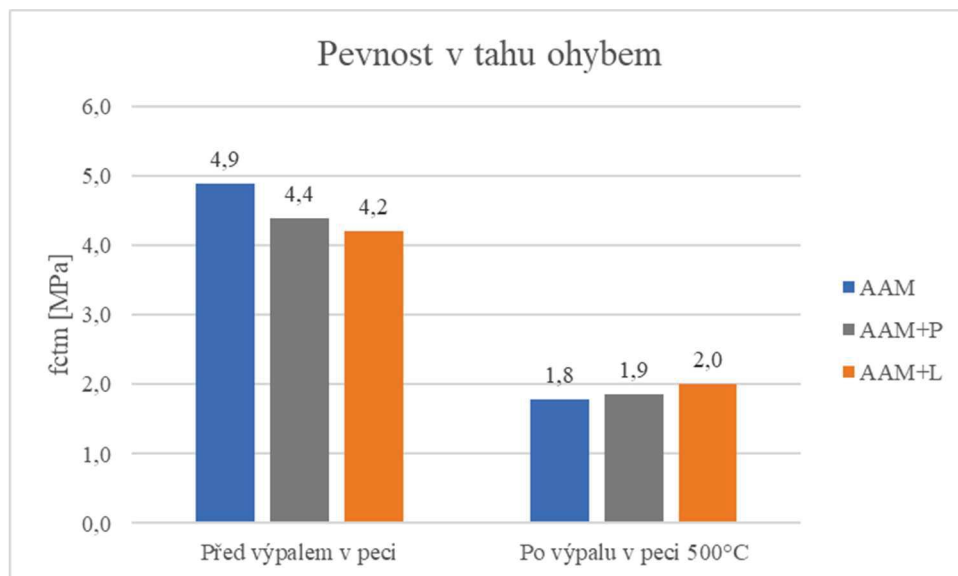
*Tabulka 75 Pevnost v tahu ohybem po výpalu v peci AAM+P po 28 dnech*

AAM+L							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost po peci [kg]	Objemová hmotnost po peci [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu v ohybu [kN]	Pevnost při tahu v ohybu [MPa]
1	40,1	40,2	160,4	500,5	1940	0,870	2,0
2	40,1	40,2	159,9	504,9	1960	0,850	2,0
3	40,0	40,6	160,4	507,1	1950	1,007	2,3
4	40,0	40,7	159,9	495,2	1900	0,795	1,8
5	40,1	40,0	160,5	499,8	1940	0,834	2,0
6	40,0	39,8	160,3	499,6	1960	0,819	1,9
7	40,0	40,2	159,8	491,0	1910	0,766	1,8
8	40,1	39,5	159,9	484,9	1910	0,908	2,2
9	40,2	39,7	160,3	494,3	1930	0,834	2,0
10	39,5	39,7	161,1	491,0	1940	0,874	2,1

*Tabulka 76 Pevnost v tahu ohybem po výpalu v peci AAM+L po 28 dnech*

	Před výpalem v peci			Po výpalu v peci 500°C		
	AAM	AAM+P	AAM+L	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	4,9	4,4	4,2	1,8	1,9	2,0
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,43	0,30	0,34	0,53	0,13	0,15
<b>Variační koeficient [%]</b>	8,7	6,9	8,1	29,9	7,2	7,5

*Tabulka 77 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevnosti v tahu ohybem před výpalem a po výpalu v peci*



Graf 20 Porovnání 28denních pevností v tahu ohybem před výpalem v peci a po výpalu v peci

Pro určení rozdílu pevností před výpalem a po výpalu v peci byli použité hodnoty z Tabulek 54, 55, 56 a 57. Výsledky z měření pevnosti v tahu za ohybu po výpalu jsou uvedeny v Tabulce 74 až 77. Na Grafu 20 je vidět, že před výpalem v peci má nejvyšší pevnost v tahu ohybem AAM (4,9 MPa) a nejnižší pevnost má AAM+L (4,2 MPa), AAM+P má pevnost před výpalem 4,4 MPa. Oproti tomu po výpalu v peci má AAM+L nejvyšší pevnost v tahu ohybem (2,0 MPa) a nejnižší pevnost má AAM (1,8 MPa), AAM+P má pevnost 1,9 MPa. Největší rozdíl pevností před a po výpalu tedy vznikl u AAM (3,1 MPa) a nejmenší rozdíl vznikl u AAM+L (2,2 MPa). Vzorky 3 a 6 AAM mají výrazně nižší pevnost než ostatní vzorky z této sady. Na těchto vzorcích byly na povrchu viditelné malé trhliny. Proto má tento materiál s velkým rozdílem nejvyšší variační koeficient (29,9%).

#### 7.6.4. Vliv zvýšené teploty na pevnost v tlaku

AAM									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost po peci [kg]	Objemová hmotnost po peci [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	40,8	40,5	157,8	518,4	1990	60,59	62,53	37,9	39,1
2	40,2	39,4	160,0	524,6	2070	68,84	67,40	43,0	42,1
3	40,0	40,7	161,0	542,1	2070	101,55	97,42	63,5	60,9
4	40,2	41,1	160,1	535,5	2020	99,88	103,62	62,4	64,8
5	40,1	39,9	158,5	520,0	2050	84,61	84,81	52,9	53,0
6	40,0	41,4	160,6	552,7	2080	99,38	97,11	62,1	60,7
7	39,8	41,0	160,6	550,3	2100	83,44	84,83	52,2	53,0
8	39,8	41,6	158,8	537,1	2040	102,64	104,02	64,2	65,0
9	39,7	42,0	158,6	549,5	2080	92,83	93,98	58,0	58,7
10	39,9	40,0	157,7	521,4	2070	67,56	66,89	42,2	41,8

Tabulka 78 Pevnost v tlaku po výpalu v peci AAM po 28 dnech

## Bakalářská práce

### Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

AAM+P									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost po peci [kg]	Objemová hmotnost po peci [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	40,0	39,3	160,2	516,7	2050	60,93	63,63	38,1	39,8
2	40,2	39,6	159,7	528,7	2080	60,44	63,62	37,8	39,8
3	40,0	40,0	160,5	532,9	2080	68,24	70,93	42,7	44,3
4	39,9	40,0	160,4	528,9	2070	64,35	63,12	40,2	39,5
5	39,9	39,9	160,1	526,0	2060	58,24	59,48	36,4	37,2
6	40,0	39,1	160,8	518,0	2060	60,49	60,98	37,8	38,1
7	39,9	39,4	160,0	519,9	2070	69,13	68,10	43,2	42,6
8	40,0	40,0	160,3	525,6	2050	68,64	69,78	42,9	43,6
9	39,9	40,1	160,3	528,6	2060	66,13	64,46	41,3	40,3
10	40,0	40,1	160,5	533,0	2070	69,75	66,43	43,6	41,5

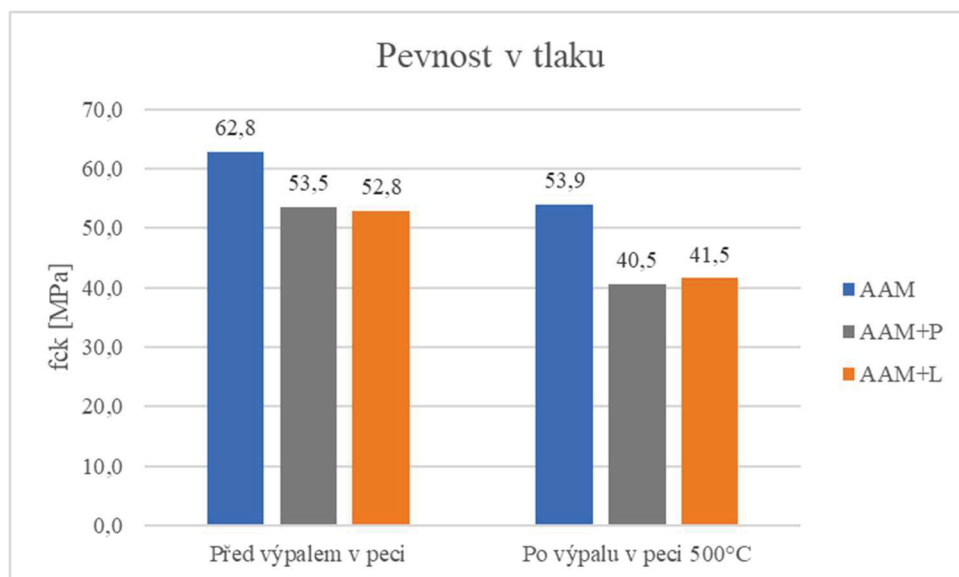
*Tabulka 79 Pevnost v tlaku po výpalu v peci AAM+P po 28 dnech*

AAM+L									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost po peci [kg]	Objemová hmotnost po peci [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	40,1	40,2	160,4	500,5	1940	75,40	70,13	47,1	43,8
2	40,1	40,2	159,9	504,9	1960	64,48	59,36	40,3	37,1
3	40,0	40,6	160,4	507,1	1950	76,02	75,41	47,5	47,1
4	40,0	40,7	159,9	495,2	1900	63,15	67,99	39,5	42,5
5	40,1	40,0	160,5	499,8	1940	63,15	65,28	39,5	40,8
6	40,0	39,8	160,3	499,6	1960	64,57	72,65	40,4	45,4
7	40,0	40,2	159,8	491,0	1910	55,67	66,35	34,8	41,5
8	40,1	39,5	159,9	484,9	1910	61,28	65,16	38,3	40,7
9	40,2	39,7	160,3	494,3	1930	65,48	60,75	40,9	38,0
10	39,5	39,7	161,1	491,0	1940	66,43	70,52	41,5	44,1

*Tabulka 80 Pevnost v tlaku po výpalu v peci AAM+L po 28 dnech*

	Před výpalem v peci			Po výpalu v peci 500°C		
	AAM	AAM+P	AAM+L	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	62,8	53,5	52,8	53,9	40,5	41,5
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	2,55	1,91	2,42	9,31	2,39	3,37
<b>Variační koeficient [%]</b>	4,1	3,6	4,6	17,3	5,9	8,1

*Tabulka 81 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevnosti v tlaku před výpalem a po výpalu v peci*



Graf 21 Porovnání 28denních pevností v tlaku před výpalem v peci a po výpalu v peci

Pro určení rozdílu pevností před výpalem a po výpalu v peci byli použité hodnoty z Tabulek 31, 32, 33 a 34. Výsledky z měření pevnosti v tahu za ohybu po výpalu jsou uvedeny v Tabulce 78 až 81. Na Grafu 21 je vidět, že před výpalem v peci má nejvyšší pevnost v tlaku AAM (62,8 MPa) a nejnižší pevnost má AAM+L (52,8 MPa), AAM+P má pevnost před výpalem 53,5 MPa. Oproti tomu po výpalu v peci má nejnižší pevnost v tlaku AAM+P (40,5 MPa) a nejvyšší pevnost má AAM (53,9 MPa), AAM+L má pevnost 41,5 MPa. Největší rozdíl pevností před a po výpalu tedy vznikl u AAM+P (13 MPa) a nejmenší rozdíl vznikl u AAM (8,9 MPa).

Ze vzorků vypálených v peci má největší směrodatnou odchylku stejně jako u pevnosti v tahu ohybem AAM (17,3%). Je ovšem zajímavé že vzorky 3 a 6, které měly výrazně nižší pevnost v tahu ohybem, nejsou ty, které by měly zároveň výrazně nižší pevnost v tlaku.

### 7.7. Mrazuvzdornost betonu

Mrazuvzdornost je schopnost betonu odolávat opakovanému zmrazování a rozmrazování ve stavu, kdy je nasycen vodou. Pro účely této bakalářské práce se vzorky umístili do zmrazovacího zařízení na 50 cyklů. Dle normy ČSN 73 1322 lze určit, na jaký počet cyklů je beton mrazuvzdorný. Je to ten počet cyklů, při kterém součinitel mrazuvzdornosti je větší nebo roven 75%. Mrazuvzdornost se zkoušela na trácích o stáří 28 dní a rozměrech 160x40x40 mm. Pro stanovení vlivu mrazu na vlastnosti ztvrdlého alkalicky aktivovaného betonu je důležité vytáhnout vzorky z vodní lázně až v den měření a ihned po vytažení je zvážit na digitální váze a poté změřit posuvným měřítkem jejich tři na sebe kolmé



rozměry a z těchto rozměrů vypočítat objem zkoušeného vzorku. Poté se pomocí vztahu (1) vypočítá objemová hmotnost. Vypočítaná hodnota se zaokrouhlí na  $10 \text{ kg/m}^3$ .

Po tomto kroku je možné vzorky vyzkoušet na rychlost prostupu UZ impulzu tak, že se změří čas prostupu ultrazvukového impulzu. Tato hodnota se zapíše a pomocí vztahu (5) se spočítá rychlost prostupu impulzu ultrazvukového vlnění a tato hodnota se zaokrouhlí na  $0,01 \text{ km/s}$ . Dále se vzorky umístili do mrazícího zařízení, ve kterém se střídají cykly zmrazování a rozmrazování. Po uplynutí 50 cyklů se vzorky znovu zvažili a znovu se spočítala jejich objemová hmotnost. Také se u vzorků znovu změřil čas prostupu ultrazvukového impulzu a dopočítala rychlost prostupu.

Nakonec byli vzorky vyzkoušeny na pevnost v tahu ohybem a poté i na pevnost v tlaku. Hodnota, která se zapíše, je maximální síla působící na vzorek a následně se z této hodnoty vypočítá pevnost vzorku pomocí vztahů (2 a 3). Vypočtená hodnota se zaokrouhlí na  $0,1 \text{ MPa}$ . Následně se spočítá součinitel mrazuvzdornosti pro pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. U všech vypočítaných hodnot se vypočítá průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient.

#### 7.7.1. Vliv zkoušky mrazuvzdornosti na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu

AAM							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [ $\text{kg/m}^3$ ]	Hmotnost po mrazáku [kg]	Objemová hmotnost po mrazáku [ $\text{kg/m}^3$ ]
1	41,8	40,0	160,3	615,0	2290	617,5	2300
2	42,6	40,0	160,2	625,4	2290	627,3	2300
3	41,3	40,0	160,8	599,2	2260	601,3	2260
4	41,2	40,1	159,6	600,3	2280	601,4	2280
5	41,2	40,0	159,2	597,8	2280	600,3	2290
6	40,1	40,0	160,1	587,9	2290	590,3	2300
7	41,2	39,9	160,2	609,4	2310	610,8	2320
8	41,2	40,0	161,2	608,5	2290	609,9	2300
9	42,1	40,0	161,0	617,3	2280	618,8	2280
10	40,9	39,9	159,0	587,5	2260	589,8	2270

Tabulka 82 Objemová hmotnost AAM před zkouškou mrazuvzdornosti a po ní

AAM+P							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Hmotnost po mrazáku [kg]	Objemová hmotnost po mrazáku [kg/m <sup>3</sup> ]
1	40,0	39,8	160,3	577,2	2260	580,5	2270
2	40,2	40,1	160,1	581,9	2260	583,7	2260
3	40,0	39,6	160,5	572,9	2250	574,9	2260
4	40,0	39,1	160,8	566,0	2250	568,1	2260
5	40,0	39,5	160,3	569,1	2250	572,2	2260
6	40,0	40,1	160,5	576,5	2240	578,3	2250
7	40,0	39,2	160,2	566,7	2260	567,9	2260
8	40,0	39,5	160,5	571,8	2250	573,0	2260
9	40,0	40,0	160,3	579,2	2260	581,0	2270
10	40,0	40,6	160,6	580,7	2230	583,3	2240

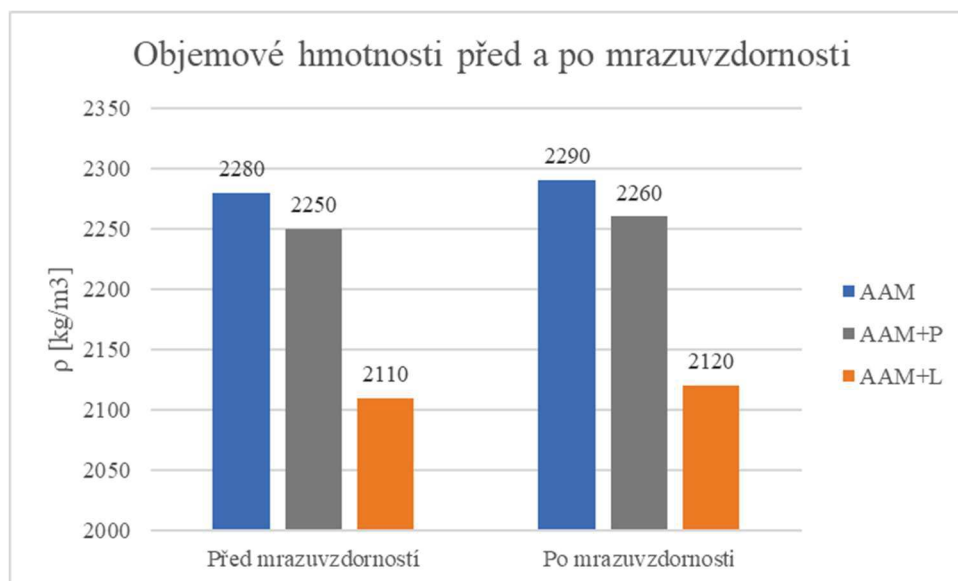
Tabulka 83 Objemová hmotnost AAM+P před zkouškou mrazuvzdornosti a po ní

AAM+L							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Hmotnost po mrazáku [kg]	Objemová hmotnost po mrazáku [kg/m <sup>3</sup> ]
1	41,8	40,3	160,1	569,7	2110	572,8	2130
2	41,6	39,9	160,0	564,1	2120	566,8	2130
3	41,0	40,0	161,3	555,5	2100	558,8	2110
4	39,8	40,1	160,4	542,6	2120	546,6	2140
5	41,0	40,3	160,1	556,6	2110	560,8	2120
6	40,7	40,1	160,2	557,1	2130	559,8	2140
7	41,0	40,1	160,5	550,3	2090	552,5	2090
8	40,7	40,2	160,1	552,2	2110	555,6	2120
9	41,0	40,1	160,3	562,6	2130	567,8	2150
10	40,1	40,3	160,3	540,2	2090	544,4	2100

Tabulka 84 Objemová hmotnost AAM+L před zkouškou mrazuvzdornosti a po ní

	Před mrazuvzdorností			Po mrazuvzdornosti		
	AAM	AAM+P	AAM+L	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2280	2250	2110	2290	2260	2120
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	14,2	9,4	13,7	16,7	8,3	17,9
<b>Variační koeficient [%]</b>	0,6	0,4	0,7	0,7	0,4	0,8

Tabulka 85 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty objemových hmotností před a po mrazuvzdornosti



Graf 22 Porovnání objemových hmotností před a po mrazuvzdornosti

Z Grafu 22 lze určit jednoznačně to, že směs s liaporem má nejnižší objemovou hmotnost o průměrné hodnotě 2110 kg/m<sup>3</sup> (před mrazuvzdorností) a 2120 kg/m<sup>3</sup> (po mrazuvzdornosti), nejvyšší objemovou hmotnost má AAM 2280 kg/m<sup>3</sup> před mrazuvzdorností a 2290 kg/m<sup>3</sup> po mrazuvzdornosti. AAM+P má průměrnou objemovou hmotnost před mrazuvzdorností 2250 kg/m<sup>3</sup> a po mrazuvzdornosti 2260 kg/m<sup>3</sup>. Výsledky z měření objemové hmotnosti po zkoušce mrazuvzdornosti jsou uvedeny v Tabulce 82 až 85.

Objemové hmotnosti všech tří materiálů se zvýšily po mrazuvzdornosti o 10 kg/m<sup>3</sup>. Co se tedy týče objemové hmotnosti, tak zkouška mrazuvzdornosti měla na všechny materiály stejný vliv. Variační koeficienty se po zkoušce mrazuvzdornosti výrazněji nezměnily. Největší variační koeficient po mrazuvzdornosti má AAM+L (0,8%) a nejnižší AAM+P (0,4%).

## 7.7.2. Vliv zkoušky mrazuvzdornosti na rychlost prostupu ultrazvukového impulzu ztvrdlým betonem

AAM		Před mrazuvzdorností					Po mrazuvzdornosti					
Ozn.	Délka [mm]	T [ $\mu$ s]			Průměrné T [ $\mu$ s]	v [km/s]	T [ $\mu$ s]			Průměrné T [ $\mu$ s]	v [km/s]	
1	160,3	36,1	36,2	36,1	36,1	4,44	36,8	36,5	36,6	36,6	4,38	
2	160,2	36,1	36,0	36,2	36,1	4,44	36,7	36,5	36,8	36,7	4,37	
3	160,8	39,0	39,0	39,1	39,0	4,12	38,0	37,9	37,8	37,9	4,24	
4	159,6	36,6	36,7	36,5	36,6	4,36	37,6	37,9	37,6	37,7	4,23	
5	159,2	36,2	36,2	36,3	36,2	4,39	36,1	36,2	36,1	36,1	4,41	
6	160,1	37,4	37,5	37,2	37,4	4,28	37,3	37,3	37,3	37,3	4,29	
7	160,2	36,9	36,8	36,8	36,8	4,35	36,9	36,7	36,6	36,7	4,36	
8	161,2	37,4	37,5	37,3	37,4	4,31	37,5	37,2	37,1	37,3	4,33	
9	161,0	38,9	39,2	38,9	39,0	4,13	37,3	37,4	37,7	37,5	4,30	
10	159,0	37,1	36,8	36,7	36,9	4,31	37,4	37,4	37,2	37,3	4,26	

Tabulka 86 Rychlost prostupu ultrazvukového impulzu před a po zkoušce mrazuvzdornosti AAM

AAM+P		Před mrazuvzdorností					Po mrazuvzdornosti					
Ozn.	Délka [mm]	T [ $\mu$ s]			Průměrné T [ $\mu$ s]	v [km/s]	T [ $\mu$ s]			Průměrné T [ $\mu$ s]	v [km/s]	
1	160,3	40,9	40,9	41,0	40,9	3,92	38,2	37,8	38,1	38,0	4,21	
2	160,1	43,1	43,1	42,9	43,0	3,72	38,2	38,3	38,2	38,2	4,19	
3	160,5	38,5	38,4	38,4	38,4	4,18	38,1	37,9	37,9	38,0	4,23	
4	160,8	43,1	43,0	41,0	42,4	3,80	37,9	37,8	37,9	37,9	4,25	
5	160,3	43,0	43,2	43,1	43,1	3,72	38,1	38,3	38,2	38,2	4,20	
6	160,5	38,8	38,6	38,7	38,7	4,15	38,3	38,2	38,1	38,2	4,20	
7	160,2	37,9	38,0	38,0	38,0	4,22	37,5	37,4	37,4	37,4	4,28	
8	160,5	38,9	38,7	39,0	38,9	4,13	38,2	38,2	38,2	38,2	4,20	
9	160,3	38,5	38,7	40,4	39,2	4,09	37,5	37,6	37,6	37,6	4,27	
10	160,6	39,4	39,0	39,3	39,2	4,09	37,8	37,7	37,8	37,8	4,25	

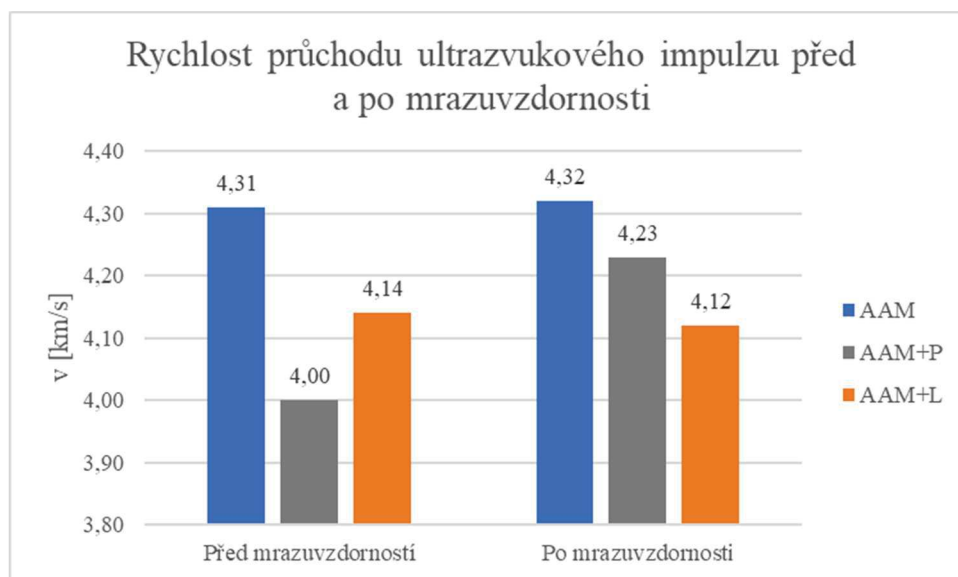
Tabulka 87 Rychlost prostupu ultrazvukového impulzu před a po zkoušce mrazuvzdornosti AAM+P

AAM+L		Před mrazuvzdorností					Po mrazuvzdornosti					
Ozn.	Délka [mm]	T [ $\mu$ s]			Průměrné T [ $\mu$ s]	v [km/s]	T [ $\mu$ s]			Průměrné T [ $\mu$ s]	v [km/s]	
1	160,1	38,0	37,9	37,9	37,9	4,22	38,6	38,7	38,5	38,6	4,15	
2	160,0	38,4	38,2	38,3	38,3	4,18	38,5	38,5	38,6	38,5	4,15	
3	161,3	39,8	39,7	39,5	39,7	4,07	40,0	39,9	39,9	39,9	4,04	
4	160,4	39,0	39,2	38,8	39,0	4,11	39,3	39,2	39,1	39,2	4,09	
5	160,1	38,7	38,5	38,4	38,5	4,15	38,7	38,6	38,7	38,7	4,14	
6	160,2	37,7	37,9	37,6	37,7	4,25	38,3	38,2	38,2	38,2	4,19	
7	160,5	39,0	39,3	39,1	39,1	4,10	39,0	38,9	38,7	38,9	4,13	
8	160,1	38,0	38,1	38,4	38,2	4,19	38,5	38,6	38,4	38,5	4,16	
9	160,3	38,1	38,2	37,8	38,0	4,21	39,3	39,3	39,1	39,2	4,09	
10	160,3	41,3	41,3	41,4	41,3	3,88	39,7	40,1	39,8	39,9	4,02	

Tabulka 88 Rychlost prostupu ultrazvukového impulzu před a po zkoušce mrazuvzdornosti AAM+L

	Před mrazuvzdorností			Po mrazuvzdornosti		
	AAM	AAM+P	AAM+L	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [km/s]</b>	4,31	4,00	4,14	4,32	4,23	4,12
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,11	0,18	0,10	0,06	0,03	0,05
<b>Variační koeficient [%]</b>	2,5	4,6	2,5	1,3	0,7	1,3

Tabulka 89 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty rychlostí prostupu UZ impulzu před a po mrazuvzdornosti



Graf 23 Porovnání rychlostí prostupu UZ impulzu před a po mrazuvzdornosti

Z Grafu 23 lze vyčíst, že na rychlost prostupu UZ impulzu AAM a AAM+L má zkouška mrazuvzdornosti pouze minimální vliv. Rozdíl u vlivu na tyto dva materiály je ten, že u AAM se rychlost zvýšila (o 0,01 km/s) a u AAM+L se snížila (o 0,02 km/s). Na rychlost prostupu AAM+P měla mrazuvzdornost výraznější vliv (zvýšení o 0,23 km/s). Výsledky z měření rychlosti prostupu UZ impulzu po zkoušce mrazuvzdornosti jsou uvedeny v Tabulce 86 až 88.

Na základě znalosti variačních koeficientů z Tabulky 89 je možné říct, že mezi hodnotami v jednotlivých sadách nejsou velké rozptyly. Největší variační koeficient má AAM+P před zkouškou mrazuvzdornosti (4,6%). Nejmenší variační koeficient má AAM+P po zkoušce mrazuvzdornosti (0,7%).

## 7.7.3. Vliv zkoušky mrazuvzdornosti na pevnost v tahu ohybem

AAM							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost po mrazáku [kg]	Objemová hmotnost po mrazáku [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu v ohybu [kN]	Pevnost při tahu v ohybu [MPa]
1	41,8	40,0	160,3	617,5	2300	2,177	4,9
2	42,6	40,0	160,2	627,3	2300	1,846	4,1
3	41,3	40,0	160,8	601,3	2260	2,276	5,2
4	41,2	40,1	159,6	601,4	2280	3,195	7,2
5	41,2	40,0	159,2	600,3	2290	2,432	5,5
6	40,1	40,0	160,1	590,3	2300	2,424	5,7
7	41,2	39,9	160,2	610,8	2320	1,211	2,8
8	41,2	40,0	161,2	609,9	2300	2,471	5,6
9	42,1	40,0	161,0	618,8	2280	2,189	4,9
10	40,9	39,9	159,0	589,8	2270	2,738	6,3

Tabulka 90 Pevnost v tahu ohybem po mrazuvzdornosti AAM

AAM+P							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost po mrazáku [kg]	Objemová hmotnost po mrazáku [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu v ohybu [kN]	Pevnost při tahu v ohybu [MPa]
1	40,0	39,8	160,3	580,5	2270	2,074	4,9
2	40,2	40,1	160,1	583,7	2260	2,055	4,8
3	40,0	39,6	160,5	574,9	2260	1,876	4,5
4	40,0	39,1	160,8	568,1	2260	1,793	4,4
5	40,0	39,5	160,3	572,2	2260	2,204	5,3
6	40,0	40,1	160,5	578,3	2250	2,090	4,9
7	40,0	39,2	160,2	567,9	2260	2,221	5,4
8	40,0	39,5	160,5	573,0	2260	1,617	3,9
9	40,0	40,0	160,3	581,0	2270	1,758	4,1
10	40,0	40,6	160,6	583,3	2240	1,944	4,4

Tabulka 91 Pevnost v tahu ohybem po mrazuvzdornosti AAM+P

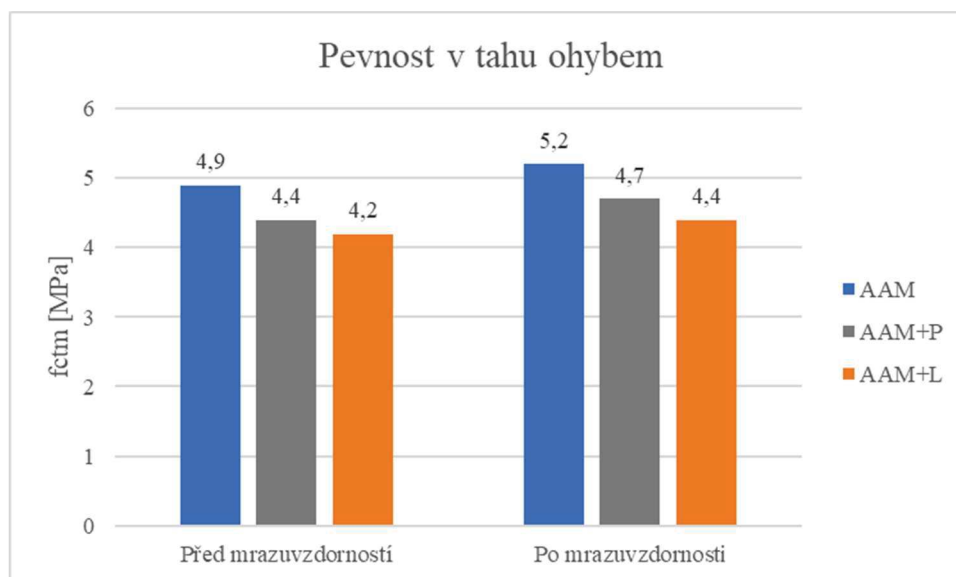
AAM+L							
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost po mrazáku [kg]	Objemová hmotnost po mrazáku [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tahu v ohybu [kN]	Pevnost při tahu v ohybu [MPa]
1	41,8	40,3	160,1	572,8	2130	1,650	3,6
2	41,6	39,9	160,0	566,8	2130	1,839	4,2
3	41,0	40,0	161,3	558,8	2110	2,042	4,7
4	39,8	40,1	160,4	546,6	2140	1,654	3,9
5	41,0	40,3	160,1	560,8	2120	1,408	3,2
6	40,7	40,1	160,2	559,8	2140	2,337	5,4
7	41,0	40,1	160,5	552,5	2090	2,355	5,4
8	40,7	40,2	160,1	555,6	2120	2,339	5,3
9	41,0	40,1	160,3	567,8	2150	1,702	3,9
10	40,1	40,3	160,3	544,4	2100	1,913	4,4

Tabulka 92 Pevnost v tahu ohybem po mrazuvzdornosti AAM+L

Bakalářská práce  
Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

	Před mrazuvzdorností			Po mrazuvzdornosti		
	AAM	AAM+P	AAM+L	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	4,9	4,4	4,2	5,2	4,7	4,4
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	0,4	0,3	0,3	1,2	0,5	0,7
<b>Variační koeficient [%]</b>	8,7	6,9	8,1	22,1	9,9	16,8

*Tabulka 93 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevnosti v tahu ohybem před a po mrazuvzdornosti*



*Graf 24 Porovnání pevnosti v tahu ohybem před a po mrazuvzdornosti*

Pro určení rozdílu pevností před zkouškou mrazuvzdornosti a po ní byli použity hodnoty z Tabulek 54, 55, 56 a 57. Výsledky z měření pevnosti v tahu za ohybu po zkoušce mrazuvzdornosti jsou uvedeny v Tabulce 90 až 93. Na Grafu 24 je vidět, že před zkouškou mrazuvzdornosti má nejvyšší pevnost v tahu ohybem AAM (4,9 MPa) a nejnižší pevnost má AAM+L (4,2 MPa), AAM+P má pevnost před mrazuvzdorností 4,4 MPa. Po mrazuvzdornosti je toto pořadí stejné, ale pevnosti se u všech materiálů zvýšily (viz Graf 24). Největší rozdíl pevností před a po mrazuvzdornosti tedy vznikl u AAM a AAM+P (0,3 MPa) a nejmenší rozdíl vznikl u AAM+L (0,2 MPa). AAM a AAM+L mají větší rozptyl hodnot, a proto i vyšší variační koeficienty AAM (22,1), AAM+L (16,8).

Bakalářská práce  
Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

7.7.4. Vliv zkoušky mrazuvzdornosti na pevnost v tlaku

AAM									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost po mrazáku [kg]	Objemová hmotnost po mrazáku [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	41,8	40,0	160,3	617,5	2300	121,26	122,23	75,8	76,4
2	42,6	40,0	160,2	627,3	2300	122,43	115,18	76,5	72,0
3	41,3	40,0	160,8	601,3	2260	115,48	121,30	72,2	75,8
4	41,2	40,1	159,6	601,4	2280	122,99	120,79	76,9	75,5
5	41,2	40,0	159,2	600,3	2290	110,64	115,20	69,2	72,0
6	40,1	40,0	160,1	590,3	2300	115,84	117,46	72,4	73,4
7	41,2	39,9	160,2	610,8	2320	123,03	124,31	76,9	77,7
8	41,2	40,0	161,2	609,9	2300	114,36	122,20	71,5	76,4
9	42,1	40,0	161,0	618,8	2280	120,71	119,83	75,4	74,9
10	40,9	39,9	159,0	589,8	2270	125,03	119,68	78,1	74,8

*Tabulka 94 Pevnost v tlaku po mrazuvzdornosti AAM*

AAM+P									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost po mrazáku [kg]	Objemová hmotnost po mrazáku [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	40,0	39,8	160,3	580,5	2270	85,70	87,05	53,6	54,4
2	40,2	40,1	160,1	583,7	2260	79,52	84,94	49,7	53,1
3	40,0	39,6	160,5	574,9	2260	79,96	83,40	50,0	52,1
4	40,0	39,1	160,8	568,1	2260	82,67	80,60	51,7	50,4
5	40,0	39,5	160,3	572,2	2260	83,50	84,24	52,2	52,7
6	40,0	40,1	160,5	578,3	2250	86,11	81,14	53,8	50,7
7	40,0	39,2	160,2	567,9	2260	81,45	81,53	50,9	51,0
8	40,0	39,5	160,5	573,0	2260	83,63	77,31	52,3	48,3
9	40,0	40,0	160,3	581,0	2270	80,86	81,44	50,5	50,9
10	40,0	40,6	160,6	583,3	2240	83,79	81,84	52,4	51,2

*Tabulka 95 Pevnost v tlaku po mrazuvzdornosti AAM+P*

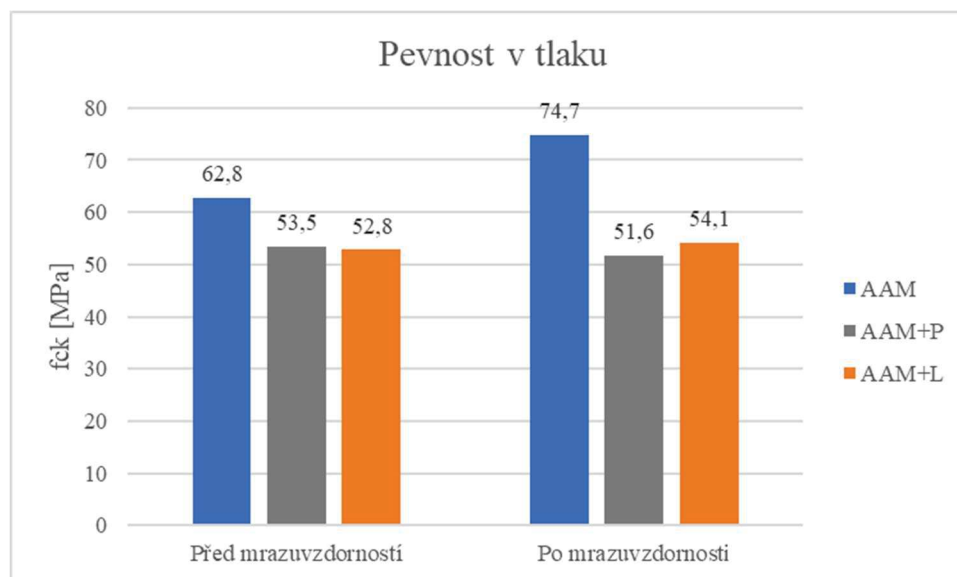


AAM+L									
Ozn.	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Hmotnost po mrazáku [kg]	Objemová hmotnost po mrazáku [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla při tlaku [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
1	41,8	40,3	160,1	572,8	2130	99,33	91,02	62,1	56,9
2	41,6	39,9	160,0	566,8	2130	91,64	101,22	57,3	63,3
3	41,0	40,0	161,3	558,8	2110	86,85	72,94	54,3	45,6
4	39,8	40,1	160,4	546,6	2140	86,77	82,11	54,2	51,3
5	41,0	40,3	160,1	560,8	2120	93,73	92,92	58,6	58,1
6	40,7	40,1	160,2	559,8	2140	89,88	91,04	56,2	56,9
7	41,0	40,1	160,5	552,5	2090	76,96	89,47	48,1	55,9
8	40,7	40,2	160,1	555,6	2120	90,02	89,57	56,3	56,0
9	41,0	40,1	160,3	567,8	2150	79,50	80,91	49,7	50,6
10	40,1	40,3	160,3	544,4	2100	82,40	61,77	51,5	38,6

Tabulka 96 Pevnost v tlaku po mrazuvzdornosti AAM+L

	Před mrazuvzdorností			Po mrazuvzdornosti		
	AAM	AAM+P	AAM+L	AAM	AAM+P	AAM+L
<b>Průměr [MPa]</b>	62,8	53,5	52,8	74,7	51,6	54,1
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	2,55	1,91	2,42	2,4	1,48	5,6
<b>Variační koeficient [%]</b>	4,1	3,6	4,6	3,2	2,9	10,3

Tabulka 97 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevnosti v tlaku před a po mrazuvzdornosti



Graf 25 Porovnání pevnosti v tlaku před a po mrazuvzdornosti

Pro určení rozdílu pevností před zkouškou mrazuvzdornosti a po ní byli použity hodnoty z Tabulek 31, 32, 33 a 34. Výsledky z měření pevnosti v tlaku po zkoušce mrazuvzdornosti jsou uvedeny v Tabulce 94 až 97.

Na Grafu 25 je vidět, že před zkouškou má nejvyšší pevnost v tlaku AAM (62,8 MPa) a nejnižší pevnost má AAM+L (52,8 MPa), AAM+P má pevnost před zkouškou 53,5 MPa. Oproti tomu po zkoušce má nejnižší pevnost v tlaku AAM+P (51,6 MPa) a nejvyšší pevnost má AAM (74,7 MPa), AAM+L má pevnost 54,1 MPa. Největší rozdíl pevností před a po zkoušce tedy vznikl u AAM (nárůst o 11,9 MPa) a nejmenší rozdíl vznikl u AAM+L (nárůst o 1,3 MPa). U AAM+P pevnost klesla o 1,9 MPa. Ze vzorků po zkoušce mrazuvzdornosti má největší směrodatnou odchylku AAM+L (10,3%).

Součinitel mrazuvzdornosti	AAM	AAM+P	AAM+L
Pro pevnost v tahu ohybem [%]	106	107	105
Pro pevnost v tlaku [%]	119	96	102

Tabulka 98 Porovnání součinitelů mrazuvzdornosti

Z Tabulky 98 lze jednoznačně určit to, že zkouška mrazuvzdornosti měla negativní dopad jen na pevnost v tlaku AAM+P. U ostatní materiálů pevnost v tahu ohybem i v tlaku po této zkoušce vzrostla. Pro lepší vyhodnocení mrazuvzdornosti těchto materiálů je zapotřebí ponechat vzorky v mrazícím zařízení na větší množství cyklů, než je 50.

## 7.8. Odolnost povrchu betonu proti působení chemických rozmrazovacích látek

Odolnost proti CHRL byla testována na vzorcích starších než 28 dní. Jednalo se o krychle o délce hrany 100 mm a od každého materiálu byly testovány 4 krychle. Vzorky byly připraveny a testovány tak, jak je uvedeno v bodě 6.7. Vzorky byly umístěny do zkušebního zařízení na 100 cyklů. Na základě normy ČSN 73 1326 lze zařadit povrch zkoušené plochy podle stupně porušení, který se určí podle množství odpadů. Pro stanovení vlivu mrazu na vlastnosti ztvrdlého alkalicky aktivovaného betonu vzorky se vzorky vytáhnou z vodní lázně až v den měření a ihned po vytažení se změří posuvným měřítkem jejich dva na sebe kolmé rozměry (plochu, která se bude testovat). U všech vypočítaných hodnot se vypočítá průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient [20]. Výsledky z měření odolnosti proti CHRL jsou uvedeny v Tabulce 99 až 113.

### 7.8.1. AAM

Ozn.	Zkoušená plocha		
	hloubka [mm]	šířka [mm]	plocha[m <sup>2</sup> ]
1	100,25	96,77	0,01167
2	100,46	100,23	0,01208
3	100,19	100,13	0,01204
4	100,46	100,16	0,01207

Tabulka 99 Zkoušené plochy AAM pro CHRL

Bakalářská práce  
Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

Ozn.	Odpady [g]				celkem
	25. cyklus	50. cyklus	75. cyklus	100. cyklus	
1	7,02	10,59	8,93	7,09	33,63
2	10,26	10,93	9,58	8,97	39,74
3	7,92	11,45	11,64	9,42	40,43
4	8,65	8,55	8,36	6,90	32,46
Průměr	8,46	10,38	9,63	8,10	36,57

*Tabulka 100 Naměřené odpady po jednotlivých cyklech AAM po CHRL*

Ozn.	Odpady [g/m <sup>2</sup> ]				celkem
	0 - 25	25 - 50	50 - 75	75 - 100	
1	601,47	907,35	765,12	607,47	2881,40
2	849,62	905,10	793,31	742,80	3290,82
3	658,07	951,37	967,16	782,70	3359,31
4	716,76	708,47	692,73	571,75	2689,70
Průměr	706,48	868,07	804,58	676,18	3055,31

*Tabulka 101 Odpady na m<sup>2</sup> po jednotlivých cyklech AAM po CHRL*

Ozn.	Odpady celkem [g/m <sup>2</sup> ]			
	0 - 25	0 - 50	0 - 75	0 - 100
1	601,47	1508,82	2273,94	2881,40
2	849,62	1754,72	2548,03	3290,82
3	658,07	1609,44	2576,60	3359,31
4	716,76	1425,22	2117,95	2689,70
Průměr	706,48	1574,55	2379,13	3055,31

*Tabulka 102 Celkové odpady na m<sup>2</sup> AAM po CHRL*

	<b>0 - 25</b>	<b>0 - 50</b>	<b>0 - 75</b>	<b>0 - 100</b>
<b>Průměr</b>	706,5	1574,6	2379,1	3055,3
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	92,1	122,8	191,6	279,2
<b>Variační koeficient [%]</b>	13,0	7,8	8,1	9,1

*Tabulka 103 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty celkových odpadů na m<sup>2</sup> AAM po CHRL*

### 7.8.2. AAM+P

Ozn.	Zkoušená plocha		
	hloubka [mm]	šířka [mm]	plocha [m <sup>2</sup> ]
1	100,0	100,2	0,01202
2	100,1	100,1	0,01202
3	100,2	99,9	0,01201
4	100,4	100,3	0,01208

*Tabulka 104 Zkoušené plochy AAM+P pro CHRL*

Ozn.	Odpady [g]				celkem
	25. cyklus	50. cyklus	75. cyklus	100. cyklus	
1	42,5	26,19	21,53	17,84	108,01
2	34,6	27,09	22,22	17,93	101,83
3	40,5	30,56	22,06	15,86	108,96
4	36,1	27,20	21,68	18,00	102,98
Průměr	38,41	27,76	21,87	17,41	105,45

Tabulka 105 Naměřené odpady po jednotlivých cyklech AAM+P po CHRL

Ozn.	Odpady [g/m <sup>2</sup> ]				celkem
	0 - 25	25 - 50	50 - 75	75 - 100	
1	3531,03	2178,51	1790,88	1483,95	8984,36
2	2877,22	2253,37	1848,28	1491,43	8470,30
3	3370,25	2544,34	1836,65	1320,46	9071,70
4	2989,12	2252,19	1795,13	1490,42	8526,87
Průměr	3191,91	2307,10	1817,74	1446,56	8763,31

Tabulka 106 Odpady na m<sup>2</sup> po jednotlivých cyklech AAM+P po CHRL

Ozn.	Odpady celkem [g/m <sup>2</sup> ]			
	0 - 25	0 - 50	0 - 75	0 - 100
1	3531,03	5709,53	7500,42	8984,36
2	2877,22	5130,59	6978,87	8470,30
3	3370,25	5914,59	7751,24	9071,70
4	2989,12	5241,32	7036,45	8526,87
Průměr	3191,91	5499,01	7316,74	8763,31

Tabulka 107 Celkové odpady na m<sup>2</sup> AAM+P po CHRL

	0 - 25	0 - 50	0 - 75	0 - 100
<b>Průměr</b>	3191,9	5499,0	7316,7	8763,3
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	267,8	323,7	322,2	267,3
<b>Variační koeficient [%]</b>	8,4	5,9	4,4	3,0

Tabulka 108 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty celkových odpadů na m<sup>2</sup> AAM+P po CHRL

## 7.8.3. AAM+L

Ozn.	Zkoušená plocha		
	hloubka [mm]	šířka [mm]	plocha [m <sup>2</sup> ]
1	100,3	100,3	0,01207
2	100,5	100,4	0,0121
3	100,0	99,9	0,01199
4	100,2	100,2	0,01204

Tabulka 109 Zkoušené plochy AAM+L pro CHRL

Bakalářská práce  
Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

Ozn.	Odpady [g]				celkem
	25. cyklus	50. cyklus	75. cyklus	100. cyklus	
1	10,26	10,93	9,58	8,97	39,74
2	7,92	11,45	11,64	9,42	40,43
3	8,35	10,19	10,30	8,70	37,54
4	9,09	12,56	10,75	9,05	41,45
Průměr	8,91	11,28	10,57	9,04	39,79

*Tabulka 110 Naměřené odpady po jednotlivých cyklech AAM+L po CHRL*

Ozn.	Odpady [g/m <sup>2</sup> ]				celkem
	0 - 25	25 - 50	50 - 75	75 - 100	
1	850,32	905,84	793,96	743,41	3293,53
2	654,59	946,34	962,05	778,56	3341,54
3	696,47	849,95	859,12	725,67	3131,20
4	754,73	1042,84	892,56	751,41	3441,54
Průměr	739,03	936,24	876,92	749,76	3301,95

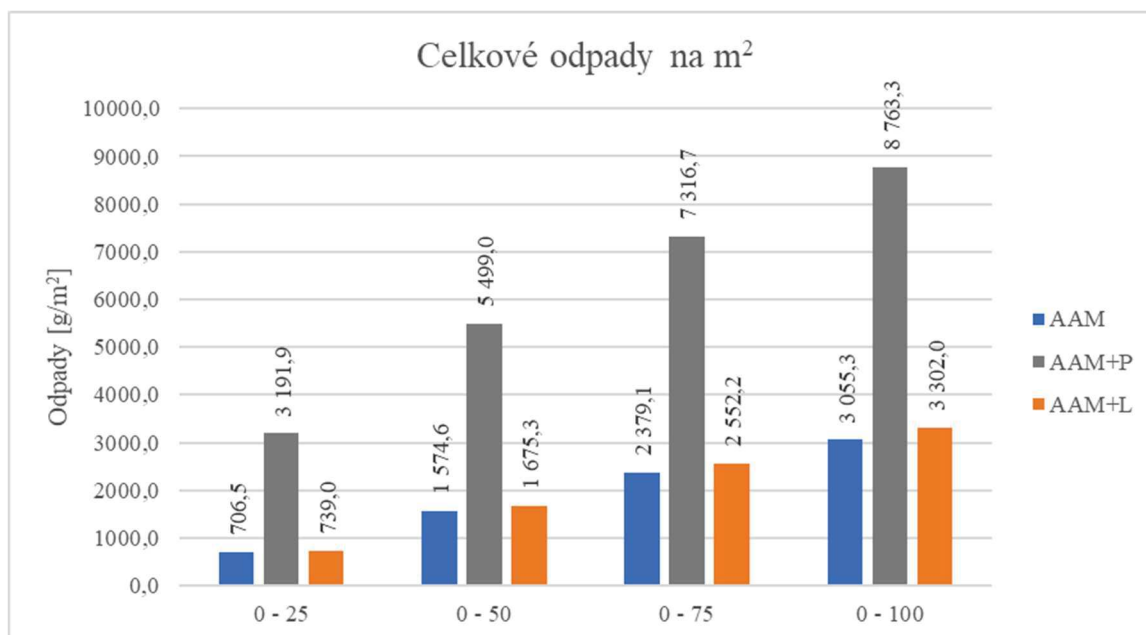
*Tabulka 111 Odpady na m<sup>2</sup> po jednotlivých cyklech AAM+L po CHRL*

Ozn.	Odpady celkem [g/m <sup>2</sup> ]			
	0 - 25	0 - 50	0 - 75	0 - 100
1	850,32	1756,16	2550,12	3293,53
2	654,59	1600,93	2562,98	3341,54
3	696,47	1546,42	2405,54	3131,20
4	754,73	1797,57	2690,13	3441,54
Průměr	739,03	1675,27	2552,19	3301,95

*Tabulka 112 Celkové odpady na m<sup>2</sup> AAM+L po CHRL*

	<b>0 - 25</b>	<b>0 - 50</b>	<b>0 - 75</b>	<b>0 - 100</b>
<b>Průměr</b>	739,0	1675,3	2552,2	3302,0
<b>Směrodatná odchylka [-]</b>	73,4	104,4	100,8	112,1
<b>Variační koeficient [%]</b>	9,9	6,2	4,0	3,4

*Tabulka 113 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty celkových odpadů na m<sup>2</sup> AAM+L po CHRL*

Graf 26 Porovnání celkových odpadů na m<sup>2</sup> mezi materiály

Dle ČSN 73 1326 lze určit, že po prvních 25 cyklech měly AAM a AAM+L stupeň porušení 3 (narušené). AAM+P měl už po 25 cyklech stupeň narušení 5 (rozpadlý) a jeho odpady se dál zvyšovaly, proto o něm není dále zmíněno. Po 50 a 75 cyklech měly AAM a AAM+L stupeň narušení 4 (silně narušený) a po 100 cyklech měly tyto dva materiály stupeň narušení 5 (rozpadlý). Viz Graf 26 [20].

## 8. Vlastnosti čerstvé alkalicky aktivované betonové směsi

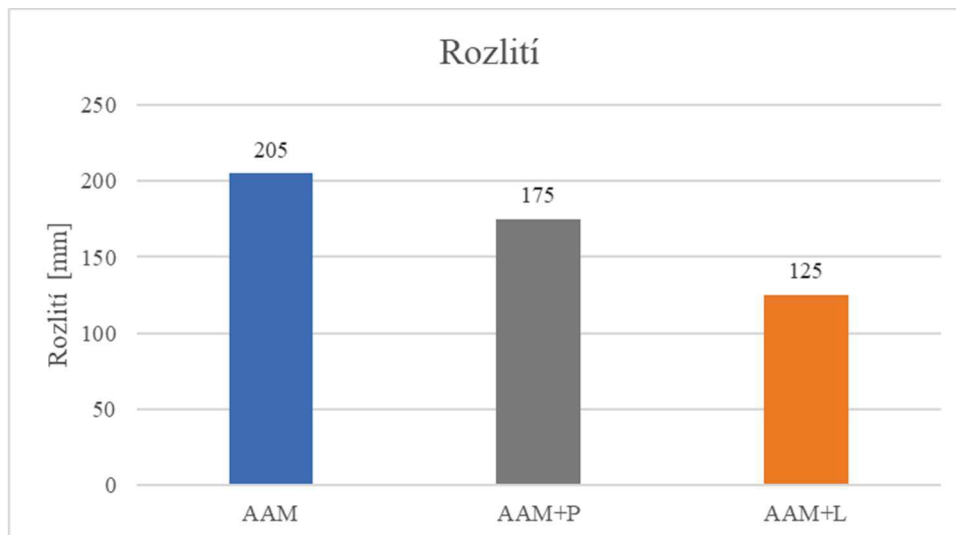
Na čerstvé betonové směsi se zkoušela pouze konzistence rozlitím. Tuto zkoušku, ale není možné vyhodnotit zařazením směsi do stupně konzistence podle normy, protože byl použitý postup, který se neshoduje s žádnou normou.

Pro měření byl použitý menší kužel, který se běžně používá pro měření konzistence malt na střešacím stolku. Navlhčila se plocha (využil se vibrační stolek) pro umístění kužele a také samotný kužel. Poté se kužel naplnil čerstvou směsí a lehce se ručně ztuhlil a zarovnal po okraj kužele. Následně se kužel zvedli kolmo vzhůru a počkalo se, než se koláč rozlité směsi přestane zvětšovat. Následně se koláč změřil (viz Obrázek 12) ve dvou na sebe kolmých směrech a vypočítal se jeho průměr. Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 114 a porovnání jednotlivých materiálů je v Grafu 27.

Bakalářská práce  
Vybrané mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného betonu s ohledem na zpracování

	AAM	AAM+P	AAM+L
Hodnota 1	20	18	13
Hodnota 2	21	17	12
Průměr	20,5	17,5	12,5

Tabulka 114 Konzistence rozlitím



Graf 27 Porovnání rozlití



Obrázek 12 Měření rozlití, zdroj: vlastní

## 9. Závěr

Bakalářská práce se věnuje stanovení a hodnocení vybraných mechanických vlastností tří různých receptur alkalicky aktivovaného betonu. První receptura AAM je základem pro dvě další receptury, které jsou jen mírně upravené. AAM+P je upravený v tom, že místo 30 % Strusky JMŠ 420 byl přidán Popílek Dětmárovice. U AAM+L byla část drobného kameniva nahrazena lehčeným kamenivem Liapor 1/4, 500 v množství 81 kg na 1m<sup>3</sup> směsi.

Teoretická část bakalářské práce slouží pro základní seznámení se s problematikou alkalicky aktivovaných materiálů. Jsou zde popsány základní suroviny pro výrobu AAM, stručná historie těchto materiálů. V teoretické části jsou také popsány základní principy zkoušek ztvrdlého betonu.

Experimentální část se věnuje vlastnostem třech vyrobených receptur alkalicky aktivovaného betonu. Je zde rozebráno zkoušení těchto vlastností, jejich hodnocení a také porovnání jednotlivých vlastností těchto tří materiálů.

První zkoušenou vlastností byla objemová hmotnost. Podle průměrných hodnot má nejnížší objemovou hmotnost AAM+L (2110 kg/m<sup>3</sup>) a nejvyšší objemovou hmotnost má AAM (2240 kg/m<sup>3</sup>), objemová hmotnost AAM+P je 2230 kg/m<sup>3</sup>.

Při stanovení pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu zkoušené na trámcích o rozměrech 40x40x160 mm nelze považovat odbedňovací pevnosti za směrodatné, protože vzorky AAM+L byly odbedněny po 3 dnech a vzorky zbylých dvou materiálů již po dvou dnech. Z toho důvodu je mezi jejich výslednými pevnostmi tak výrazný rozdíl. Vzorky AAM+L dosáhly největších odbedňovacích pevností (12,0 MPa v tlaku a 1,8 MPa v tahu za ohybu). Nejnižších odbedňovacích pevností pak dosáhl AAM (1,7 MPa v tlaku a 0,3 MPa v tahu za ohybu) a AAM+P dosáhl odbedňovací pevnosti v tlaku 1,8 MPa a v tahu za ohybu 0,4 MPa.

U pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu zkoušené po 14 a 28 dnech na trámcích o rozměrech 40x40x160 mm měly nejvyšší pevnosti vzorky AAM a nejnížší vzorky AAM+P. Stejně tomu bylo i při zkoušení pevnosti v tlaku u vzorků krychlí o délce hrany 100 mm zkoušených po 28 dnech. Rozdíl byl ovšem při zkoušení pevnosti v tlaku na krychlích o délce hrany 150 mm, zde měly největší pevnost vzorky AAM (60,1 MPa) a nejnížší pevnost vzorky AAM+L (51,4 MPa), vzorky AAM+P měly pevnost 53,8 MPa.

Co se týče pevnosti v příčném tahu zkoušené na krychlích o délce hrany 150 mm, tak nejvyšší pevnosti dosáhly vzorky AAM (6,20 MPa) a nejnížší vzorky AAM+L (4,50 MPa).



Vzorky AAM+P měly pevnost 4,70 MPa. Největší nárůst pevnosti měly všechny materiály mezi odbedněním a 14. dnem. Také byl zkoušen dynamický modul pružnosti, kde dosáhl nejvyšší hodnoty AAM (32,5 GPa) a nejnižší hodnoty AAM+P (27,4 GPa).

Dále jsem zjišťoval vliv zvýšené teploty na vlastnosti AA betonu. Použili jsme vzorky trámců o rozměrech 40x40x160 mm, které jsme umístili do pece na výpal o maximální teplotě 500 °C. Všem materiálům se snížila objemová hmotnost, nejvíce pak AAM+L (o 30 kg/m<sup>3</sup>). Stejně tak se u všech vzorků snížila i rychlost prostupu UZ impulsu téměř o 50 %. Pevnost v tahu za ohybu se také u všech materiálů snížila. Nejvyšší pevnosti po výpalu v peci dosáhl AAM+L (2,0 MPa) a nejnižší pevnosti dosáhl AAM (1,8 MPa). Pevnost v tlaku se také snížila u všech materiálů, kdy nejvyšší pevnost měl AAM (53,9 MPa) a nejnižší AAM+P (41,5 MPa). Dá se tedy říct, že z těchto tří materiálů má nejhorší odolnost proti působení vysokých teplot materiál s popílkem.

Dále jsem zjišťoval vliv zkoušky mrazuvzdornosti na vlastnosti AA betonu. Použili jsme vzorky trámců o rozměrech 40x40x160 mm, které jsme umístili do zmrazovacího zařízení a nechali jsme je po dobu 50 cyklů. Všem materiálům se zvýšila objemová hmotnost o 10 kg/m<sup>3</sup>. Rychlost prostupu UZ impulsu se u AAM zvýšila (o 0,01 km/s) a u AAM+L se snížila (o 0,02 km/s). Na rychlost prostupu AAM+P měla mrazuvzdornost výraznější vliv (zvýšení o 0,23 km/s). Pevnost v tahu za ohybu se také u všech materiálů zvýšila. Nejvyšší pevnosti po výpalu v peci dosáhl AAM (5,2 MPa) a nejnižší pevnosti dosáhl AAM+L (4,4 MPa). Pevnost v tlaku se zvýšila u AAM o 19 %, u AAM+L o 3 % a pevnost v tlaku AAM+P se snížila o 3 %. Dá se tedy říct, že z těchto tří materiálů má nejlepší odolnost proti působení mrazu AAM.

Nejhorší odolnost proti působení CHRL měl AAM+P, který měl stupeň narušení 5 hned po prvních 25 cyklech. AAM a AAM+L měly po prvních 25 cyklech stupeň narušení 3, po 50 cyklech stupeň narušení 4 a po 100 cyklech stupeň narušení 5. AAM měl po všech měřených cyklech nižší odpady než AAM+L, a proto můžeme říct, že nejlépe odolával působení CHRL AAM.

Nejlépe zpracovatelnou směsí byla směs AAM, která měla rozlité při zkoušce konzistence největší, a to 20,5 cm. Nejhůř zpracovatelná pak byla směs AAM+L s rozlitem 12,5 cm.

## 10. Seznam zdrojů

- [1] ŠAFÁŘ, Martin. Trvanlivost alkalicky aktivovaných systémů [online]. Brno, 2015 [cit. 2023-2-27]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=99329#page9](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=99329#page9)
- [2] ALBLOVÁ, Nikol. Vlastnosti materiálů na bázi alkalicky aktivovaného cihelného prachu [online]. Praha, 2017 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68030/F1-DP-2017-Alblova-Nikol-123DPM\\_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68030/F1-DP-2017-Alblova-Nikol-123DPM_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [3] BOHÁČOVÁ, Jana, Stanislav STANĚK a Martin VAVRO. Možnosti aplikace alkalicky aktivovaných systémů ve stavebnictví. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada stavební c. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012, 12(2), 49-58. ISSN 1213-1962.
- [4] MIZEROVÁ, Cecílie. Směsná alkalicky aktivovaná aluminosilikátová pojiva [online]. Brno, 2016 [cit. 2023-2-18]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/44406369.pdf>
- [5] ŠKVÁRA, František. Alkalicky aktivované materiály geopolymery [online]. Praha, 2007 [cit. 2023-3-5]. Dostupné z: [https://old.vscht.cz/sil/pojiva/geo\\_2007.pdf](https://old.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf)
- [6] PROVIS, John L. a Jan Stephanus Jakob VAN DEVENTER, ed. Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications. Boca Raton: CRC Press; Oxford, 2009. Woodhead publishing in materials. ISBN 978-1-4398-0970-9.
- [7] Popílek – vlastnosti [online]. BETON TKS, s. r. o., 2021 [cit. 2023-2-18]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/popilek/>
- [8] LAPISZ, Břetislav. Struska z huti? Když je kvalitní, dá se využít i při stavbě silnic [online]. Moravskoslezský deník, 2015 [cit. 2023-3-17]. Dostupné z: <https://moravskoslezsky.denik.cz/podnikani/struska-z-huti-kdyz-je-kvalitni-da-se-vyuzit-i-pri-stavbe-silnic-20150207.html>
- [9] SLIZKOVÁ, Zuzana. Článek VAPO [online]. [cit. 2023-3-17]. Dostupné z: <http://www.studioaxis.cz/images/pamatky/slizkovazuzana.pdf>
- [10] HOLUB, Petr. Vliv aktivních příměsí na vybrané vlastnosti cementových kompozitů vytvrzovaných za různých hydrotermálních podmínek [online]. Praha, 2018 [cit. 2023-3-20]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74558/F1-DP-2018-Holub-Petr-DP.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>

- [11] JANČAŘÍKOVÁ, Denisa. Stanovení možností zvyšování vazného potenciálu el. Popílků pro výrobu cementových kompozitů [online]. Brno, 2017 [cit. 2023-3-13]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=183679](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=183679)
- [12] ŠÁDKOVÁ, Kateřina. Strusky a popílký jako alternativní hydraulická pojiva pro užití v dopravním stavitelství [online]. Praha, 2020 [cit. 2023-3-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/88916/F1-BP-2020-Vokalova-Katerina-BP%20Sadkova.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [13] PROVIS, John L. a Jan Stephanus Jakob VAN DEVENTER, ed. Alkali activated materials: state-of-the-art-report, RILEM TC 224-AAM. Dordrecht: Springer, [2014]. RILEM state of the art reports, Volume 13. ISBN 978-94-007-7671-5.
- [14] ČSN EN 12390-7. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [15] ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [16] ČSN EN 12390-5. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [17] ČSN EN 12390-6. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [18] ČSN 73 1371. Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [19] ČSN 73 1322. Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1968.
- [20] ČSN 73 1326. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1984.

## 11. Seznam obrázků

Obrázek 1: Vliv koncentrace roztoku na viskozitu [6] .....	8
Obrázek 2 Schéma zkoušky pevnosti v tlaku.....	12
Obrázek 3 Schéma zkoušky pevnosti v tahu tříbodovým ohybem .....	13
Obrázek 4 Schéma zkoušky pevnosti v tahu čtyřbodovým ohybem.....	13
Obrázek 5 Schéma zkoušky pevnosti v příčném tahu.....	14
Obrázek 7 Typické porušení vzorku při zkoušce pevnosti v tlaku .....	24
Obrázek 6 Polovina trámce připravená na zkoušku pevnosti v tlaku, zdroj: vlastní .....	24
Obrázek 8 Krychle o hraně 150 mm po zkoušce pevnosti v tlaku, zdroj: vlastní.....	30
Obrázek 9 Krychle o hraně 150 mm připravená na zkoušku pevnosti v tlaku, zdroj: vlastní..	30
Obrázek 10 Krychle o hraně 150 mm po zkoušce pevnosti v příčném tahu, zdroj: vlastní.....	41
Obrázek 11 Krychle o hraně 150 mm připravená na zkoušku pevnosti v příčném tahu, zdroj: vlastní .....	41
Obrázek 12 Měření rozlité, zdroj: vlastní .....	68

## 12. Seznam grafů

Graf 1 Porovnání objemových hmotností .....	23
Graf 2 Porovnání odbedňovacích pevností v tlaku .....	25
Graf 3 Porovnání 14denních pevností v tlaku.....	27
Graf 4 Porovnání 28denních pevností v tlaku.....	28
Graf 5 Porovnání 28denních pevností v tlaku na krychlích o hraně 100 mm.....	30
Graf 6 Porovnání 28denních pevností v tlaku.....	32
Graf 7 Vývoj pevnosti v tlaku AAM.....	32
Graf 8 Vývoj pevnosti v tlaku AAM+P .....	33
Graf 9 Vývoj pevnosti v tlaku AAM+L .....	33
Graf 10 Porovnání odbedňovacích pevností v tahu ohybem.....	35
Graf 11 Porovnání 14denních pevností v tahu ohybem .....	37
Graf 12 Porovnání 28denních pevností v tahu ohybem .....	38
Graf 13 Vývoj pevnosti v tahu ohybem AAM.....	39
Graf 14 Vývoj pevnosti v tahu ohybem AAM+P .....	39
Graf 15 Vývoj pevnosti v tahu ohybem AAM+L .....	40
Graf 16 Porovnání 28denních pevností v příčném tahu.....	42
Graf 17 Porovnání 28denních dynamických modulů pružnosti.....	45
Graf 18 Porovnání 28denních objemových hmotností před výpalem v peci a po výpalu v peci .....	47
Graf 19 Porovnání 28denních rychlostí prostupu UZ impulzu před výpalem v peci a po výpalu v peci .....	48
Graf 20 Porovnání 28denních pevností v tahu ohybem před výpalem v peci a po výpalu v peci .....	51
Graf 21 Porovnání 28denních pevností v tlaku před výpalem v peci a po výpalu v peci .....	53
Graf 22 Porovnání objemových hmotností před a po mrazuvzdornosti.....	56
Graf 23 Porovnání rychlostí prostupu UZ impulzu před a po mrazuvzdornosti.....	58
Graf 24 Porovnání pevnosti v tahu ohybem před a po mrazuvzdornosti.....	60
Graf 25 Porovnání pevnosti v tlaku před a po mrazuvzdornosti.....	62
Graf 26 Porovnání celkových odpadů na m <sup>2</sup> mezi materiály.....	67
Graf 27 Porovnání rozlítí.....	68

### 13. Seznam tabulek

Tabulka 1 Zařídění povrchů zkušebních ploch [20] .....	16
Tabulka 2 Receptura AAM .....	17
Tabulka 3 Receptura AAM+P .....	18
Tabulka 4 Receptura AAM+L .....	18
Tabulka 5 Objemová hmotnost trámců po 2 dnech .....	19
Tabulka 6 Objemová hmotnost trámců po 14 dnech .....	19
Tabulka 7 Objemová hmotnost trámců po 28 dnech .....	19
Tabulka 8 Objemová hmotnost krychlí o hraně 100 mm .....	19
Tabulka 9 Objemová hmotnost krychlí o hraně 150 mm .....	20
Tabulka 10 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty objemových hmotností .....	20
Tabulka 11 Objemová hmotnost trámců po 2 dnech .....	20
Tabulka 12 Objemová hmotnost trámců po 14 dnech .....	20
Tabulka 13 Objemová hmotnost trámců po 28 dnech .....	21
Tabulka 14 Objemová hmotnost krychlí o hraně 100 mm .....	21
Tabulka 15 Objemová hmotnost krychlí o hraně 150 mm .....	21
Tabulka 16 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty objemových hmotností .....	21
Tabulka 17 Objemová hmotnost trámců po 3 dnech .....	22
Tabulka 18 Objemová hmotnost trámců po 14 dnech .....	22
Tabulka 19 Objemová hmotnost trámců po 28 dnech .....	22
Tabulka 20 Objemová hmotnost krychlí o hraně 100 mm .....	22
Tabulka 21 Objemová hmotnost krychlí o hraně 150 mm .....	23
Tabulka 22 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty objemových hmotností .....	23
Tabulka 23 Pevnost v tlaku AAM po 2 dnech .....	24
Tabulka 24 Pevnost v tlaku AAM+P po 2 dnech .....	25
Tabulka 25 Pevnost v tlaku AAM+L po 2 dnech .....	25
Tabulka 26 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tlaku po odbednění .....	25
Tabulka 27 Pevnost v tlaku AAM po 14 dnech .....	26
Tabulka 28 Pevnost v tlaku AAM+P po 14 dnech .....	26

Tabulka 29 Pevnost v tlaku AAM+L po 14 dnech.....	26
Tabulka 30 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tlaku po 14 dnech .....	26
Tabulka 31 Pevnost v tlaku AAM po 28 dnech .....	27
Tabulka 32 Pevnost v tlaku AAM+P po 28 dnech.....	27
Tabulka 33 Pevnost v tlaku AAM+P po 28 dnech.....	28
Tabulka 34 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tlaku po 28 dnech .....	28
Tabulka 35 Pevnost v tlaku AAM po 28 dnech .....	29
Tabulka 36 Pevnost v tlaku AAM+P po 28 dnech.....	29
Tabulka 37 Pevnost v tlaku AAM+L po 28 dnech.....	29
Tabulka 38 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tlaku po 28 dnech .....	29
Tabulka 39 Pevnost v tlaku AAM po 28 dnech .....	31
Tabulka 40 Pevnost v tlaku AAM+P po 28 dnech.....	31
Tabulka 41 Pevnost v tlaku AAM+L po 28 dnech.....	31
Tabulka 42 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tlaku po 28 dnech .....	31
Tabulka 43 Vývoj pevnosti v tlaku AAM.....	32
Tabulka 44 Vývoj pevnosti v tlaku AAM+P .....	32
Tabulka 45 Vývoj pevnosti v tlaku AAM+L .....	33
Tabulka 46 Pevnost v tahu ohybem AAM po 2 dnech .....	34
Tabulka 47 Pevnost v tahu ohybem AAM+P po 2 dnech.....	35
Tabulka 48 Pevnost v tahu ohybem AAM+L po 3 dnech.....	35
Tabulka 49 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tahu ohybem po 2-3 dnech .....	35
Tabulka 50 Pevnost v tahu ohybem AAM po 14 dnech .....	36
Tabulka 51 Pevnost v tahu ohybem AAM+P po 14 dnech.....	36
Tabulka 52 Pevnost v tahu ohybem AAM+L po 14 dnech.....	36
Tabulka 53 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tahu ohybem po 14 dnech .....	36
Tabulka 54 Pevnost v tahu ohybem AAM po 28 dnech .....	37
Tabulka 55 Pevnost v tahu ohybem AAM+P po 28 dnech.....	37

Tabulka 56 Pevnost v tahu ohybem AAM+L po 28 dnech.....	38
Tabulka 57 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v tahu ohybem po 28 dnech .....	38
Tabulka 58 Vývoj pevnosti v tahu ohybem AAM .....	38
Tabulka 59 Vývoj pevnosti v tahu ohybem AAM+P.....	39
Tabulka 60 Vývoj pevnosti v tahu ohybem AAM+L .....	39
Tabulka 61 Pevnost v příčném tahu AAM po 28 dnech .....	41
Tabulka 62 Pevnost v příčném tahu AAM+P po 28 dnech.....	42
Tabulka 63 Pevnost v příčném tahu AAM+L po 28 dnech.....	42
Tabulka 64 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevností v příčném tahu po 28 dnech .....	42
Tabulka 65 Dynamický modul pružnosti AAM po 28 dnech .....	43
Tabulka 66 Dynamický modul pružnosti AAM+P po 28 dnech.....	44
Tabulka 67 Dynamický modul pružnosti AAM+L po 28 dnech .....	44
Tabulka 68 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty dynamický modul pružnosti po 28 dnech .....	44
Tabulka 69 Objemové hmotnosti před výpalem a po výpalu v peci AAM po 28 dnech.....	46
Tabulka 70 Objemové hmotnosti před výpalem a po výpalu v peci AAM+P po 28 dnech.....	46
Tabulka 71 Objemové hmotnosti před výpalem a po výpalu v peci AAM+L po 28 dnech ....	47
Tabulka 72 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty objemových hmotností před výpalem a po výpalu v peci.....	47
Tabulka 73 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty rychlosti prostupu ultrazvukového impulzu před výpalem a po výpalu v peci.....	48
Tabulka 74 Pevnost v tahu ohybem po výpalu v peci AAM po 28 dnech.....	49
Tabulka 75 Pevnost v tahu ohybem po výpalu v peci AAM+P po 28 dnech .....	50
Tabulka 76 Pevnost v tahu ohybem po výpalu v peci AAM+L po 28 dnech .....	50
Tabulka 77 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevnosti v tahu ohybem před výpalem a po výpalu v peci.....	50
Tabulka 78 Pevnost v tlaku po výpalu v peci AAM po 28 dnech.....	51
Tabulka 79 Pevnost v tlaku po výpalu v peci AAM+P po 28 dnech .....	52
Tabulka 80 Pevnost v tlaku po výpalu v peci AAM+L po 28 dnech .....	52
Tabulka 81 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevnosti v tlaku před výpalem a po výpalu v peci.....	52



Tabulka 82 Objemová hmotnost AAM před zkouškou mrazuvzdornosti a po ní.....	54
Tabulka 83 Objemová hmotnost AAM+P před zkouškou mrazuvzdornosti a po ní .....	55
Tabulka 84 Objemová hmotnost AAM+L před zkouškou mrazuvzdornosti a po ní.....	55
Tabulka 85 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty objemových hmotností před a po mrazuvzdornosti .....	55
Tabulka 86 Rychlost prostupu ultrazvukového impulsu před a po zkoušce mrazuvzdornosti AAM.....	57
Tabulka 87 Rychlost prostupu ultrazvukového impulsu před a po zkoušce mrazuvzdornosti AAM+P .....	57
Tabulka 88 Rychlost prostupu ultrazvukového impulsu před a po zkoušce mrazuvzdornosti AAM+L.....	57
Tabulka 89 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty rychlostí prostupu UZ impulsu před a po mrazuvzdornosti.....	58
Tabulka 90 Pevnost v tahu ohybem po mrazuvzdornosti AAM .....	59
Tabulka 91 Pevnost v tahu ohybem po mrazuvzdornosti AAM+P.....	59
Tabulka 92 Pevnost v tahu ohybem po mrazuvzdornosti AAM+L .....	59
Tabulka 93 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevnosti v tahu ohybem před a po mrazuvzdornosti .....	60
Tabulka 94 Pevnost v tlaku po mrazuvzdornosti AAM.....	61
Tabulka 95 Pevnost v tlaku po mrazuvzdornosti AAM+P .....	61
Tabulka 96 Pevnost v tlaku po mrazuvzdornosti AAM+L .....	62
Tabulka 97 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty pevnosti v tlaku před a po mrazuvzdornosti .....	62
Tabulka 98 Porovnání součinitelů mrazuvzdornosti .....	63
Tabulka 99 Zkoušené plochy AAM pro CHRL .....	63
Tabulka 100 Naměřené odpady po jednotlivých cyklech AAM po CHRL .....	64
Tabulka 101 Odpady na m <sup>2</sup> po jednotlivých cyklech AAM po CHRL .....	64
Tabulka 102 Celkové odpady na m <sup>2</sup> AAM po CHRL .....	64
Tabulka 103 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty celkových odpadů na m <sup>2</sup> AAM po CHRL.....	64
Tabulka 104 Zkoušené plochy AAM+P pro CHRL.....	64
Tabulka 105 Naměřené odpady po jednotlivých cyklech AAM+P po CHRL.....	65
Tabulka 106 Odpady na m <sup>2</sup> po jednotlivých cyklech AAM+P po CHRL.....	65

Tabulka 107 Celkové odpady na m <sup>2</sup> AAM+P po CHRL .....	65
Tabulka 108 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty celkových odpadů na m <sup>2</sup> AAM+P po CHRL .....	65
Tabulka 109 Zkoušené plochy AAM+L pro CHRL .....	65
Tabulka 110 Naměřené odpady po jednotlivých cyklech AAM+L po CHRL .....	66
Tabulka 111 Odpady na m <sup>2</sup> po jednotlivých cyklech AAM+L po CHRL.....	66
Tabulka 112 Celkové odpady na m <sup>2</sup> AAM+L po CHRL.....	66
Tabulka 113 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační koeficienty celkových odpadů na m <sup>2</sup> AAM+L po CHRL .....	66
Tabulka 114 Konzistence rozlitím .....	68