

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STAVEBNÍ



DIPLOMOVÁ
PRÁCE

2020

JANA
HAVLÍKOVÁ

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STAVEBNÍ



DIPLOMOVÁ
PRÁCE

VLIV TERMOPLASTŮ NA
PEVNOST BETONU

2020

Bc. Jana HAVLÍKOVÁ

Vedoucí diplomové práce:
Ing. Miloslava POPENKOVÁ, CSc

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Havlíková Jméno: Jana Osobní číslo: 409792
Zadávající katedra: Katedra technologie staveb (K122)
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Příprava, realizace a provoz staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv termoplastů na pevnost betonu
Název diplomové práce anglicky: Influence of thermoplastics on strength of concrete
Pokyny pro vypracování:
Úvod do problematiky
Teoretická část
Experimentální část
 Suroviny pro zkoušky
 Příprava směsí pro výrobu zkušebních tělísek
Vyhodnocení a možnosti využití
Závěr
Literatura
Seznam doporučené literatury:
Technologie betonu, Pytlík Petr; Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete, Foti Dora; Stavební hmoty, Svoboda Luboš; ČSN EN 206 +A1 - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, Plasty pro architekturu a stavitelství 6 - recyklace plastů, Vejražková Ivana
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Miloslava Popenková, CSc.
Datum zadání diplomové práce: 27.9.2019 Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku
.....
Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

.....
Datum převzetí zadání

.....
Podpis studenta(ky)

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne 3.1.2020

Bc. Jana Havlíková

PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji Ing. Miloslavě Popenkové, CSc. za vedení této diplomové práce, dále společnosti WANSIDA Int. s.r.o. za poskytnutí drti odpadních plastů použité na provedené zkoušky, společnosti Českomoravský cement, a. s. za poskytnutí cementu pevnostní třídy 52,5 použitého na provedené zkoušky a střední průmyslové škole stavební Josefa Gočára za poskytnutí prostor a zkušebních strojů.

Vliv termoplastů na pevnost betonu

**Influence of thermoplastics on strength of
concrete**

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá možností využití drti z odpadních termoplastů jejím přídavkem do cementového kompozitu. Analyzovány byly dva druhy odpadních plastů, polyethylentereftalát a polyethylen. Tyto drti se přidávaly do směsí v různých objemových poměrech a pro zkoušky byly použity cementy různých pevnostních tříd. Část zatuhlých vzorků byla následně zahřáta a byla sledována možnost zvýšení pevnosti roztavením plastů, které se stávají součástí pojiva kompozitu. Na hotových vzorcích se následně sledovaly jejich hlavní mechanické vlastnosti významné pro použití pro stavební výrobky (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a u části vzorků nasákavost).

Výsledkem práce je vyhodnocení dopadu přídavku plastů na mechanické vlastnosti kompozitu a stanovení množství přidaných plastů pro dosažení optimálních vlastností.

Klíčová slova

Recyklace, zkouška, pevnost, polyethylentereftalát, polyethylen, beton, kompozit, vzorek.

Annotation

This thesis is focused on the possibilities how to use crushed thermoplastic waste as an additives in the concrete composite. Two types of the plastics were tested, polyethyleneterephthalate and polyethylene. These plastic crumbs were added in the concrete mixes in various volumetric ratios (v/v) and concretes from different strength classes were used for the listed testings. One part of the solidified samples was then heated up to monitor the possibility of increasing the strength the concrete because of the melting of the plastic parts, which are the part of the binder of composite. On the final concrete samples, the main mechanical properties were examined, which are important for the usage of construction products (strength in the pressure, tensile strength and water absorption).

The aim of the work is the evaluation how the plastic addition does affect the mechanical properties of the composite and also the determination of the appropriate amount of the added plastic crumb to get the optimal concrete properties.

Key Words

Recycling, test, strength, polyethyleneterephthalate, polyethylene, concrete, composite, sample.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Teoretická část	10
2.1. Cement	10
2.1.1. Druhy cementů	10
2.1.2. Výroba cementu	12
2.1.3. Portlandský cement	13
2.1.4. Portlandský směsný cement	13
2.1.5. Vlastnosti cementu	14
2.2. Kamenivo	15
2.2.1. Dělení kameniva.....	15
2.2.2. Vlastnosti kameniva	16
2.3. Voda	18
2.4. Polymery	19
2.4.1. Termoplasty.....	21
2.4.1.1. Polyethylen	21
2.4.1.2. Lineární polyestery	22
2.4.1.2.1. Polyetylentereftalát	23
2.4.2. Využití polymerů.....	23
2.4.2.1. Využití polymerů ve stavebnictví.....	24
2.4.2.1.1. Polyethylen	25
2.4.2.1.2. Polyetylentereftalát	26
2.5. Recyklace odpadních plastů	26
2.5.1. Recyklace odpadních plastů ve stavebnictví.....	30
3. Experimentální část.....	33
3.1. Suroviny pro zkoušky.....	33
3.1.1. Cement.....	33
3.1.1.1. Cement pevnostní třídy 32,5.....	33
3.1.1.2. Cement pevnostní třídy 42,5.....	34
3.1.1.3. Cement pevnostní třídy 52,5.....	35
3.1.2. Kamenivo	35
3.1.3. Voda	36
3.1.4. Příměsi plastů	36

3.1.4.1. Polyethylentereftalát	36
3.1.4.2. Polyethylen	38
3.2. Příprava a provedení zkoušek.....	39
3.2.1. Zkouška vlivu teploty na pevnost betonu.....	39
3.2.1.1. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu	40
3.2.1.2. Stanovení pevnosti v tlaku.....	41
3.2.1.3. Vyhodnocení vlivu teploty na pevnost betonu	42
3.2.2. Zkouška teploty tavení plastů.....	43
3.2.2.1. Vyhodnocení zkoušky teploty tavení plastů.....	44
3.2.3. Zkouška doby zahřívání vzorků obsahující plastovou příměs	44
3.2.3.1. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu	46
3.2.3.2. Stanovení pevnosti v tlaku.....	47
3.2.3.3. Vyhodnocení vlivu doby zahřívání betonu.....	48
3.2.4. Vliv tříd cementů na pevnostní charakteristiky.....	48
3.2.4.1. Zkoušky s cementem 32,5	50
3.2.4.1.1. Polyethylentereftalát	50
3.2.4.1.2. Polyethylen	55
3.2.4.2. Zkoušky s cementem 42,5	60
3.2.4.2.1. Polyethylentereftalát	60
3.2.4.2.2. Polyethylen	64
3.2.4.3. Zkoušky s cementem 52,5	69
3.2.4.3.1. Polyethylentereftalát	69
3.2.4.3.2. Polyethylen	73
3.3. Závěr experimentální části	77
4. Závěr	79
5. Přílohy.....	82
Pracovní pomůcky	82
Použité zdroje.....	85
Seznam obrázků	88
Seznam tabulek	89
Seznam grafů.....	90

1. Úvod

Plastové odpady patří do skupiny druhotných surovin, které vznikají velmi často jako odpadní obaly z různých výrobních oborů, od soukromých uživatelů apod. Tento plastový odpad buď končí na skládkách, kde dlouhodobě zatěžuje životní prostředí, nebo ve spalovnách, kde zplodinami silně zatěžuje systém čištění. Dále se zpracovává různými způsoby pro další využití např. drcením. U termoplastů je možno provádět přetavení, protože za vyšších teplot se materiál stává plastickým – tvárným – až kapalným a po ochlazení opět tuhým. Výhodou je, že změny tvárnosti mohou nastávat opakovaně, protože termoplasty jsou složeny z lineárních molekul s dlouhým řetězcem a jsou drženy u sebe pouze mezimolekulárními nekovalentními interakcemi (van der Waalsovými silami, vodíkovými můstky nebo interakcemi dipól – dipól). Zahříváním jsou tyto interakce oslabovány a polymer měkne.[1].

Provedené zkoušky v experimentální části vycházeli z předpokladu, že drcené termoplasty zapracované do betonu po zahřátí zpevní vnitřní strukturu společně s cementem v množství 10 a 20 % z objemu písku. Ve stejném množství 10 a 20 % byly termoplasty přidávány také do vzorků, které nebyly zahřívány. Zapracování termoplastů do struktury betonu s jeho následným zahřátím měla vytvořit taveninou rozptýlenou výztuž a tím zajistit dostatečně pevnou strukturu zejména s vyšší pevností v tahu za ohybu připravených vzorků. Vzhledem k velikosti zkušebních betonových vzorků byla použita drť plastů o velikosti zrna 0–4 mm.

Podstatnou odlišností od jiných dosavadních výzkumů přidávání termoplastů do betonu je, že v tomto případě se nejedná o rozptýlenou výztuž, která by měla mechanicky přenášet tahové namáhání. Používané odpadní plastové materiály nejsou pro zvolené využití nijak mimořádně upravovány, je zde využívána běžná drť, která vzniká při přípravě plastů pro další recyklaci. Není tedy nutno počítat s náklady na další speciální úpravu materiálu. Dochází jen k vytrídění vhodné frakce.

Aktuálním trendem je vytvoření kompozitu s optimálními energetickými nároky za použití již zmíněné druhotné suroviny – plastové drtě a dosažení dobrých mechanických vlastností. Jak vyplývá z použité literatury, taková možnost je reálná. Očekávané aplikace různých složení kompozitů pro přípravu vzorků s využitím termoplastů za různých podmínek uložení. Podle dosavadních znalostí je zatím jen málo ověřených prací, které řeší tyto procesy týkající se uvedených směsí. Stabilita je kritickým parametrem pro jejich další využití. Tato práce je soustředěna zejména na výzkum součinnosti jednotlivých složek použitých v připravovaných směsích a stabilitu vzniklých kompozitů. Výroba a zkoumání připravovaných systémů se jeví jako důležité pro porovnání procesů, které by mohly přispět nejenom ke zpracování druhotných surovin ale i zlepšení vlastností betonových výrobků.

2. Teoretická část

Plastových obalů se spotřebovává stále větší množství, jak z důvodu stále se zvětšující populace tak z důvodu ekonomického (plastové obaly jsou levnější než jejich ekologičtější náhrady) a také proto, že plastové obaly jsou pružné, pevné, odolné vůči změnám teplot a hygienicky nezávadné. Další vlastností plastových obalů je také dlouhá životnost, což je také důvod proč se stala likvidace plastového odpadu takovým problémem.

V reakci na neuspokojivý stav v odpadovém hospodářství, kdy je významné procento odpadních plastů stále skladováno bez dalšího materiálového nebo energetického využití se diplomová práce věnuje možnosti využití odpadních termoplastů jako přísady do betonu. Dle dosavadních odborných publikací se jeví, že přídavek odpadních plastů může mít pozitivní vliv na vlastnosti betonu.

Proto se teoretická část práce věnuje nejdříve složkám betonu, požadavkům na jednotlivé složky, následně popisu jednotlivých příměsí a nakonec recyklaci plastových odpadů.

2.1. Cement

První zmínka o hydraulických maltách na našem území je z 16. století a s výrobou cementu se započalo kolem roku 1860.

Definice dle normy zní: „*Cement je hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě*“ [2].

Hydraulické tvrdnutí cementů je důsledkem hydratace vápenatých silikátů a aluminátů. Cement patří mezi důležité a nejnákladnější složky betonu a existuje mnoho druhů cementů s různými vlastnostmi. Jednotková cena různých příměsí může být vyšší, ale jejich množství přidávané do betonu je zase nižší. [3, 4, 5]

2.1.1. Druhy cementů

Cementy se mohou dělit podle několika kritérií. Jeden z druhů dělení je dle normalizované pevnosti na 32,5, 42,5 a 52,5. Tyto hodnoty označují pevnost v tlaku v MPa. Ještě existuje cement s označením 22,5, který se skoro nepoužívá. Každá tato pevnostní třída cementu může mít variantu s vysokou počáteční pevností, tyto cementy se označují přídatným písmenkem R. U cementů s normální počáteční pevností je užíváno přídatné písmeno N.

Další dělení cementů je znázorněno v následující přehledné tabulce č. 1.

Tabulka 1 - Druhy cementů dle směsnosti [3]

Druh cementu	Název cementu	Označení	Obsah složek v % hmotnosti		
			slínek	složka	plnivo
I.	portlandský	I	95–100	–	0–5
II.	portlandský směsný	II/A–X	80–94	6–20	0–5
		II/B–X	65–79	21–35	0–5
III.	vysokopeční	III/A	33–64	36–65	0–5
		III/B	20–34	66–80	0–5
		III/C	5–19	81–95	0–5
IV.	pucolánový	IV/A	65–89	11–35	0–5
		IV/B	45–64	36–55	0–5
V.	směsný	V/A	40–64	18–30	0–5
		V/B	20–39	30–50	0–5

Označení A,B, případně C udává typ cementu na základě obsahu slínku.

Označení složek X se udává pouze u druhu cementu II (místo X se uvede písmeno):

Cem II.: S = Struska, D = křemičitý úlet (max 10 %), P = přírodní a Q = průmyslový pucolán, V = křemičitý a W = vápenatý popílek, T = kalcinovaná břidlice, L = vápenec

Cem III.: složku tvoří struska S

Cem IV.: složky tvoří křemičitý úlet D, přírodní a průmyslový pucolán P, Q a křemičitý popílek V.

Cem V.: složka je z poloviny tvořena vysokopeční struskou S a z poloviny P, Q, V.

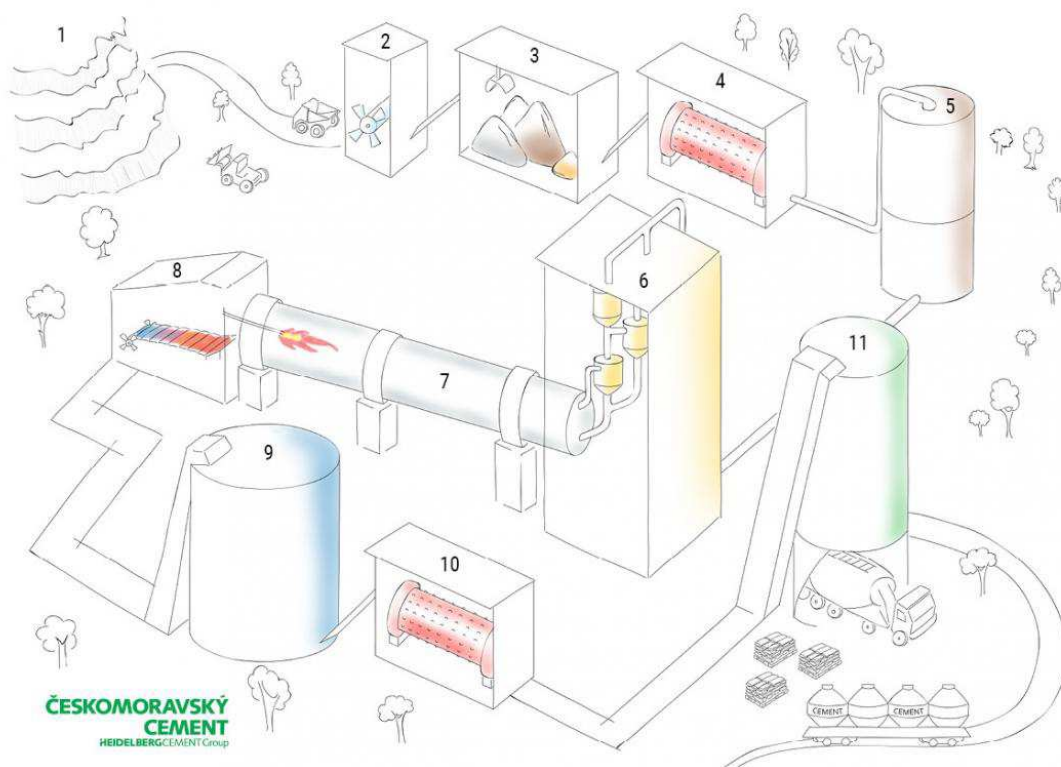
Existuje i mnoho druhů speciálních cementů. Dále je uvedeno několik příkladů. Bílý cement, který, jak už název napovídá, je bílý se vyznačuje nízkým obsahem oxidu železitého a manganatého. Přidáním barevných zejména anorganických pigmentů do tohoto cementu se vytvářejí barevné cementy. Další speciální cement je rozpínavý cement. Tento cement se vyznačuje tím, že při hydrataci dochází ke zvětšení jeho objemu maximálně o 20 mm/m. Rozpínáním může i kompenzovat celkové smršťování betonu. Síranovzdorný cement má zase větší odolnost proti působení síranům, které způsobují degradaci betonu síranovým rozpínáním. Silniční cement má vysokou pevnost v tahu za ohybu, malé objemové změny, dlouhou trvanlivost zejména proti atmosférickým podmínkám, nízké hydratační teplo a vysokou počáteční pevnost. Dalším speciálním druhem je cement s nízkým hydratačním teplem určený především pro masivní konstrukce. Je to směsný cement s hydratačním teplem cca 270 kJ/kg za 28 dní. A hlinitanový cement, který se vyrábí ze speciálního slínku s vysokým podílem hlinitanových složek. Tento cement má sice rychlý nástup tuhnutí, vysokou odolnost proti agresivnímu prostředí, ale je nestabilní a dlouhodobě zvyšuje pórovitost cementového kamene, což způsobuje ztrátu pevnosti betonu. Proto nesmí být hlinitanové cementy používány

v konstrukčních betonech a využívají se jen u speciálních prací, kdy není požadována dlouhodobá pevnost. [2, 3, 4, 6, 7]

2.1.2. Výroba cementu

Základní surovinou využívanou pro výrobu cementu je vápěnc a dalšími surovinami jsou břidlice, křída, struska, křemičitý písek a různé druhy jílu.

Vytěžené horniny na výrobu cementu jsou nejdříve rozdrceny a pak ve správném poměru dle druhu cementu smíseny a rozemlety v kulovém mlýně, kde se také promíchávají. Je možnost dále surovinovou moučku homogenizovat pro zvýšení rovnoměrnosti vlastností. Dále se surovinová moučka přehřívá ve výměníku tepla, kde dosáhne teploty cca 900 °C, odkud putuje do rotační pece. Rotační pec je ve sklonu uložený válec, který se pomalu otáčí. Tento rotační pohyb posouvá



- | | |
|--|--|
| 1 TĚŽBA SUROVIN V LOMU | 7 VÝPÁL SUROVINOVÉ MOUČKY V ROTAČNÍ PECI NA SLÍNEK |
| 2 PRIMÁRNÍ DRCENÍ SUROVIN | 8 CHLAZENÍ A DRCENÍ SLÍNEK |
| 3 SKLADOVÁNÍ SUROVIN | 9 SKLADOVÁNÍ SLÍNEK V SILE |
| 4 SPOLEČNÉ MLETÍ SUROVIN NA SUROVINOVOU MOUČKU | 10 MLETÍ SLÍNEK NA CEMENT |
| 5 HOMOGENIZACE A SKLADOVÁNÍ SUROVINOVÉ MOUČKY | 11 SKLADOVÁNÍ A EXPEDICE CEMENTU |
| 6 PŘEDEHŘEV SUROVINOVÉ MOUČKY VE VÝMĚNÍKU | |

Obrázek 1 - Znázornění výroby cementu [8]

spirálovým pohybem surovinovou moučku čím dál tím blíže plamenu hořáku, kde dosáhne teploty 1450 °C a kde se v pyroplastickém stavu vytvoří slínek ve tvaru šedých nepravidelných koulí. Po vytvoření slínku putuje ještě horký slínek do chladiče, kde je prudce ochlazen chladným vzduchem. Po ochlazení je slínek nejdříve drcen na kusy velikosti do 5 cm. Po tomto procesu se přistupuje k mletí slínku, které probíhá v kulových mlýnech. Společně se sádrovcem, vápencem, vysokopecní struskou, nebo jinými složkami je smíchán podle vyráběného druhu cementu. Celý proces je znázorněn na obrázku č. 1. [6, 8]

2.1.3. Portlandský cement

Portlandský cement je nejpoužívanějším druhem cementu pro výrobu betonu a značí se římskou číslicí jedna. Portlandský cement se vyrábí pouze v pevnostních třídách 42,5 a 52,5 mletím čistého slínku spolu s regulátorem tuhnutí sádrovcem. Použití tohoto cementu je především u betonů vyšších tříd. Tento typ cementu je znám již od 19. století, kdy postup na jeho výrobu patentoval Joseph Aspdin a dle jeho vizuální podobnosti s vápencem těženým v okolí města Portland v Anglii ho nazval portlandský. [6, 11]

2.1.4. Portlandský směsný cement

Tento cement je vyráběn ve dvou modifikacích. První je CEM II/A s maximálním 20% obsahem složek a druhý CEM II/B s maximálním 35% obsahem složek. Podle druhu složky, která je v cementu obsažena má cement různé vlastnosti i označení.

Portlandský struskový cement má, jak již název napovídá za příměs strusku. Tento cement má výhodu, že je odolný vůči agresivním a odpadním vodám. Jeho další vlastností je pomalejší vývin pevnosti a počátečního tepla. Kvůli jeho vlastnostem je vhodný do betonů určených na základové konstrukce a pro stavby ve vlhkém prostředí.

Další variantou je portlandský cement, s křemičitým úletem značený D. Křemičitý úlet je odpadní látka některých hutních provozů vyznačující se vysokým měrným povrchem s dobrými pucolánovými vlastnostmi. Obsah křemičitého úletu v cementu způsobí zvýšení pevnosti v tahu. Díky této vlastnosti se využívá pro konstrukce, které jsou namáhány kromě na tlak, také na tah.

Portlandský pucolánový cement má za přídavek buď přírodní pucolán, který se značí P, nebo průmyslový pucolán značený Q. Pucolánové cementy mají výhodu, že jsou odolnější vůči agresivnímu prostředí, ale zase jsou citlivější na teplotní podmínky při zpracování cementu. Obzvláště při poklesu teploty pod 10 °C se vývin

počáteční pevnosti a tepla snižuje. Pucolánový cement má vysoký měrný povrch a tudíž je potřeba při přípravě betonu přidat větší množství vody, což vede ke snížení pevnosti.

Portlandský popílkový cement má zase za přídavek buď křemičitý popílek značený V, nebo vápenatý popílek značený W. Popílkový cement má podobné vlastnosti jako pucolánový cement. Zejména je to jeho vyšší vodotěsnost. Použitím popílkového cementu se zlepšuje zpracovatelnost betonu. Tento cement se využívá například při stavbě přehrad.

Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí se značí písmenem T. Tuto břidlici je nejdříve potřeba vypálit, aby obsahovala slínkové fáze. Do cementu se přidává jemně mletá břidlice, která zvyšuje odolnost vůči chemickým vlivům a má plastické vlastnosti. Tento cement je používán díky svým vlastnostem například při injektážních pracích.

Poslední variantou je pak portlandský cement s vápencem. Obsah vápence v cementech má za výhodu vyšší odolnost výsledného betonu proti plísňím. Díky této vlastnosti se tento cement využívá ve stavbách, jako jsou nemocnice, obchody a budovy s potravinářským průmyslem. [3, 9, 10]

2.1.5. Vlastnosti cementu

Norma ČSN EN 197-1 ed. 2 udává požadavky na 28 denní a počáteční pevnost v tlaku, počátek tuhnutí a objemovou stálost cementu. Dalšími sledovanými vlastnostmi jsou objemová hmotnost, měrný povrch a hydratační teplo cementu.

Počátek a doba tuhnutí cementu se zjišťuje pomocí Vicatova přístroje. Počáteční doba tuhnutí je doba, která uplyne od smíchání cementu s vodou, až po chvíli kdy vzdálenost mezi jehlou Vicatova přístroje a podložní destičkou je 6 ± 3 mm. Požadovaný minimální počátek doby tuhnutí je u cementu pevnostní třídy 52,5 45 minut, 42,5 60 minut a u 32,5 75 minut. Obvykle však tato hodnota bývá okolo 3 až 5 hodin. Doba tuhnutí je oproti tomu doba od smíchání cementu s vodou, až po dobu kdy jehla Vicatova přístroje pronikne pouze 0,5 mm do cementové kaše. Doba tuhnutí je maximálně 12 hodin, ale většinou se pohybuje mezi 4 a 6 hodinami. Doba tuhnutí cementu lze ovlivnit množstvím přidané vody k cementu. Čím více vody je k cementu přidáno, tím je doba tuhnutí delší. Dalším faktorem ovlivňujícím dobu tuhnutí je teplota prostředí. Čím je vyšší teplota, tím je doba tuhnutí kratší.

Objemová stálost se zjišťuje pomocí Le Chatelierovy objímky. Při 24 hodinové zkoušce nesmí dojít k roztažení objímky o více než 10 mm. Dále v průběhu zkoušky nesmí zkušební vzorek vykazovat žádné trhliny a odštěpky. Roztažení objímky se většinou pohybuje okolo 1 mm.

Objemová hmotnost se u portlandských cementů pohybuje mezi 3050 a 3150 kg/m³. Naopak sypaná hmotnost se pohybuje mezi 900 a 1300 kg/m³. Přesná hodnota závisí na druhu cementu.

Měrný povrch cementu je závislý na jemnosti mletí. Tato hodnota se dá zjistit pomocí permeabilní metody dle Blaina, nebo u velmi jemných cementů metodou adsorpce dusíku. Měrný povrch cementu má za požadavek, aby jeho hodnota byla minimálně 225 m²/kg a maximálně 600 m²/kg. Čím větší je měrný povrch cementu, tím rychleji a úplněji hydratuje, ovšem výroba jemnějších cementů je energeticky i finančně náročnější.

Další sledovanou vlastností je hydratační teplo. Hydratační teplo je projevem hydratace cementu a dle jeho vývoje, lze cementy rozdělit na cementy s pomalým, normálním, nebo rychlým vývinem hydratačního tepla. Cementy s nízkým hydratačním teplem nesmí překročit hodnotu 270 J/g po 7 dnech.

Pevnost se sleduje jak počáteční tak 28 denní. Počáteční pevnost je u cementů pevnostní třídy 32,5 L, 32,5 N a 42,5 L sledována po 7 dnech a u zbylých pevnostních tříd cementů po 2 dnech. Pevnost v tahu za ohybu i v tlaku se zkouší na cementových trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Pevnost musí splňovat požadavky stanové normou ČSN EN 197-1. [2, 3, 7, 12]

2.2. Kamenivo

„Kamenivo je zrnitý materiál, používaný ve stavebnictví. Kamenivo může být přírodní, umělé nebo recyklované.“ [13] Kamenivo je další základní složkou betonu. Tato složka zaujímá největší objem betonové směsi a většinou se pohybuje mezi 75–80 %. Kamenivo v betonu má nosnou funkci s nízkou mezerovitostí. Aby bylo dosaženo právě nízké mezerovitosti, využívají se různé velikosti zrn ve vhodném poměru. Kamenivo do betonu musí splňovat požadavky uvedené v ČSN EN 12620+A1. [3, 13, 14]

2.2.1. Dělení kameniva

Kamenivo lze dělit podle původu neboli petrografie, podle velikosti zrn a podle pórovitosti.

Dle původu se kamenivo může dělit na přírodní, umělé a recyklované. Přírodní kamenivo bylo vystaveno pouze mechanickému procesu. Toto kamenivo může být pouze těžené, nebo těžené a drcené. Těžené kamenivo vzniklo přirozeně, rozpadem hornin. Toto kamenivo má kulatější tvar. Drcené vzniklo drcením kamene. Jeho hrany jsou ostré. Předrcené kamenivo obsahuje z 20–60 % těžená zrna a zbylá zrna jsou drcená. Umělé kamenivo je výsledkem tepelné úpravy nerostných surovin.

Většinou se jedná o tepelnou expanzi jílu a břidlic, nebo sbalkování popílku. Uměle vyrobená kameniva se vyznačují vysokou pórovitostí a nízkou objemovou hmotností. Kamenivo vyrobené tepelnou expanzí má hladký povrch, a kamenivo vyrobené sbalkováním zase pórovitý. Recyklované kamenivo je takové, které už bylo dříve využito v konstrukci. Toto kamenivo vzniká rozdrčením původní konstrukce a jedná se tedy o ekologičtěji získané kamenivo pomocí již jednou použitého kameniva. Jako nevýhoda se však ukazuje možnost znečištění kameniva jinými druhy materiálů a ovlivnění kvality následně vzniklého betonu. Největší nevýhodou vzniklého betonu s použitím recyklovaného kameniva je jeho nasákavost, která pro jemné kamenivo je až desetinásobná proti přírodnímu. Aby se vyhovělo normám, tak se doporučuje používat recyklované kamenivo do základových konstrukcí, vnitřních nenosných konstrukcí a podlah, kde nejsou tak vysoké požadavky.

Dělení podle velikosti zrn je na hrubé, drobné a filer. Hrubá kameniva jsou ty, s velikostí zrn větší nebo rovnou 4 mm. Drobné kamenivo je oproti tomu kamenivo s velikostí zrn menší než 4 mm. A jemnému kamenivu, jehož zrna propadnou sítím o velikosti ok 0,063 mm, se říká filer.

A nakonec je možné dělit kamenivo podle zrnitosti. Rozlišují se pórovitá, hutná a těžká kameniva. Toto třídění se určuje pomocí objemové hmotnosti. Kameniva s objemovou hmotností pod 2000 kg/m^3 jsou pórovitá, hutná jsou s objemovou hmotností mezi 2000 a 3000 kg/m^3 a těžká kameniva jsou s objemovou hmotností nad 3000 kg/m^3 . [3, 13, 14, 15]

2.2.2. Vlastnosti kameniva

U kameniva používaného do betonu se sleduje několik vlastností. Jak geometrických, tak fyzikálních nebo chemických.

Každé kamenivo musí mít specifikovanou frakci. Frakce kameniva se určuje síťovým rozborem. Kamenivo, které zůstane na sítu během zkoušky, se nazývá nadsítné a zrna která propadnou, se nazývají podsítné. Frakce je specifikována pomocí dvojice sít vybraných ze základní řady, mezi těmito sítmi se pohybují rozměry všech zrn příslušného kameniva. Rozmezí frakce se zapisuje ve formě d/D. Dolní síto, které udává nejmenší velikost zrn, se značí d a naopak D se značí horní síto pro danou frakci. Základní řada sít má čtvercové otvory (oka) o velikosti 0,063; 0,125; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 32; 63 a 125 mm. Ze síťového rozboru se vytvoří čára zrnitosti. Čárou zrnitosti se vyjadřuje zrnitost kameniva. Existují vypracované regulované čáry zrnitosti, které určují, zdali je kamenivo do betonu dobré, použitelné, nebo nevhodné.

Sledovanou vlastností je také tvar zrn hrubého kameniva. Tato vlastnost se sleduje buď pomocí indexu plochosti, nebo tvarového indexu. Index plochosti se zjišťuje pomocí dvou prosévacích operací. Nejdříve se vzorek proseje přes standartní sadu sít a následně se každá frakce proseje přes tyčová síta. Z propadlých zrn

tyčovými síty se následně může spočítat index plochosti. Tvarový index je poměr největšího rozměru zrna vztažený k nejmenšímu. Tento poměr se měří nejméně u 10 zrn hrubého kameniva.

Další sledovanou geometrickou vlastností je obsah jemných částic. Požadavky na maximální obsah jemných částic v kamenivu jsou dány normou. Obsah se zjišťuje pomocí zkoušky praním. Kamenivo se smíchá s vodou a je proplachováno přes síto 0,063 mm. Zbytek na sítu je následně vysušen a rozdíl v hmotnosti navážené původní frakce a vysušeného zbytku na sítu udává obsah jemných částic.

Požadovanou zkoumanou vlastností je také obsah schránek živočichů u hrubého kameniva, kde by hodnota neměla přesáhnout 10 %.

Dle použití kameniva nebo dle jeho původu je určeno které jednotlivé fyzikální vlastnosti je třeba zkoušet, jako je pevnost, objemová hmotnost, nasákavost sypaná hmotnost a trvanlivost.

Kamenivo používané do běžných betonů má většinou vyšší pevnost, než je požadovaná pevnost následně vzniklého betonu, ale jedná-li se o kamenivo do vysokopevnostních betonů je jeho pevnost důležitá. Pevnost kameniva se dá zkoušet na výřezu krychle z horniny, nebo se stanoví pevnost stlačení ve válci. Drtitelnost v rázu je důležitá především u kameniva, které je používáno pro kolejové násypy.

Objemová hmotnost kameniva udává hmotnost objemu zrna kameniva včetně pórů. Měrná hmotnost je hmotnost zrna bez pórů. Ještě existuje sypaná hmotnost kameniva, která se určuje buď ve stavu volně sypaném, nebo střešeném.

Nasákavost se udává v hmotnostních, nebo objemových procentech a je to poměr množství vody, které nasáкло do pórů a kapilár kameniva a vysušeného kameniva. Nasákavost je možné zjišťovat pyknometrickou metodou, nebo vážením na hydrostatických vahách. Ovšem metoda vážení je vhodná jen pro hrubé kamenivo. Nasákavost je důležité zjišťovat u pórovitého kameniva pro správné stanovení potřebného množství záměsové vody.

Odolnost kameniva proti zmrazování a rozmrazování je důležitá vlastnost, která úzce souvisí s nasákavostí kameniva. Odolnost se totiž snižuje v případě, že se jedná o vysoce nasákové kamenivo a dále se snižuje, pokud voda, která působí na kamenivo, je mořská, nebo je kamenivo vystaveno chemickým rozmrazovacím látkám. Tato hodnota se zjišťuje buď pomocí normové zkoušky podle ČSN EN 1367-1 nebo normovou zkouškou síranem hořečnatým podle ČSN EN 1367-2. Zda-li je kamenivo vyhovující, záleží jako u ostatních vlastností na požadované kategorii, která se určí v závislosti na použití kameniva.

Kamenivo musí splňovat i požadavky na chemické vlastnosti. V tom případě se zjišťuje přítomnost potenciálních škodlivých látek v kamenivu. Složení kameniva totiž ovlivňuje chemické reakce při přípravě betonu. Důležité je, aby kamenivo neobsahovalo látky, které tyto reakce negativně ovlivňují. Škodlivé látky jsou jemné

částice, humusovité látky, bobtnající organické látky, látky ovlivňující tvrdnutí, látky obsahující síru, látky způsobující korozi výztuže, látky podléhající alkalicko-křemičité reakci, kamenivo ze zbytků čerstvého betonu a malt.

Jemné částice pod 0,063 mm přítomné v kamenivu jsou škodlivé pouze ve větším množství. Tato hranice je dána normou dle použití kameniva.

Humusovité látky negativně ovlivňují dobu tuhnutí i tvrdnutí. Některé příměsi i snižují odolnost betonu vůči chemickým rozmrazovacím látkám a snižují pevnost. Množství těchto látek nesmí být takové, aby zapříčinilo prodloužení doby začátku tuhnutí malty o více jak 2 hodiny a nesnížilo pevnost o více jak 20 %.

Dále se stanovuje obsah síranů z důvodu způsobení pnutí, které je následně důvodem porušení betonu. Sírany jsou v betonu povoleny, pouze pod podmínkou, že se neúčastní hydratačního procesu, jako u vysokopecní strusky.

Chloridy ve stavu sodných a draselných solí zapříčiňují v betonu korozi výztuže, proto je sledován jejich obsah.

Pokud alkálie (například chlorid sodný) v kamenivu zreagují s vlhkostí v betonu, můžou způsobit rozpínání a vytvořit trhliny. Nejběžnější je alkalicko-křemičitá reakce, která ovlivňuje objemovou stálost a dále alkalicko-uhličítá reakce.

Některé složky jako je pyrit nebo lignin ovlivňují vzhled výsledného betonu. Způsobují na povrchu skvrny, puchýře, nebo odprýskání. Pokud je při výrobě důležitý hladký povrch betonu, jako je tomu u pohledových betonů, je také důležité, aby bylo kamenivo co nejméně znečištěno organickými látkami, které také způsobují vady ve vzhledu výsledného betonu. [3, 6, 13, 14]

2.3. Voda

Druh záměsové vody ovlivňuje kvalitu betonu, dobu tuhnutí a tvrdnutí. Při zkoumání vlastností a posouzení vhodnosti vody jako záměsové je třeba brát v úvahu složení vody a požadavky na vyráběný beton. Voda v betonu má za úkol hydratovat cement a vytvářet tuhou strukturu a dále zajišťuje plastičnost čerstvého betonu.

Voda se dá rozdělit na různé typy dle jejího získání. Pitná voda, je považována bez dalšího zkoušení jako vhodná pro použití do betonu. Voda získaná při recyklaci v betonárně je použitelná za předpokladu, že splní požadavky dané normou ČSN EN 1008. Splnění těchto požadavků je u recyklované vody zkoušeno měsíčně. Podzemní vodu je také třeba před použitím vyzkoušet, ale jsou dostačující počáteční zkoušky typu stanovené normou. Povrchová voda a odpadní průmyslová voda je použitelná po provedení zkoušek zdali splňuje požadavky na záměsovou vodu. Tyto vody musí být zkoušeny před prvním použitím a dále každý rok, nebo tehdy pokud se nějak změní její jakost. Mořská nebo brakická (poloslaná) voda smí být používána do

betonu pouze tehdy, jedná-li se o nevyztužený beton. Důvodem je obsah chloridových iontů, které zapříčiňují korozi kovů. Slaná voda musí být také zkoušena před začátkem používání a pak minimálně každý rok. Konečným typem je splašková voda, ta není vhodná pro použití do betonu bez dalšího zkoušení.

Voda musí být zkoušena dle zkušebních postupů uvedených v normě ČSN EN 1008. Voda, která nevyhovuje jednomu nebo více požadavkům v úvodním posouzení musí prokázat svou vhodnost zkoušením chemických vlastností, jako je obsah chloridů, síranů, alkálií a škodlivých látek (cukr, fosfáty, dusičnany, olovo, zinek), a dále zkoušením doby tuhnutí a pevnosti testované na cementové kaši.

V úvodním posouzení vody se zkoumá za prvé, obsah olejů a tuků, které nesmí být obsaženy ve vodě ve větším množství, než jsou viditelné stopy. Za druhé, množství čisticích prostředků, kdy objevená pěna musí do dvou minut zmizet. Jako třetí se zkoumá barva vody, ta nesmí být tmavší nebo jinak zbarvená než je bledě žlutá a světlejší. Za čtvrté rozptýlené látky ve vodě. 80 ml vody nesmí obsahovat více než 4 ml usazených látek. Jako další se čichem ověří, zda nemá jiný zápach než čistá voda s výjimkou lehkého zápachu cementu. Šestý požadavek je na kyselost, pH se měří pomocí pH papírku a zjištěná hodnota musí být vyšší nebo rovna čtyřem, to znamená od žluté do modré. Nakonec se v pěti mililitrovém vzorku vody zkoumá obsah humusovitých látek pomocí 3% hydroxidu sodného, který se nechá s vodou reagovat a následně se zkoumá jeho barva, která musí být světle žlutá, nebo světlejší. [16, 17]

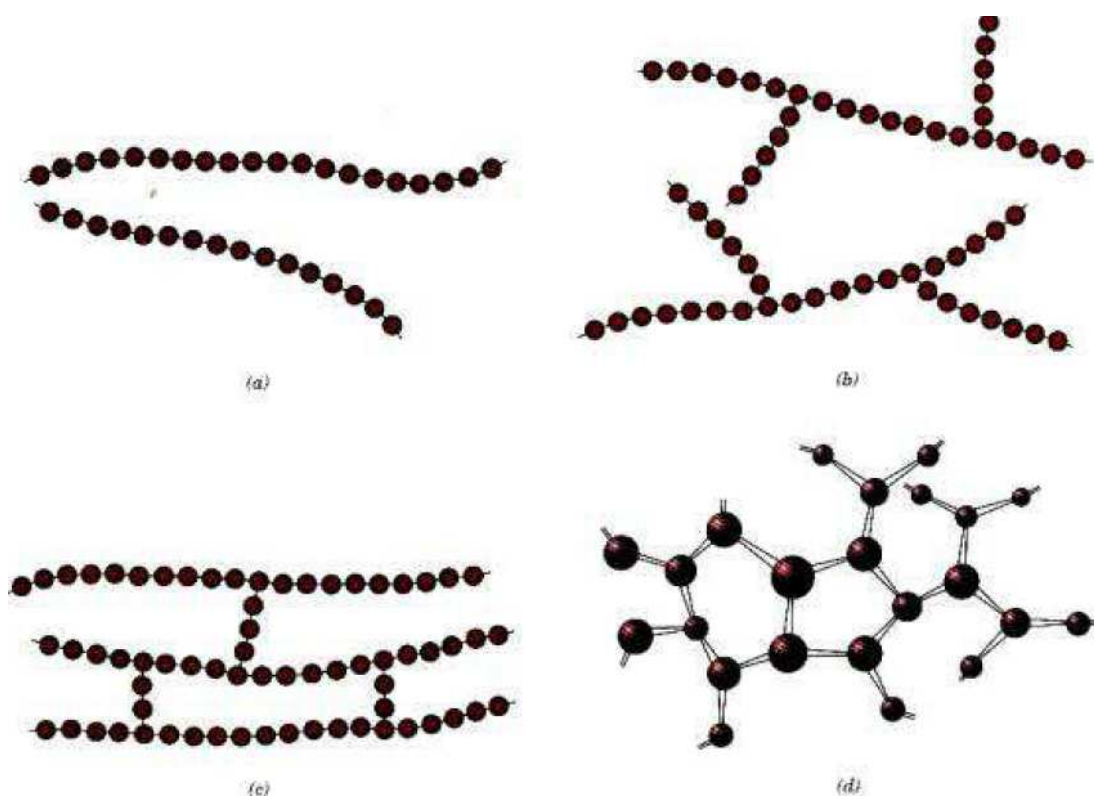
2.4. Polymery

Termínem polymery označujeme přírodní nebo syntetické látky tvořící makromolekulární struktury. Tyto struktury jsou z převážné části tvořeny vícenásobným opakováním stejného atomárního seskupení nazývaného monomer či strukturální jednotka. Běžný polymer obsahuje řadově sto až sto tisíc strukturálních jednotek.

Polymery lze dělit dle několika hledisek. Nejzákladnější dělení je samozřejmě na polymery přírodní a syntetické, tedy dle jejich vzniku. Další možný přístup rozdělení polymerů je podle jejich struktury viz obrázek 2 respektive dle seřazení jednotlivých monomerů v molekule a to na:

- a. Lineární polymery – monomery jsou řazeny za sebou, ale mezi jednotlivými řetězci mohou působit nekovalentní interakce (např. polyethylén, polyvinylchlorid, polystyrén atd.).
- b. Rozvětvené polymery – ze základního lineárního řetězce vystupují do stran větve polymerů ze stejných monomerních jednotek.

- c. Polymery se zkříženými články – jednotlivé lineární polymerní řetězce jsou mezi sebou propojeny články, které jsou vázány pomocí silných kovalentních interakcí. Jedná se zejména o elastické materiály, jako je kaučuk.
- d. Síťované polymery – jsou složeny s monomerů mající tři aktivní vazebná místa a mohou tak vytvářet trojrozměrnou síť (patří sem např. epoxidy).
- e. Kopolymery – sestávají z více druhů monomerních jednotek, které jsou seřazeny náhodně či se střídají definovaně.



Obrázek 2 - Struktury polymerů. [19]
Označení struktur odpovídá dělení výše

Právě díky různému dodatečnému propojování molekul monomerů za pomoci síťování či tvorbě vhodných kopolymerů lze cíleně upravovat vlastnosti základních makromolekulárních látek.

Obecně lze polymery rozdělit také na dvě základní skupiny a to na elastomery a plasty. S tím, že plasty se mohou dále dělit na termoplasty a reaktoplasty. Mezi elastomery patří zejména pryže a vyznačují se možností vratné deformace bez porušení při mírném zatížení. Oproti tomu plasty mají pevnou někdy až křehkou strukturu. Při zvýšení teploty se však stávají tvárnými neboli plastickými. Pokud lze proces změny pevnosti pomocí zvýšení teploty u plastů opakovat jedná se o termoplasty (více viz kapitola 2.4.1), ale pokud je tato změna již nevratná mluvíme o reaktoplastech (někdy také pryskyřicích). V druhém případě totiž dochází při

zvýšené teplotě k chemické reakci mezi molekulami plastu. Z hlediska struktury se jedná zejména o síťované polymery.

Mechanické vlastnosti jsou velmi rozdílné jak u různých druhů polymerů, tak podle toho jakou mají teplotu. [6, 18, 19]

2.4.1. Termoplasty

Jak již bylo uvedeno výše, termínem termoplasty se označují tuhé syntetické polymery, pro které je charakteristická schopnost při zvýšené teplotě přecházet do tvarovatelné konzistence a po následném ochlazení opět nabýt původní tuhosti a pevnosti.

Monomery termoplastů tvoří zejména lineární a rozvětvené polymery, které jsou za normální teploty sbaleny a poskládány do relativně tuhých útvarů nazývaných statická klubka. Zvyšováním teploty se poskládané a sbalené části řetězce stávají pohyblivějšími, dochází totiž k oslabení nekovalentních interakcí mezi polymerními řetězci. To se navenek projevuje zvýšenou tvárností termoplastu.

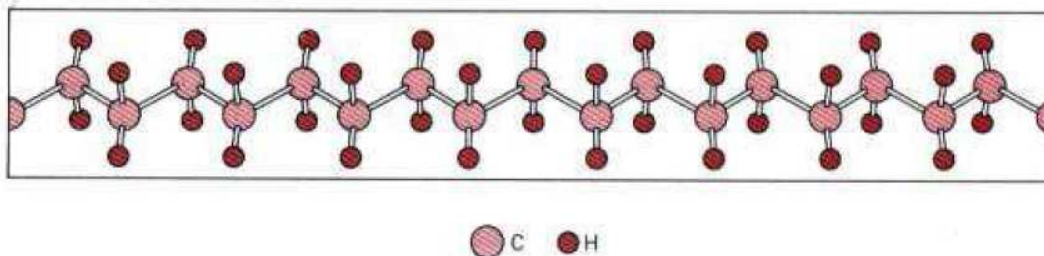
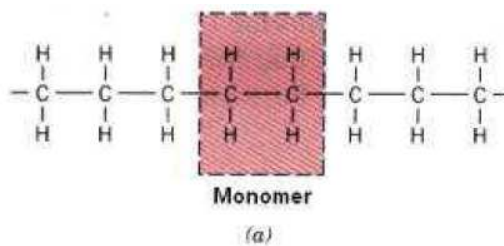
Vlastnosti a zejména pevnost termoplastů do značné míry závisí na tom, do jaké míry jsou v polymeru zastoupeny oblasti, ve kterých jsou molekuly řetězce uspořádány do pravidelných struktur krystalického charakteru. [6, 18, 19]

2.4.1.1. Polyethylen

Polyethylen se vyrábí z etylenu a je to polymer s nejjednodušší možnou strukturou jednotkou. Monomer polyethylenu je ethylen a skládá se ze dvou propojených skupin CH_2 .

Molekulová struktura je závislá na způsobu výroby polyethylenu. Rozlišují se dva hlavní typy, polyethylen s lineárními, nebo rozvětvenými řetězci. Rozdíl mezi těmito typy není pouze ve struktuře, ale také v hustotě. Polyethylen s nízkou hustotou se značí LDPE a je označován také jako vysokotlaký polyethylen. LDPE má hustotu okolo 920 kg/m^3 . Tento polyethylen se také vyznačuje vyšší odolností proti působení vyšších teplot okolo $80 \text{ }^\circ\text{C}$ a díky své hygienické nezávadnosti je často využíván jako obalový materiál v potravinářství i v jiných odvětvích.

Druhým typem je vysokohustotní polyethylen značený HDPE též zvaný nízkotlaký a má hustotu okolo 955 kg/m^3 . Tento polyethylen se také vyznačuje vyšší odolností proti působení vyšších teplot do $110 \text{ }^\circ\text{C}$ a díky odolnosti vůči chemickým látkám se často využívá v potrubních systémech.



Obrázek 3 - Struktura polyethylenu [19]

Ještě existují méně časté druhy polyethylenu jako je středně hustotní polyethylen MDPE, lineární nízkohustotní polyethylen LLDPE, síťovaný polyethylen XPE a polyethylen s maximální molekulovou hmotností UHMWPE.

Všechny typy polyethylenu jsou tuhé látky, do jejich povrchu se dá snadno rýpat, pokud není obarven tak je bezbarvý, značně citlivý na působení UV záření a není nasákvavý. Nevýhodou je, že díky svým vlastnostem se špatně lepí, proto se spojování provádí pomocí svařování, nebo pomocí přidání roztaveného materiálu stejného typu. Tepelná odolnost se dá hodně ovlivnit zesíťováním jednotlivých řetězců makromolekul pomocí ozáření již hotového výrobku, nebo přidáním organických peroxidů do taveniny.

Polyethylen má široké využití v různých odvětvích a je jedním z nejrozšířenějších. V běžných konstrukcích se kupříkladu vyskytuje v podobě kruhových tyčí, plastových trubek, nádrží na vodu, jímek, mikrotenových folií, víček od lahví na vodu a spoustě dalších výrobků. [6, 19, 20, 21]

2.4.1.2. Lineární polyestery

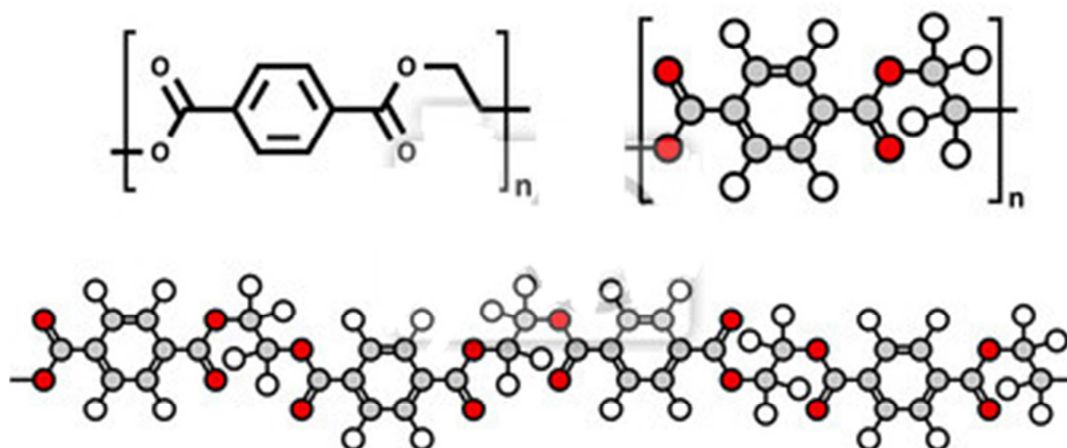
Lineární polyestery se vyrábějí pomocí polykondenzace. Polykondenzace je reakce, při které reagují dva stejné monomery, které obsahují alespoň dvě reakční funkční skupiny.

Mezi lineární polyestery patří polyethylentereftaláty, polykarbonáty, polytetrafluoretylen a polytrifluorchloretylen. [6, 22]

2.4.1.2.1. Polyethyltereftalát

Polyethyltereftalát neboli PET se vyrábí z kyseliny tereftalátové a etylenglykolu. Molekuly polyethyltereftalátu jsou složeny z dlouhých řetězců obsahujících uhlík, kyslík a vodík. Struktura polyethyltereftalátu je znázorněna na obrázku 4. Tento termoplast má velmi dobré mechanické vlastnosti, mez pevnosti v tlaku je cca 47 MPa, teplota tání je cca 250 °C a hustota se pohybuje mezi 1,27 a 1,37 g/cm³.

Polyethyltereftalát byl vyvinut především pro výrobu umělých vláken, ze kterých se následně mohou zpracovávat textilie a lana. Dále je možné z PET vyrábět folie, využívají se při výrobě pneumatik, technických výlisků a co vnímají lidé nejvíce, vyrábí se z něj lahve na nápoje. Výhodou je pevnost materiálu, který odolává vysokým tlakům způsobeným sycenými nealkoholickými nápoji a tento tlak nemůže PET deformovat a ani nezpůsobí jeho explozi. Na jednu 1,5 litrovou lahev se v současnosti spotřebuje 35 gramů suroviny. Velmi důležitou vlastností PET pro výrobce je tedy hlavně jeho nerozbitnost, lehkost a recyklovatelnost. [6, 20]



Obrázek 4 - Struktura polyethyltereftalátu [23]

2.4.2. Využití polymerů

Polymery se nalézají i používají každý den a prakticky všude kde se člověk vyskytuje. Vyjmenovat a popsat jejich využití v domácnosti, průmyslu, zemědělství, automobilismu, ve zdravotnictví a ve spoustě jiných odvětví by zabralo mnoho místa. Tato práce se tedy zaměří jen na omezenou část tohoto spektra a to na využití polymerů ve stavebnictví.

2.4.2.1. Využití polymerů ve stavebnictví

Přesto že je polymer jeden z mladších používaných materiálů, ve stavebním oboru se bez něj v dnešní době neobejde prakticky žádná stavba. Stavebnictví je odvětví, které je s 19,8 % druhým největším spotřebitelem plastů v Evropě, což je znázorněno na obrázku 5. Prvním největším spotřebitelem je obalové hospodářství.

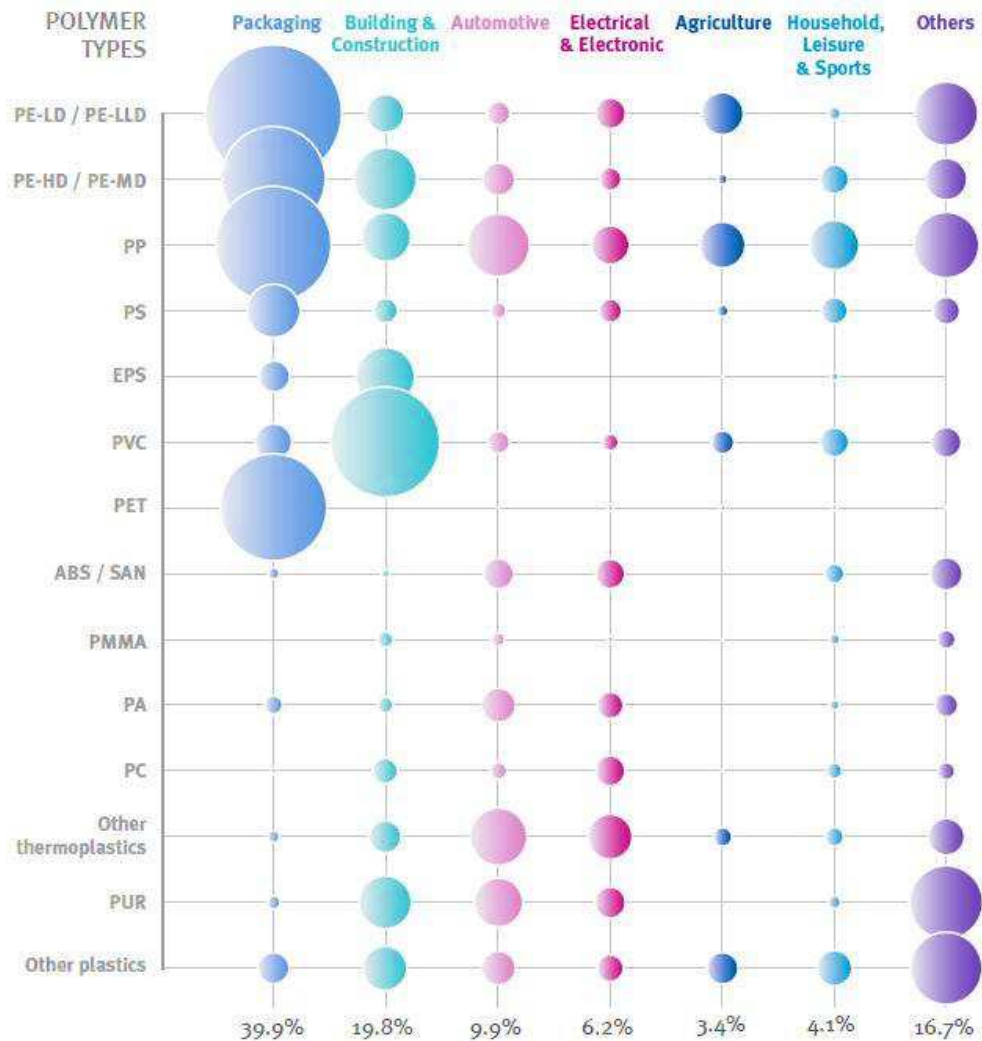


Obrázek 5 - Procentuální využití polymerů v různých odvětvích [27]

Ve stavitelství se polymery objevují buď jako materiály, ze kterých je konstrukční prvek přímo tvořen, nebo jsou v nějakém prvku částečně obsaženy jako přísady. Z termoplastů jsou většinou vyrobeny samostatné výrobky. Tyto výrobky jsou vytvořeny odléváním, vstřikováním, lisováním nebo válcováním. Reaktoplasty se na stavbách nejčastěji používají jako vytvrditelná pojiva, nebo jako vytvrzené kompozity.

Zastoupení jednotlivých druhů polymerů v určitých odvětvích je znázorněno na obrázku 6. Polymer s největším zastoupením ve stavebnictví je polyvinylchlorid, který je typickým materiálem na podlahovou krytinu a hydroizolační folie. Druhé největší zastoupení mají polyestery, kterým je více prostoru věnováno v kapitole 2.4.2.1.1. Dalšími využívanými polymery jsou vlákna PES (polyesterová), které jsou obsaženy v textilních materiálech a ve vláknech se dále využívají polyamidy. Desky extrudovaného polyesteru jsou využívány jako tepelná izolace. Epoxidové pryskyřice jsou výbornými pojivy pro velmi různorodé materiály, proto jsou využívány jak pro lepení nosníků, tak pro běžné lepení v domácnostech. V dnešním stavebnictví je velice využívána také polyuretanová (PUR) pěna, která se mimo jiné vyskytuje i v automobilech nebo v čalouněném nábytku. Silikonový kaučuk a polyakryláty se

dnes již běžně využívají pako těsnící tmely a polymerní disperze a roztoky zase jako impregnace, nebo jiné nátěrové hmoty. [6, 24, 25, 26, 27]



Obrázek 6 - Zastoupení různých druhů polymerů v různých odvětvích [27]

2.4.2.1.1. Polyethylen

Jak již bylo řečeno, jsou polyestery druhými nejpoužívanějšími polymery ve stavebnictví díky jejich široké rozmanitosti využití. Vyskytují se jak ve formě reaktivních pryskyřic, tak ve formě umělého kamene.

Na stavbách je možné je například spatřit ve formě obalů, kbelíků, dóz, přepravků, hladítek, podložek a také ochranné přilby jsou vyráběny z HDPE.

Jednou z výhod využívání polyethylenu je jeho relativně snadná recyklovatelnost díky lehké tavitelnosti. Problém je však jako u jiných polymerů v přídavných látkách jako jsou například pigmenty a v dalších modifikacích, které PE znečišťují. Tento polyethylen se proto využívá jen na méně náročné výrobky, jako jsou drenážní pásy, které vznikají natavováním vloček z PE na geotextilii. Tyto

drenážní pásy o tloušťce 3 cm mají stejnou účinnost jako 30 cm vrstva šterku a zároveň jsou velmi lehké, tudíž se dají využít i na střešní skladbu plochých střech. [6, 24]

2.4.2.1.2. Polyethylentereftalát

PET je nevíce používaný v obalovém hospodářství, ale i ve stavebnictví má své zastoupení a to především v podobě tkanin. Z těchto tkanin se většinou vyrábí sportovní oblečení a fleecové mikiny. Největší pozornost se však obecně věnuje PET lahvím.

Ve stavebnictví se však využívá i odpadní polyethylentereftalát. Například společnost VIA ALTA a. s. nabízí kompozitní materiál podobný betonu pro výrobu prefabrikátů. Tato technologie zvaná POLYBET využívá odpadní termoplasty, především PET lahve ve spojení s plnivý. POLYBET se vyrábí z hrubě tříděného odpadního termoplastu drceného na frakci 2–20 mm a plniva ve formě, kameniva, drceného skla apod. Tato směs je zahřívána, sušena, homogenizována, ve šnekovém extruderu, temperována na teplotu tání termoplastu a z dané taveniny jsou vylévány jednotlivé dekorativní, nebo stavební dílce. Výhodou tohoto kompozitního materiálu není pouze ve využití odpadního plastu, ale takto připravené produkty mají obdobnou pevnost v tlaku jako beton, vyšší pevnost v ohybu a nižší nasákavost. [6, 24, 28]

2.5. Recyklace odpadních plastů

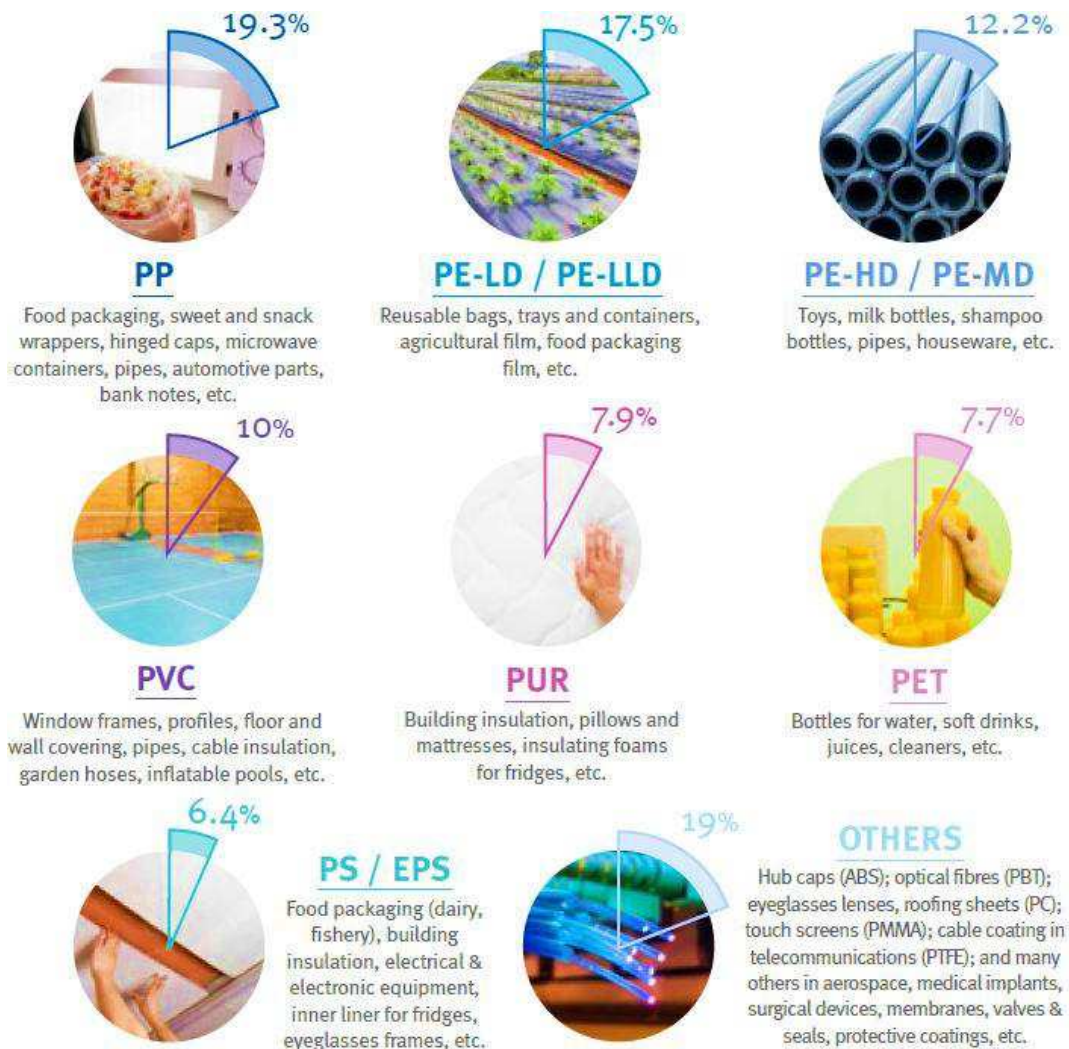
Světová produkce plastů roste, v roce 2018 dosáhla 359 milionů tun. Produkce



Obrázek 7 - Světová produkce polymerů [27]

2. Teoretická část

plastových odpadů v Evropě je ustálená a lehce klesá, v roce 2018 vyprodukovala evropská unie 61,8 milionů tun plastů. Tato produkce zahrnuje různé druhy plastů. Evropská poptávka po různých druzích polymerů je zobrazena na obrázku 8. Největší poptávka je po polypropylenu (PP) a následně po polyethylenu (PE).



Obrázek 8 - Procentuální zastoupení různých druhů polymerů v evropské poptávce [27]

Toto množství plastů je problémem pro životní prostředí, řada plastů je již svým účelem určena pro krátké použití jako obaly apod., ale jejich životnost je velmi dlouhá. Proto je jediným řešením recyklace. Recyklace znamená opětovné využití odpadního materiálu bez podstatných materiálových změn na stejný nebo jiný účel.

Polymery se mohou recyklovat různými způsoby. Zprv se jedná o materiálovou recyklaci, kdy se z odpadního polymeru vyrobí nový výrobek bez toho, aby proběhla chemická reakce. Nejběžnějším provedením této recyklace je vytřídění jednotlivého druhu polymerního odpadu a následně jeho přetavení. Ovšem jedním z problémů při tomto postupu je různobarevnost plastového odpadu, která je způsobená různými příměsi v plastech, které kontaminují daný polymer a také vytřídění nemusí být stoprocentní. Proto vlastnosti recyklátů nejsou takové jako nově

vyrobeného polymeru. Z tohoto důvodu jsou recykláty používány na prvky, které nemají příliš vysoké nároky na hygienické vlastnosti. Tento postup je však jeden z nákladnějších díky potřebě materiál pečlivě třídít, čistit. Po přetavení vzniká granulát, který je ještě potřeba dále zpracovat, aby se z něj stal koncový výrobek. Tyto výdaje se dají omezit jiným postupem materiálové recyklace a to například technologií vytlačování do formy a lisování.

Dále existuje chemická recyklace. K tomuto způsobu recyklace se přistupuje, když není vstupní polymerní odpad dostatečně čistý na mechanickou recyklaci. Chemická reakce funguje na principu chemického rozpadu polymerů na monomery, nebo oligomery, které se následně využijí na výrobu nových sloučenin. Výhodou, jak již bylo naznačeno, je, že vstupní materiál nemusí být tak čistý jako u mechanické recyklace. Nevýhodou je však jeho cena. Náklady na technologii a na podmínky ve kterých může proces probíhat, jsou značné. Nejjednodušším způsobem chemické recyklace je depolymerace. Při této reakci dochází k odštěpování koncových monomerů polymerních řetězců vlivem vysoké teploty. Tato reakce probíhá například u polystyrenu (PS) nebo polymethylmethakrylátu (PET). Z odštěpených monomerů je opět možné vyrobit původní sloučeniny.

Dalším případem chemické recyklace je solvolýza. Podstatou solvolýzy je opačný postup k polykondenzační reakci. V tomto případě dochází k odbourávání monomerů z polymerního řetězce důsledkem působení rozpouštědla. Solvolýza je účinná pro materiály na bázi polyamidů, polyuretanů a obzvláště účinná je pro lineární polyestery. Dle použitého druhu rozpouštědla můžeme rozlišovat konkrétní způsoby solvolýzy jako je například hydrolýza, při které se používá voda s kyselinami nebo zásadami. Hydrolýza je však dosti nákladná a například při reakci s PET vzniká velké množství odpadních látek ve formě solí. Jako katalyzátor může být použit také methanol, tento druh reakce se nazývá methanolýza. Methanolýza má stejné nevýhody jako hydrolýza a to, že se jedná o finančně a provozně náročnou metodu. Výhodou je, že nejsou kladené velké nároky na čistotu polymeru. Nejefektivnější pro polymery je glykolýza. Glykolýza je ekonomicky, technicky i ekologicky méně náročná než předchozí dvě metody. Jako reakční činidlo jsou používány glykoly (např. etylenglykol).

Dalším způsobem recyklování je surovinová recyklace. K tomuto způsobu recyklace se přistupuje u velmi různorodé směsi odpadních polymerů, kdy už je možné z polymerů získat pouze nízkomolekulární sloučeniny, které lze následně využít na výrobu jiných výrobků. Realizace surovinové recyklace může probíhat pyrolýzou, která je nejčastějším způsobem, dále hydrogenací a dalšími způsoby. Hydrogenace je chemická reakce mezi molekulami vodíku, kdy dochází k přesunu vodíkových atomů za vzniku kapalných uhlovodíků. Tato reakce probíhá pouze za vysokého tlaku. Jak již bylo řečeno, rozšířenější způsob je pyrolýza, ta využívá tepelného rozkladu plastů za nízké teploty i tlaku. Při této reakci vznikají plynné látky, oleje a koks. Tento koks je velmi jemný a díky této vlastnosti je využíván na čištění vzduchu i vody. Plyn je využitelný jako palivo a olej je vhodnou surovinou

pro další využití v petrochemii a energetice. Výhoda pyrolýzy je především finanční, kdy se ušetří na třídění odpadu a na tom, že ho není potřeba nijak čistit. Například pyrolýzou odpadních pneumatik vznikne zhruba 50 % oleje, 40 % pyrolytického koksu a 10 % pyrolýzního plynu.

Pokud odpadní plasty nelze zpracovat některým recyklačním postupem je možné je využít alespoň energeticky a to jejich spalováním. Získaná energie jejich spálením nahradí energii, která by jinak musela být vyrobena z neobnovitelných zdrojů, tudíž lze na spalování polymerů také koukat jako na druh recyklace. Polymery jsou dobře spalitelné látky. Klasická teplota nutná ke spalování polymerů je 900 °C. Polymery mají také výhodu ve vysoké výhřevnosti. Například PE má výhřevnost 43,3 MJ/kg, PET 23 MJ/kg a PP 44 MJ/kg. Odpadní plasty se energeticky využívají především v cementárnách, železárnách a ve spalovnách.

Pozitivní je, že v Evropě se tříděný odpad na rozdíl od roku 2006 dvakrát více recykluje, avšak stále je 25 % odpadního plastu pouze skládkováno, což je zobrazeno na obrázku č. 9.

V české republice průměrná domácnost vyprodukuje 32,4 kg tříděného plastu za rok. Tento plastový odpad je složen nejvíce z potravinových obalů a obalů od



Obrázek 9 - Vývoj nakládání s plastovými odpady v Evropské unii od roku 2006 do 2018 [27]

spotřebního zboží. Díky velkému množství recyklačních nádob na plasty, kterých je v ČR 176 300, svezou odpadové firmy více než 168 000 tun odpadního plastu.

Tříděný odpad se odváží na rozřídovací linky. Na těchto linkách se vytřídí přes 462 tun plastu denně. Tento krok je důležitý z důvodu vytřídění nežádoucího odpadu a zároveň se v tomto kroku rozřídí plasty dle základních skupin na PET, obaly, polystyren a směsný plast. PET lahve se ještě někdy rozřídí dle barev.

Z dotřizovací linky míří odpad na drcení a proprání. Zde se také v ČR nejčastěji přetvářejí na regranulované odpadní plasty, které jsou v dnešní době nejčastější surovinou pro další výrobu. Z odpadních plastů je 67 % recyklováno.

Recyklované plasty mají mnohé uplatnění. Z 50 PET lahví se dá vyrobit jedna fleecová bunda, nebo se z PET vláken vyrábí například koberce. Pěnový polystyren je možné znovu zužitkovat do izolačních tvárnic, nebo lehčeného betonu. Z plastových sáčků, folií a tašek se zase nejčastěji vyrábí po regranulaci opět nové folie. [27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35]

2.5.1. Recyklace odpadních plastů ve stavebnictví

V evropské unii bylo v roce 2018 ve stavebnictví spotřebováno 10,1 mil. tun nově vyrobených plastů. O množství odpadních plastů ve stavebnictví v České republice nejsou oficiální hodnoty. Nicméně je potřebné se otázkou recyklace, nebo energetického využití použitých plastů ve stavebnictví zabývat.

Z recyklovaných odpadních plastů se v dnešní době dá vyrobit velké množství věcí, od textilií až po materiály nahrazující beton či dřevo. Jedním ze způsobů recyklace odpadních plastů je jejich využití v železobetonových kazetových a žebrových stropech ve formě vylehčujících vložek, dále se dají využít na výrobu folií, desek, krytů elektropřístrojů, přepravek, trubek, kanalizačních rour, zatravnovacích tvárnic, bednicích prvků atd.



Obrázek 10 - zatravnovací dlažba z traplastu [38]

2. Teoretická část

Jako další uplatnění je již zmiňována částečná náhrada dřeva takzvaný dřevoplast, kde jednotliví výrobci používají různé typy odpadního plastu, jako je HDPE, PP a PVC (polyvinyl chloride) v různém poměru se dřevem. Dle prozatímní praxe se jako nejlepší zdá směs 50 % odpadního PVC s 50 % dřeva. Dřevoplast je především využíván na podlahu teras a ploty. Na terasy, ploty, zatravnovací dlažbu a žlaby se také využívá materiál zvaný traplast. Tento materiál je vyroben pouze z recyklovaného plastového odpadu, a přesto snese dostatečné zatížení, není negativně ovlivňován slunečním zářením, vlhkostí a je odolný vůči plísním, houbám a běžným chemikáliím.



Obrázek 11 - střešní krytina společnosti Capacco spol. s r. o [40].

Z recyklovaného plastu se také vyrábí střešní krytiny. Například společnost Capacco vyrábí krytiny z recyklovaného plastu kabelových izolantů což je měkčené PVC. Výhody této střešní krytiny nejsou pouze environmentální, ale také jejich samozhášivost, nízká hmotnost a odolnost. Tvárnost této střešní krytiny je výhodou při použití na kulatých střeších.



Obrázek 12 - pryžový granulát [43]

Odpadní polymery se využívají i jako přísada do silničních asfaltů. Tyto asfalty jsou modifikovány přísadami, které zlepšují jejich vlastnosti. Polymery využívané do asfaltových směsí jsou termoplasty, nebo pryžový granulát. Jeden z možných způsobů, kde získat pryžový granulát je z odpadních pneumatik. Tento granulát se používá nejenom jako modifikační přísada, ale také jako částečná náhrada kameniva. Výhoda příměsi pryžového granulátu je zaprvé ve snížení tloušťky oproti běžným vrstvám asfaltových vrstev. Dále je odolnější vůči únavě, stárnutí, deformacím a trhlinám. Životnost tohoto materiálu zatím není známa, z důvodu že se používá pouze 30 let, ale náklady na údržbu se prozatím zdají nižší. Tyto asfalty mají ještě za výhodu, že jsou recyklovatelné, snižují hlučnost a zvyšují přilnavost. Naopak nevýhodou aplikace těchto materiálů je energetická náročnost, vyšší pracnost a cena. Náklady na tento materiál jsou alespoň jeden a půl krát větší než na běžnou směs.

Odpadní plasty se přidávají také do betonu. Prostý beton, má vysokou pevnost v tlaku, ale poměrně nízkou pevnost v tahu. Probíhaly a stále probíhají různé výzkumy o tom, jak tuto pevnost zvýšit. Jednou ze zkoumaných možností, je přidání PET vláken jako výztuže do betonu. Z dostupných výzkumů vychází, že přítomnost vláken v betonu zlepšuje jeho vlastnosti, především jsou výhodné v místech nebezpečí vzniku trhlin, kde zabraňují dalšímu šíření a zvyšují tažnost. Vlákná z PET lahví jsou vhodná do betonu i z důvodu, že chemicky nereagují s žádnou složkou v betonu, na rozdíl od ocelových vláken nezvyšují hmotnost, nekorodují na styku se vzdušnou vlhkostí a také snižují vodivost výsledných kompozitů. Jako výztužná vlákna jsou využívány různé tvary PET vláken. Jedná se buď o klasické proužky, kruhy, které se získají kolmým rozřezáním PET lahve, nebo proužky které prošly termickou reakcí a podélně se zkroutily. Tvar kruhových a zkroucených vláken má výhodu v lepším propojení s betonem. Ke každému druhu výztuže proběhla studie, která se zabývala mechanickými vlastnostmi betonu. Dále byl prováděn i výzkum, kde se krom polyethylentereftalátu mohou do betonu přidávat odřezky gumových pneumatik. Tyto odřezky nahrazovaly částečně kamenivo a měly pozitivní vliv na jeho pružnost, tažnost a energetickou absorpenci. [25, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46]

3. Experimentální část

V experimentální části bylo cílem zjistit skutečný vliv příměsí drti z odpadních termoplastů na vlastnosti betonu pomocí zkušebních vzorků.

Do směsi betonu byly používány dva druhy odpadních plastů. V jednom případě se jednalo, o drcené PET lahve a v druhém se jednalo, o drcené PE obaly. Tato drť byla přidávána v různém množství do různých betonových směsí a následné výsledky zkoušek pevnosti byly porovnávány.

Nejdříve jsou v experimentální části popsány suroviny, které byly použity na výrobu zkušebních vzorků, jako je cement, kamenivo, voda a již řečené odpadní plasty. Dále se experimentální část věnuje přípravě směsí pro výrobu betonu, kde je řešen návrh použitých poměrů, surovin, teplot a doby zahřívání vzorků. Poté jsou popsány prováděné typy zkoušek na připravených vzorcích. Řešeny byly především mechanické vlastnosti, které jsou pro beton nejdůležitější jako pevnost v tlaku a v tahu za ohybu. Vzorky s příměsí plastových odpadních látek byly po té porovnávány se vzorky bez příměsí a vyhodnocena možnost použití.

Na konci této práce byl vyhodnocen vliv dvou zkoušených druhů odpadních plastů na beton z pohledu pevnostních charakteristik v závislosti na způsobu tepelné úpravy a možnosti dalších úprav tak, aby došlo k co nejlepšímu využití zkoušených drcených plastů. K vyhodnocení byly použity výsledky měření z této experimentální části.

3.1. Suroviny pro zkoušky

V experimentální části na výrobu zkušebních tělísek bylo využíváno pět základních surovin. Zkušební vzorky byly vyráběny v normových troj formách o rozměrech 40 x 40 x 160 mm.

3.1.1. Cement

Pro výrobu zkušebních vzorků byly používány tři druhy cementů o různých pevnostních třídách a zjišťován jejich vliv na zkoušené směsi.

3.1.1.1. Cement pevnostní třídy 32,5

Nejnižší pevnostní třídu měl cement společnosti Českomoravský cement a. s. ze závodu Mokrý. Jednalo se o portlandský směsný cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R. Zde se podle označení jedná o portlandský směsný cement obsahující

3. Experimentální část

celkové množství vysokopecní granulované strusky (S) a vápence s obsahem celkového organického uhlíku, který nepřesahuje 0,20 % hmotnosti (LL), mezi 21–35 % hmotnosti, pevnostní třídy 32,5 s vysokými počátečními pevnostmi. Složení je uvedeno v tabulce 2 a mechanické vlastnosti v tabulce 3.

Tabulka 2 - Složení cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R [47]

Označení složek	Název složek	Podíl složek (%)
Hlavní	Mletý portlandský slínek	65–79
	Vysokopecní struska	21–35
Doplňující	Síran vápenatý a jiné	0–5

Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R [47]

Parametr pevnosti	Doba zrání (dny)	Průměrná pevnost (MPa)
V tlaku	1	9
	7	35
	28	47
V tahu za ohybu	1	2
	7	7
	28	8

3.1.1.2. Cement pevnostní třídy 42,5

Dále byl použit cement s pevnostní třídou 42,5. Tento cement byl od společnosti Lafarge Cement, a. s. ze závodu Čížkovice. Byl to portlandský cement s označením CEM I 42,5 R. Označení říká krom toho, že cement byl portlandský o pevnostní třídě 42,5 také to, že cement měl vysoké počáteční pevnosti.

Tabulka 4 - Složení cementu CEM I 42,5 R [48]

Označení složek	Název složek	Podíl složek (%)
Hlavní	Mletý portlandský slínek	95–100
Doplňující	Síran vápenatý a jiné	0–5

Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R [48]

Parametr pevnosti	Doba zrání (dny)	Průměrná pevnost (MPa)
V tlaku	2	32
	28	58

3.1.1.3. Cement pevnostní třídy 52,5

Nakonec byl použit cement od společnosti Českomoravský cement a. s. ze závodu Mokrý. Jednalo se o portlandský cement CEM I 52,5 R. Kde se podle označení jedná o portlandský cement pevnostní třídy 52,5 s vysokými počátečními pevnostmi.

Tabulka 6 - Složení cementu CEM I 52,5 R [49]

Označení složek	Název složek	Podíl složek (%)
Hlavní	Mletý portlandský slínek	95–100
Doplňující	Síran vápenatý a jiné	0–5

Tabulka 7 - Mechanické vlastnosti CEM I 52,5 R [49]

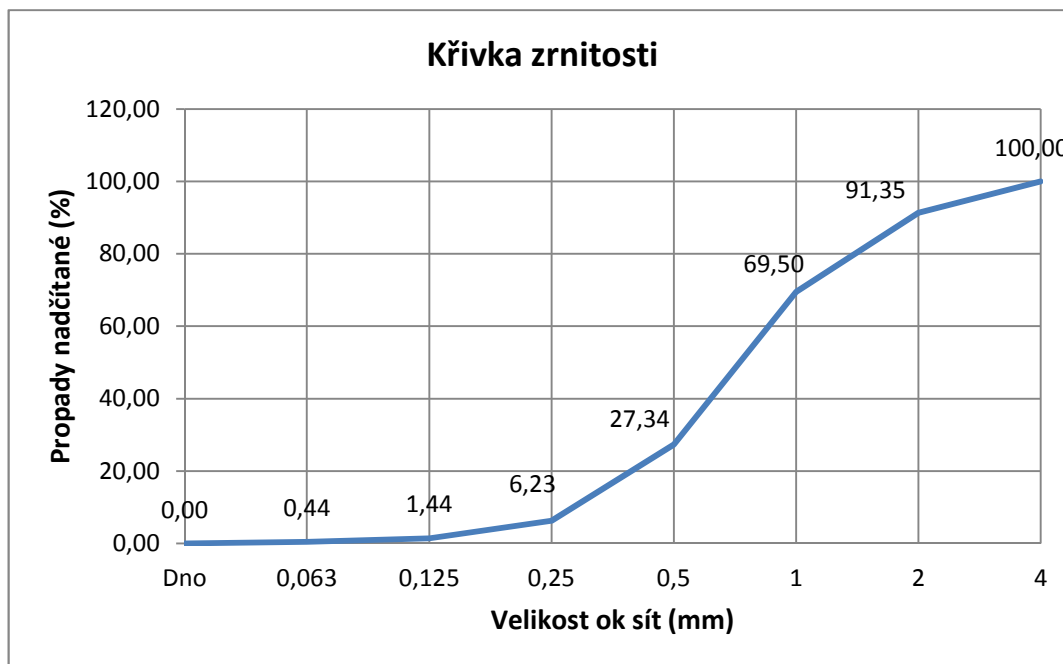
Parametr pevnosti	Doba zrání (dny)	Průměrná pevnost (MPa)
V tlaku	1	25
	7	57
	28	65
V tahu za ohybu	1	6
	7	8
	28	9

3.1.2. Kamenivo

Další základní surovinou pro výrobu zkušebních vzorků bylo použito kamenivo, písek frakce 0–4 mm, na kterém byl proveden síťový rozbor.

Tabulka 8 - Kamenivo použité pro zkoušky

Velikost ok sít (mm)	Zbytky na sítích			Propad sítím
	(g)	(%)	Nadčítaně (%)	
4,000	0,0	0,00	0,00	100,00
2,000	48,7	8,65	8,65	91,35
1,000	123,1	21,85	30,50	69,50
0,500	237,5	42,16	72,66	27,34
0,250	118,9	21,11	93,77	6,23
0,125	27,0	4,79	98,56	1,44
0,063	5,6	0,99	99,56	0,44
Dno	2,5	0,44	100,00	0,00



Graf 1 – Křivka zrnitosti použitého kameniva

3.1.3. Voda

Jakost záměsové vody má vliv na následnou kvalitu betonu, může tedy ovlivnit dobu tuhnutí a vývoj pevnosti betonu. Do vyráběných vzorků byla přidána záměsová voda z vodovodního řadu, která vyhovuje svým pH, chemizmem a dalšími vlastnostmi požadavkům ČSN EN 1008 (73 028): Záměsová voda do betonu.

3.1.4. Příměsi plastů

Do vzorků byly přidávány dva druhy příměsí vyrobené z odpadního plastu bez následných úprav poskytnutého společností WANSIDA Int. s. r. o. zabývající se zpracováním odpadních plastů.

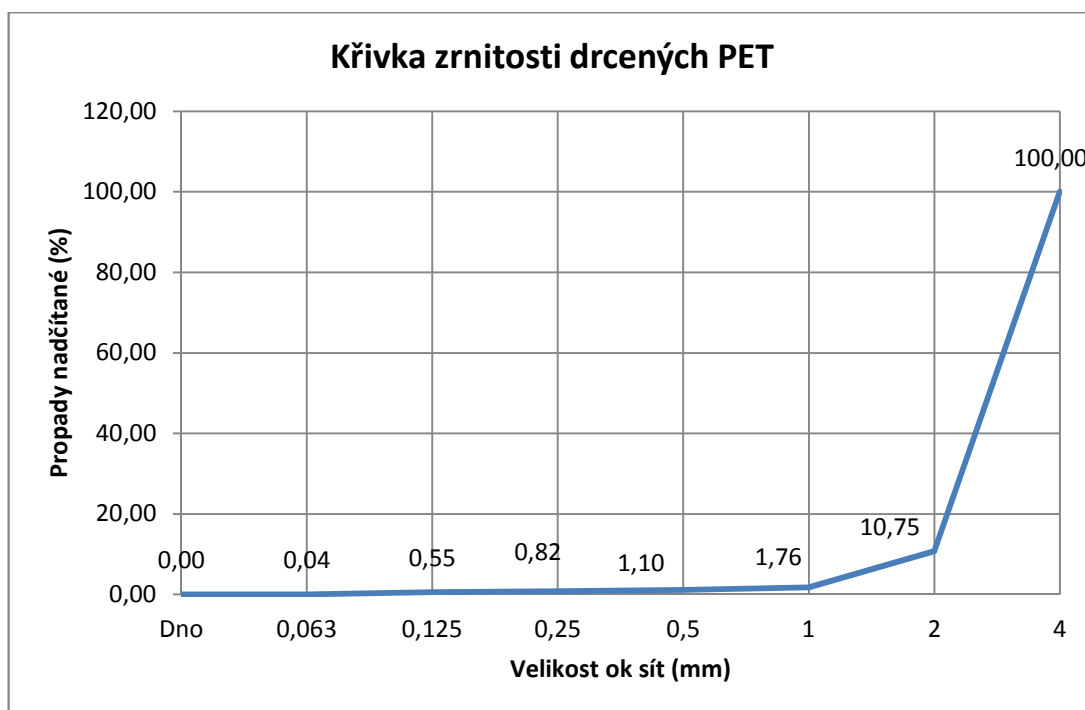
3.1.4.1. Polyethylentereftalát

Byla použita drť z drceného polyethylentereftalátu frakce 0–4 mm. Tato drť byla vyrobena z PET lahví, které společnost WANSIDA Int. s. r. o. rozdrtila pomocí výkonných drticích zařízení. Na této drti byl proveden síťový rozbor.

3. Experimentální část

Tabulka 9 - PET použité na zkoušky

Velikost ok sít (mm)	Zbytky na sítích			Propad sítím
	(g)	(%)	Nadčítaně (%)	
4,000	0,0	0,00	0,00	100,00
2,000	228,2	38,18	38,18	61,82
1,000	121,4	32,03	70,21	29,79
0,500	65,4	17,26	87,47	12,53
0,250	31,9	8,42	95,88	4,12
0,125	12,5	3,30	99,18	0,82
0,063	2,8	0,74	99,92	0,08
Dno	0,3	0,08	100,00	0,00



Graf 2 – Křivka zrnitosti použitého polyethylentereftalátu



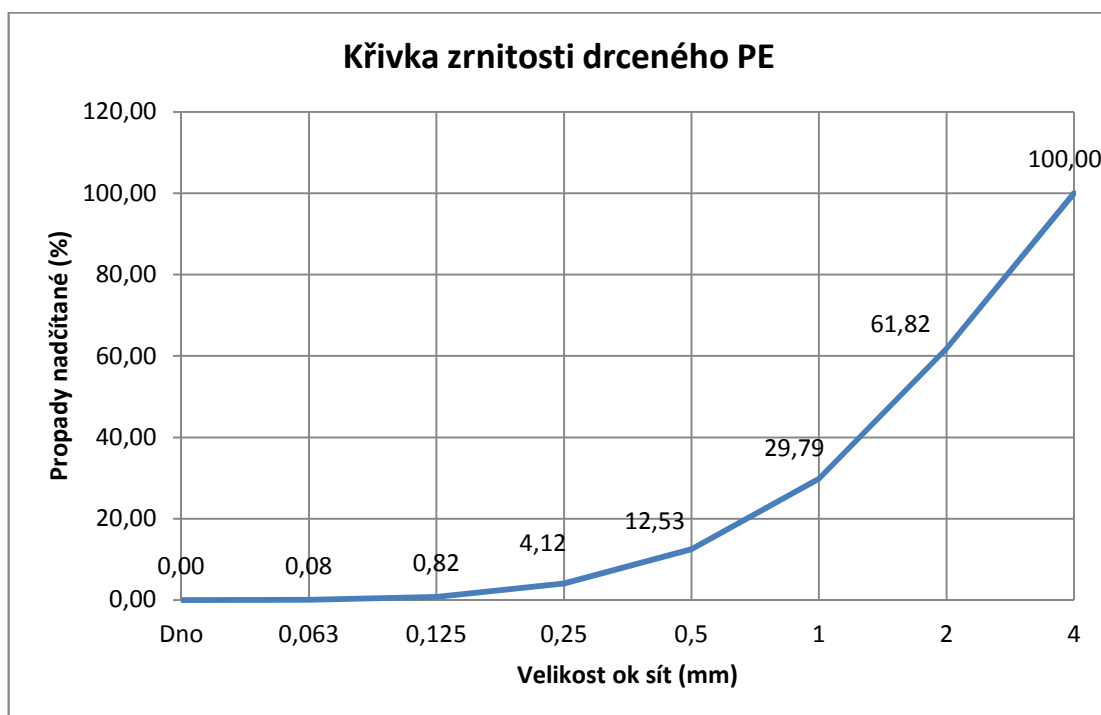
Obrázek 13 - Drť PET frakce 0–4 mm použitá na přípravu vzorků (zvětšený detail)

3.1.4.2. Polyethylen

Jako druhý odpadní plast byla použita drť obalů z polyethylenu frakce 0–4 mm, na kterém byl proveden také síťový rozbor znázorněn na grafu č. 3.

Tabulka 9 - PE použitý na zkoušky

Velikost ok sít (mm)	Zbytky na sítích			Propad sítím
	(g)	(%)	Nadčítaně (%)	
4,000	0,0	0,00	0,00	100,00
2,000	144,7	38,18	38,18	61,82
1,000	121,4	32,03	70,21	29,79
0,500	65,4	17,26	87,47	12,53
0,250	31,9	8,42	95,88	4,12
0,125	12,5	3,30	99,18	0,82
0,063	2,8	0,74	99,92	0,08
Dno	0,3	0,08	100,00	0,00



Graf 3 – Křivka zrnitosti použitého polyethylenu



Obrázek 14 - Drť PE frakce 0–4 mm použitá na výrobu vzorků (zvětšený detail)

3.2. Příprava a provedení zkoušek

Tato kapitola se zabývá provedenými zkouškami v rámci výzkumu vlivu termoplastů na pevnost v betonu. Jsou zde popsány postupy přípravy vzorků, následně způsoby zkoušení a na závěr vyhodnocení výsledků provedených zkoušek.

3.2.1. Zkouška vlivu teploty na pevnost betonu

Nejdříve byly provedeny zkoušky, ve kterých byl hodnocen vliv zahřívání prostého betonu na pevnost v tlaku a na pevnost v tahu za ohybu.

K přípravě zkušebních směsí byly využívány suroviny popsané v kapitole 3.1. U této zkoušky se do betonu přidával pouze cement 42,5, kamenivo a voda. Suroviny byly nejdříve naváženy na kalibrované váze s přesností na 0,1 g. Cementu bylo naváženo 450 g, kameniva 1350 g a vody 215 g, což odpovídá potřebnému množství pro naplnění jedné trojformy na trámečky pro následné zkoušky pevnosti. Následně byly důkladně promíchány suché složky, poté byla přidána voda a směs opět promíchána. Míchání bylo prováděno ručně za pomoci zednické lžice. Stále stejným postupem přípravy složek a doby míchání složek, bylo docíleno potřebné stejnorodosti výsledných vzorků. Beton byl po promíchání plněn do ocelové rozebíratelné formy na trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Tato forma byla před naplněním řádně ošetřena odformovacím olejem. Po naplnění formy byly vzorky hutněny na stolním vibrátoru vždy stejnou dobu.

Vzorky byly ponechány ve formách 24 hodin a následně odformovány. Vyjmuté vzorky byly vloženy do vody a ponechány zrát 16 hodin při teplotě 60 °C v horkovzdušné sušárně. Vzorky vyjmuté z vody byly vysušeny opět při 60 °C v horkovzdušné sušárně. Po vysušení se 9 vzorků vždy po třech kusech zahřívalo 3 hodiny na různé teploty v elektrické peci a tři vzorky byly ponechány bez zahřívání. Zvoleny byly teploty 150 °C, 200 °C a 250 °C. Po vychladnutí se vzorky zvážily na digitální váze, změřila se proměnná šířka pomocí mikrometru a následně se pro každý jednotlivý vzorek určila objemová hmotnost.

Tabulka 10 - Průměrná objemová hmotnost vzorků

Teplota zahřívání vzorků (°C)	Průměrná objemová hmotnost (kg/m ³)
20	2166
150	2060
200	2035
250	2042

Z naměřených hodnot objemové hmotnosti je patrné, že čím je vyšší teplota na kterou se vzorky zahřívají, tím byla objemová hmotnost vzorků nižší. Lehce vyšší hodnota při zahřívání vzorků na 250 °C než při zahřívání na 200 °C je nejspíše způsobena lidským faktorem při přípravě vzorků.



Obrázek 15 - Vzorky na zkoušku vlivu teploty na pevnost betonu

Na obrázku 15 jsou vidět vzorky na zkoušku vlivu teploty na pevnost betonu po zahřívání. Vzorky 1–3 byly ponechány bez zahřívání, vzorky 4–6 byly 3 hodiny pečené na 150 °C, 7–9 na 200 °C a 10–12 na 250 °C.

3.2.1.1. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Na připravených vzorcích byla provedena zkouška stanovení pevnosti betonu v tahu ohybem. Podstatou zkoušky je vystavení zkušebního vzorku zatížení pomocí zkušebního přístroje a ze zjištěné nejvyšší hodnoty zatížení, při které došlo k porušení vzorku, se vypočítá pevnost v tahu ohybem.

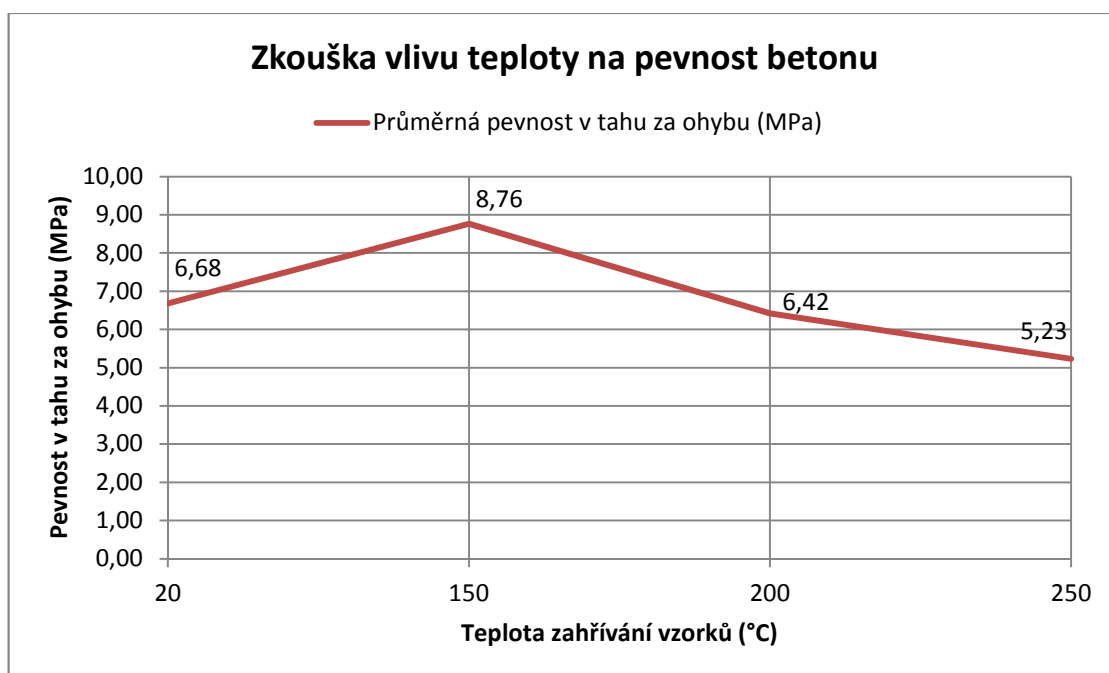
Zkušební tělesa byla zatěžována jedním břemenem uprostřed. Jednalo se o tak zvanou tříbodovou zkoušku. Zatížení je přenášeno pomocí jednoho zkušebního válečku uprostřed a dva spodní protilehlé válečky tvoří podpory.

Byl použit zkušební přístroj značky HECKERT typu ZD 10/90 na kterém byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tahu za ohybu příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 11 - Průměrné pevnosti v tahu za ohybu

Teplota zahřívání vzorků (°C)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu (MPa)
20	6,68
150	8,76
200	6,42
250	5,23

Naměřené hodnoty jsou vykreslené v grafu, kde je patrný nejdříve vzestup pevnosti při zahřátí vzorku na 150 °C a následný pokles při teplotách 200 a 250 °C. Pokles pevnosti mezi nezahřátým a zahříváním vzorkem na 250 °C činí 1,45 MPa.



Graf 4 – Vliv teploty na pevnost betonu v tahu za ohybu

3.2.1.2. Stanovení pevnosti v tlaku

Dále byly na zlomcích trámečků, které zbyly po zkoušce pevnosti betonu v tahu za ohybu provedeny zkoušky pevnosti v tlaku. Podstatou této zkoušky je zatěžování zkušební vzorku až do jeho porušení. Maximální hodnota zatížení je následně přepočítána na pevnost betonu v tlaku.

Mezi tlačné desky zkušební lisu byly umístovány zkušební vzorky tak, aby byl směr ukládání betonu kolmý na směr následného zatěžování. Poté byly jednotlivé vzorky plynule zatěžovány až do porušení.

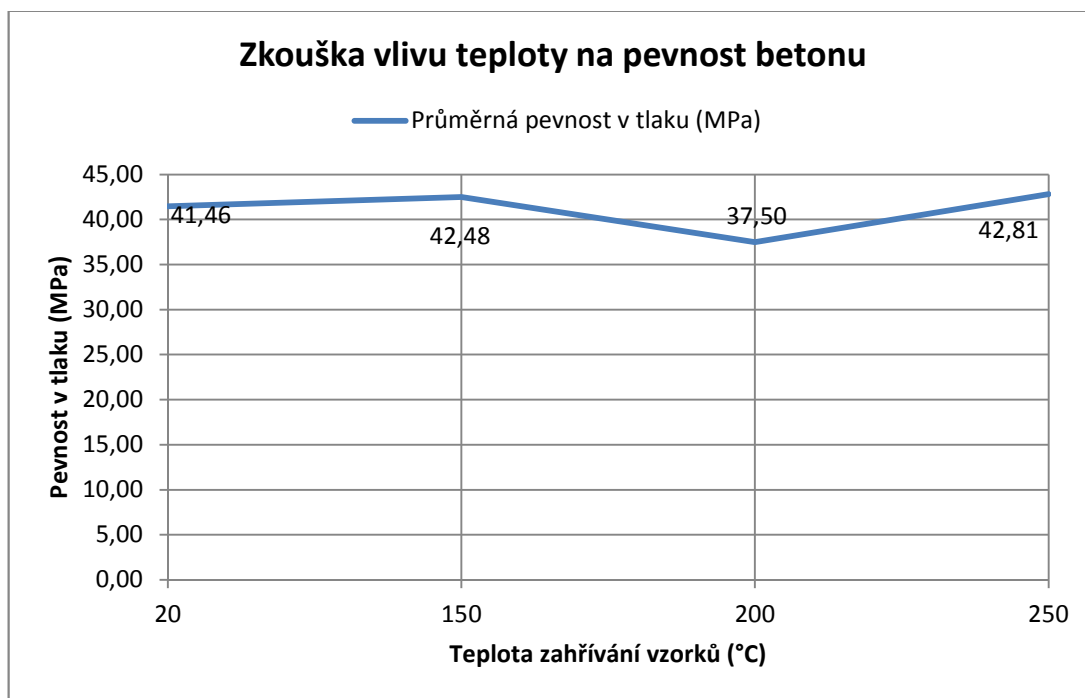
3. Experimentální část

Byl opět použit zkušební lis HECKERT typu ZD 10/90 do kterého byl osazen tlačný přípravek BTP 300, který má tlačné plochy o rozměrech 40 x 40 mm. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná hodnota v tlaku vyrobených sad vzorků, které jsou přehledně zapsány v následující tabulce.

Tabulka 12 - Průměrná pevnost betonu v tlaku

Teplota zahřívání vzorků (°C)	Průměrná pevnost v tlaku (MPa)
20	41,46
150	42,48
200	37,50
250	42,81

Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je vidět, že pevnost v tlaku je při nezahřívání i zahřívání obdobná. Oproti původnímu nezahřívánému vzorku byla pevnost vzorku zahřívávaného na 250 lehce vyšší.

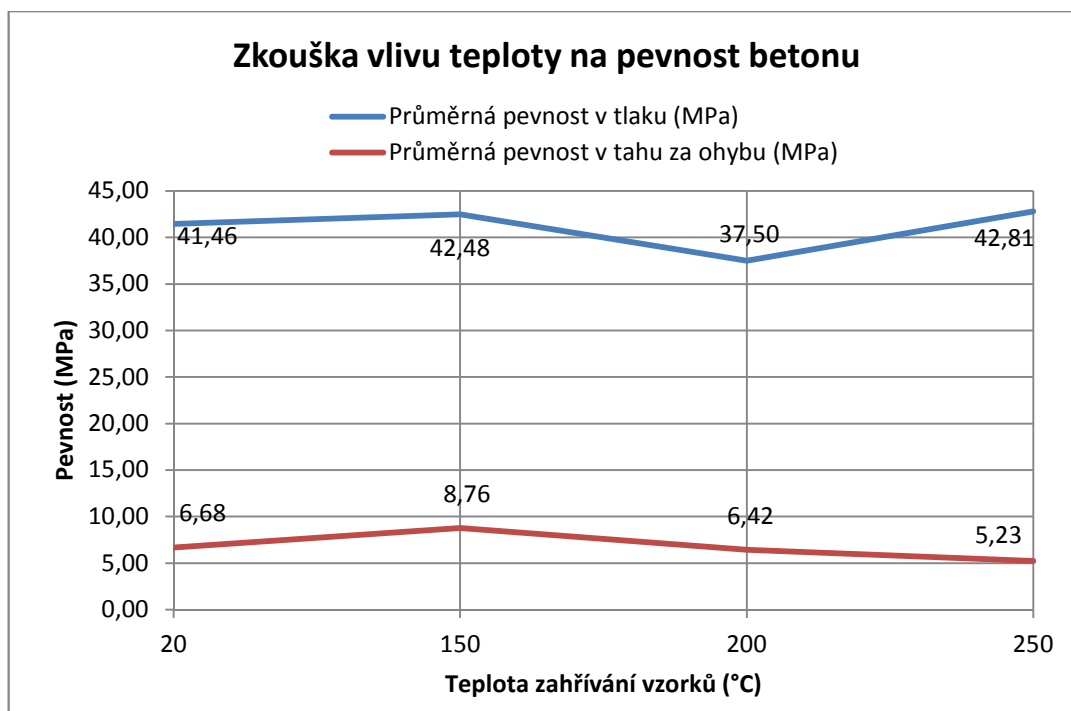


Graf 5 – Vliv teploty na pevnost betonu v tlaku

3.2.1.3. Vyhodnocení vlivu teploty na pevnost betonu

Při pohledu na souhrnný graf pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu lze konstatovat, že při zahřívání vzorků 3 hodiny na 150 °C se vlastnosti betonu zlepšily jak v tlaku tak ohybu. Při zahřívání vzorků 3 hodiny na 200 °C se pevnost betonu v tahu i v tlaku lehce snížila oproti nezahřívánému vzorku. A při zahřívání 3 hodiny

na 250 °C byla pevnost betonu v tlaku oproti původnímu vzorku opět vyšší, ale pevnost v tahu za ohybu se o 1,45 MPa snížila.



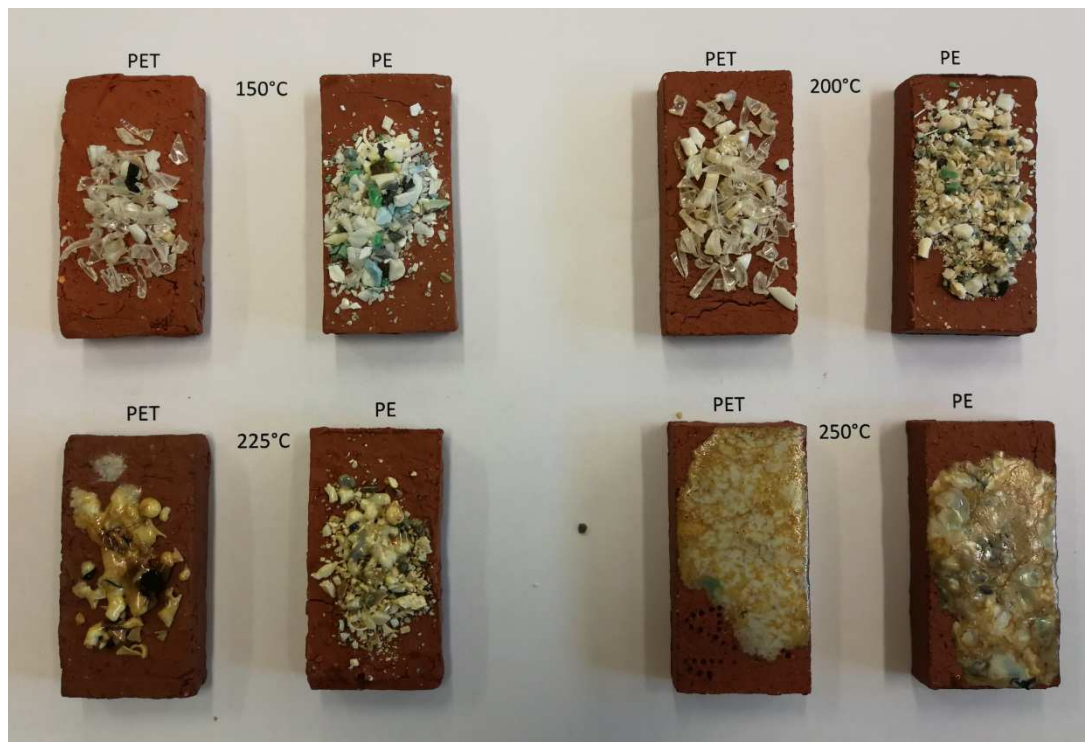
Graf 6 – Vliv teploty na pevnost betonu

3.2.2. Zkouška teploty tavení plastů

Následně bylo potřeba zjistit, za jakých teplot se použitý plastový odpad taví. Tato informace byla zjišťována pro dva druhy plastového odpadu, které byly následně používány jako příměs do zkušebních vzorků a které jsou popsány v kapitole 3.1.4.

Vzorky polyethylentereftalátu a polyethylenu byly nasypány na keramické cihličky a takto připravené vzorky byly zahřívány postupně na čím dál větší teplotu, dokud nebylo dosaženo roztavení plastového odpadu.

Na obrázku č. 4, jsou vidět vzorky nejdříve po zahřívání v peci na teplotu 150 °C, kde nedošlo ke změně. Při teplotě 200 °C bylo na vzorcích viditelné zahřátí a měknutí plastu, ovšem ještě nedošlo k jeho tavení. Po zvýšení teploty na 225 °C se vzorek částečně začal tavit, ovšem ne v celém objemu, tudíž byla teplota opět navýšena. Při teplotě 250 °C došlo k plnému roztavení vzorku obou druhů plastů.



Obrázek 16 - vzorky odpadních plastů po zahřívání na různé teploty

3.2.2.1. Vyhodnocení zkoušky teploty tavení plastů

Touto zkouškou bylo zjištěno, že potřebná teplota na roztavení použitého plastového odpadu je 250 °C. Tato zjištěná hodnota byla následně využívána pro další pokusy.

3.2.3. Zkouška doby zahřívání vzorků obsahující plastovou příměs

Po zjištění potřebné teploty na roztavení plastu bylo dále třeba zjistit, jak dlouho se musí vzorek zahřívát, aby došlo k jeho prohřátí a roztavení použitého plastového odpadu v celém objemu vzorku.

K přípravě zkušebních vzorků byl využit cement pevnostní třídy 42,5, kamenivo, polyethylen a voda, všechny suroviny jsou popsány v kapitole 3.1. Cementu bylo na kalibrované váze s přesností na 0,1 g naváženo 450 g. Kameniva se také nejdříve navážilo 1350 g, takto navážené kamenivo bylo následně vsypáno do odměrného válce a změřen jeho objem, který byl 870 ml. Následně bylo 10 % objemu, což je 87 ml písku nahrazeno polyethylenem. Všechny sypké složky se důkladně promíchaly ručně pomocí zednické lžice. Po dostatečném promíchání bylo přidáno 200 ml vody a opět byla směs důkladně promíchána. Směs se následně plnila

3. Experimentální část

do trojformy na trámečky ošetřené odformovacím olejem. Po naplnění formy byly vzorky hutněny na stolním vibrátoru.

Vzorky se ponechaly ve formách vždy 24 hodin a následně odformovaly. Vyjmuté vzorky byly vloženy do vody a ponechány zrát 16 hodin při teplotě 60 °C v horkovzdušné sušárně. Vzorky vyjmuté z vody byly vysušeny opět na 60 °C v horkovzdušné sušárně. Po vysušení se vzorky zahřivali na 250 °C v peci a po hodině byly postupně vždy po 3 vzorcích vyjmuty z pece. Poté se vzorky zvážíli na digitální váze, změřila se proměnná šířka pomocí digitálního posuvného měřítka a ze zjištěných hodnot byla pro každý vzorek určena objemová hmotnost.

Tabulka 13 - průměrná objemová hmotnost vzorků

Doba zahřívání vzorků na 250 °C (hod)	Průměrná objemová hmotnost (kg/m ³)
0	2108
1	1995
2	1995
3	1999
4	1994
5	2000

Z naměřených hodnot je patrné, že se při zahřátí na 250 °C objemová hmotnost snížila, ale již tolik nezáleželo na době zahřívání, jelikož se hodnoty objemové hmotnosti vzorků zahříváných 1, 2, 3, 4 i 5 hodin pohybovaly v podobných číslech.



Obrázek 17 - vzorky pro zkoušku doby zahřívání vzorků s PE

Na obrázku 17 jsou vidět vzorky na zkoušku doby zahřívání vzorků obsahujících plastovou příměs, až na vzorky zahříváné 4 a 5 hodin. Vzorky 1–3 byly zahřívány na 250 °C jednu hodinu, vzorky 4–6 dvě hodiny, 7–9 tři hodiny a 10–12 byly ponechány bez zahřívání.

3.2.3.1. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Na připravených vzorcích byla provedena zkouška stanovení pevnosti betonu v tahu ohybem. Podstatou zkoušky je vystavení zkušebnímu vzorku zatížení pomocí zkušebnímu přístroji a ze zjištěné nejvyšší hodnoty zatížení, při které došlo k porušení vzorku, se vypočítá pevnost v tahu ohybem.

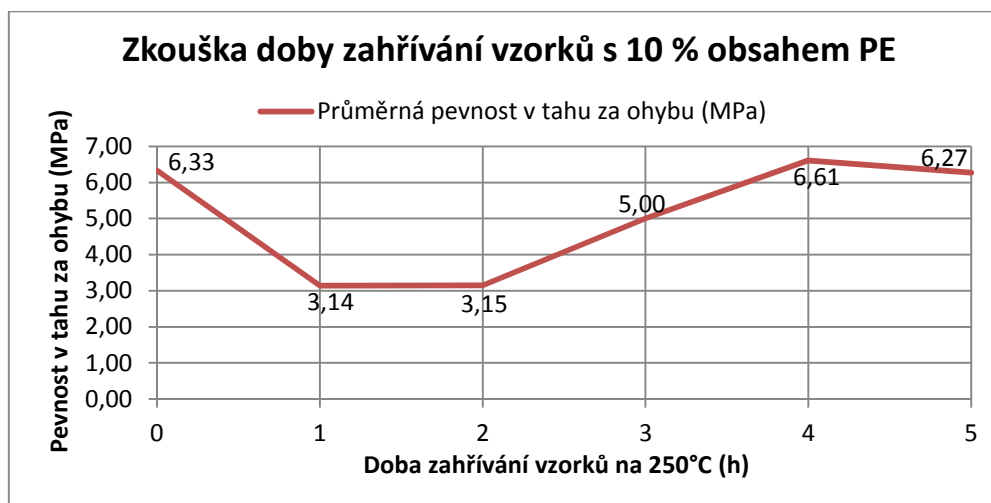
Zkušební tělesa byla zatěžována jedním břemenem uprostřed. Jednalo se o tak zvanou tříbodovou zkoušku. Zatížení je přenášeno pomocí jednoho zkušebnímu válečku uprostřed a dva spodní protilehlé válečky tvoří podpory.

Byl použit zkušební přístroj značky HECKERT typu ZD 10/90 na kterém byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tahu za ohybu příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 14 - Průměrné pevnosti v tahu za ohybu

Doba zahřívání vzorků na 250 °C (hod)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu (MPa)
0	6,33
1	3,14
2	3,15
3	5,00
4	6,61
5	6,27

Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu kde je vidět nejdříve pokles pevnosti po jedné i dvou hodinách zahřívání. Po třech hodinách je pevnost stále menší než u nezahřívajícího vzorku ale vyšší než u vzorků zahřívajících 1 a 2 hodiny. Po 4 a 5 hodinách je pevnost srovnatelná s nezahřívajícími vzorky.



Graf 7 – Vliv doby zahřívání na pevnost betonu v tahu za ohybu

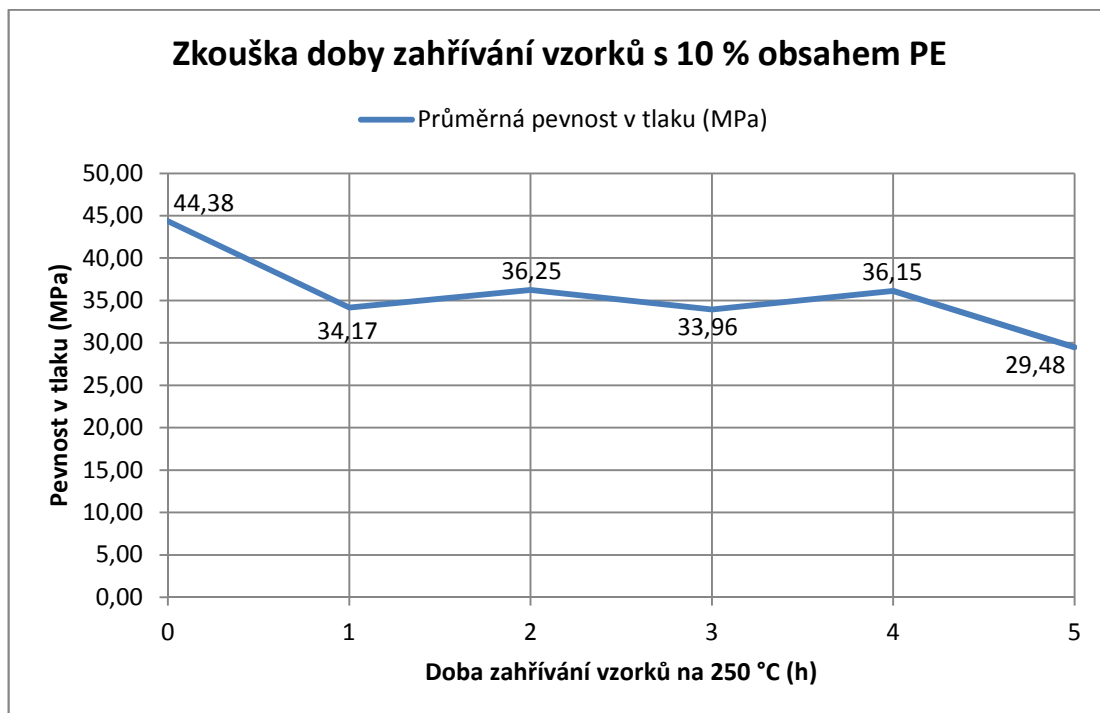
3.2.3.2. Stanovení pevnosti v tlaku

Dále byly na půlkách trámečků, které zbyly po zkoušce pevnosti betonu v tahu za ohybu provedeny zkoušky pevnosti v tlaku. Podstatou této zkoušky je zatěžování zkušební vzorku až do jeho porušení. Maximální hodnota zatížení je následně přepočítána na pevnost betonu v tlaku.

Mezi tlačné desky zkušební lisu byly umísťovány zkušební vzorky tak, aby byl směr ukládání betonu kolmý na směr následného zatěžování. Poté byly jednotlivé vzorky plynule zatěžovány až do porušení. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná hodnota v tlaku vyrobených sad vzorků, které jsou přehledně zapsány v následující tabulce.

Tabulka 15 - průměrná pevnost betonu v tlaku

Doba zahřívání vzorků na 250 °C (hod)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu (MPa)
0	44,38
1	34,17
2	36,25
3	33,96
4	36,15
5	29,48

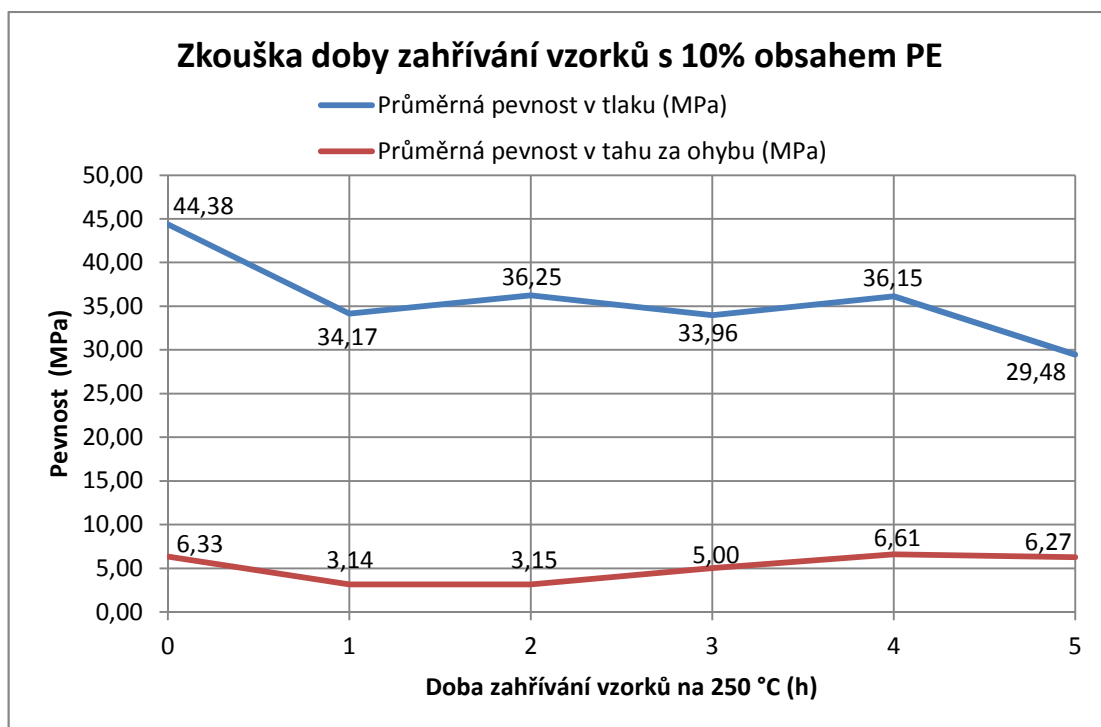


Graf 8 – Vliv teploty na pevnost betonu v tlaku

Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je patrný pokles pevnosti při zahřívání vzorků. Pevnosti betonu od 1 hodiny do 4 hodin zahřívání jsou podobné avšak o cca 9 MPa nižší než u nezahříváných vzorků. Při 5 hodinách se pevnost opět snížila a to oproti nezahřívávanému vzorku o 14,9 MPa.

3.2.3.3. Vyhodnocení vlivu doby zahřívání betonu

Při pohledu na souhrnný graf lze konstatovat, že pevnost v tlaku se zahříváním vzorků nezvyšuje, ale pevnost v tahu za ohybu se od tří hodin zahřívání zvyšuje a nejvyšší pevnost v tahu za ohybu je při 4 hodinách.



Graf 9 – Vliv teploty na pevnost betonu v tlaku

Po vyhodnocení dosavadních výsledků, kdy lze konstatovat, že velké a dlouhé zahřívání cementu ve vzorcích nemá pozitivní vliv na konečné výsledky a také s ohledem na finanční náklady na zahřívání, při případném využívání této úpravy v praxi, není výhodné vzorky zahřívát příliš dlouho. Byla proto zvolena doba zahřívání vzorků pro další zkoumání tři hodiny.

3.2.4. Vliv tříd cementů na pevnostní charakteristiky

V dalším zkoumání se řešil vliv různých druhů cementu na pevnosti betonu při příměsi deseti a dvaceti procent dvou druhů plastového odpadu a při zahřívání vzorků na 250 °C tři hodiny.

3. Experimentální část

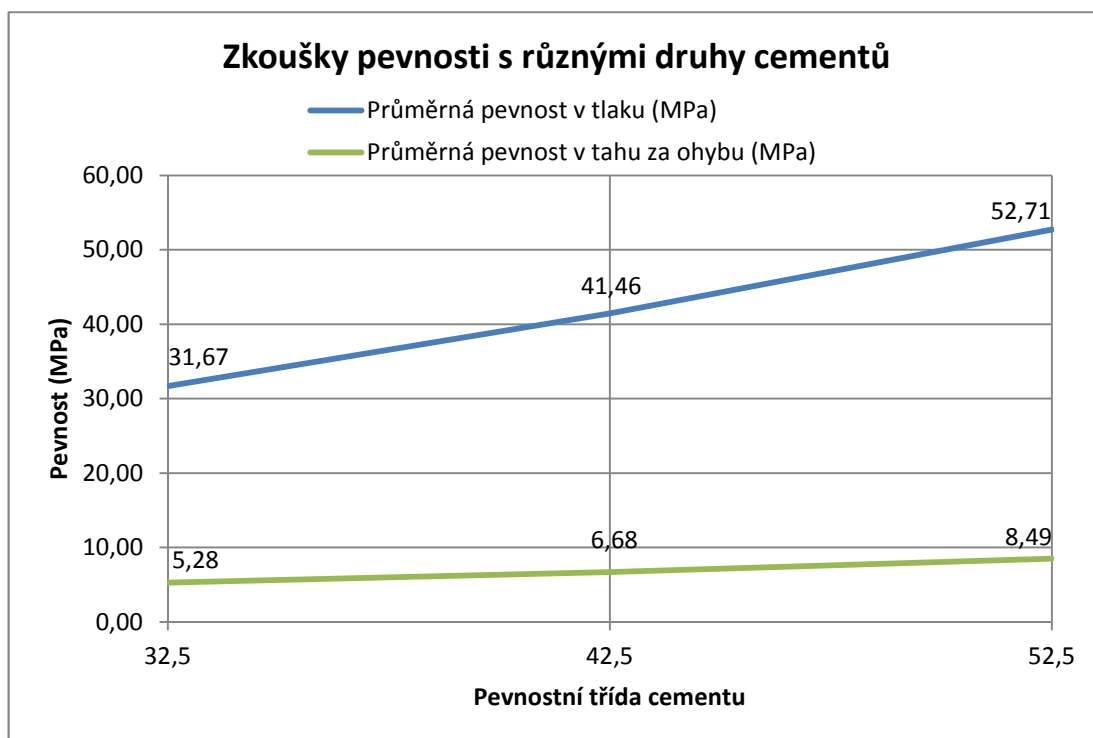
Nejdříve bylo potřeba zajistit referenční vzorky tří druhů cementů pro další porovnávání. Jednalo se o základní vzorky tří cementů o různé pevnostní třídě, které jsou popsány v kapitole 3.1.

K přípravě zkušebních vzorků tedy byl využit pouze cement, kamenivo a voda. Všechny suroviny byly vždy odváženy a zpracovány jako u zkoušky vlivu teploty na pevnost betonu. Vzorky byly po zpracování také ponechány ve formách 24 hodin, následně odformovány, ponechány vyzrát a nakonec vysušeny. Tyto vzorky se ale již nezahřívaly v peci.

Takto připravené vzorky byly zkoušeny na pevnost v tahu za ohybu. Na zbylých polovinách trámečků po zkoušce v tahu byly provedeny zkoušky pevnosti betonu v tlaku. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následné tabulce.

Tabulka 16 - pevnosti různých druhů cementů

Pevnostní třídy cementů	Průměrná pevnost v tahu za ohybu (MPa)	Průměrná pevnost v tlaku (MPa)
32,5	5,28	31,67
42,5	6,68	41,46
52,5	8,49	52,71



Graf 10 – Pevnost betonu s různými pevnostními třídami cementu

Při pohledu na naměřené hodnoty je zřetelný očekávatelný nárůst pevnosti betonu postupně s nárůstem pevnostní třídy cementu. Průměrná pevnost v tlaku vzorků prakticky kopíruje pevnostní třídu daného cementu a průměrná pevnost v tahu vzrůstá konstantně s nárůstem pevnostní třídy cementu.

Tyto naměřené hodnoty byly v dalším zkoumání brány jako základní a všechny další naměřené hodnoty byl s těmito porovnávány.

3.2.4.1. Zkoušky s cementem 32,5

Nejdříve se přistoupilo ke zkouškám s cementem pevnostní třídy 32,5. U vzorků byl objem písku částečně nahrazován dvěma druhy plastového odpadu a výsledné vzorky zahřívány, nebo nezahřívány na 250 °C a následné výsledky zkoušek pevnosti porovnávány.

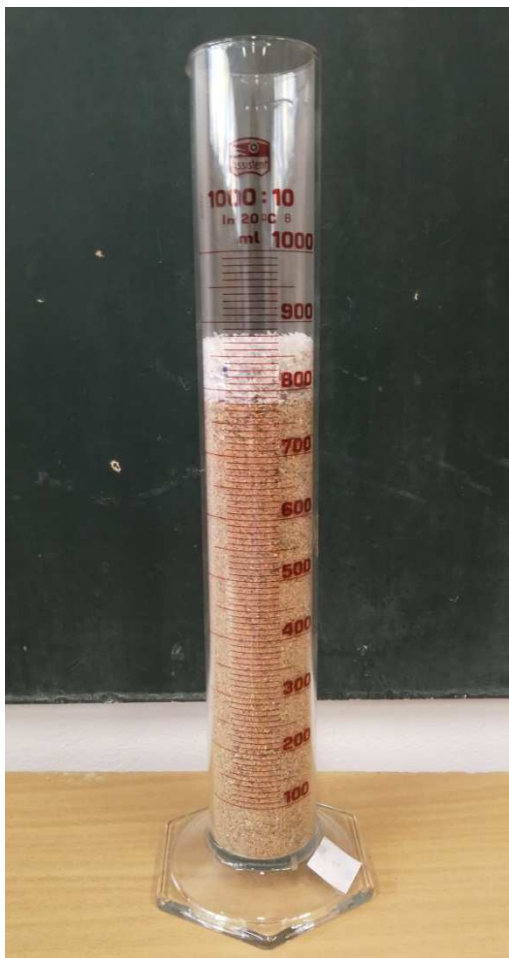
3.2.4.1.1. Polyethylentereftalát

K přípravě zkušebních vzorků byl použit cement pevnostní třídy 32,5, kamenivo, polyethylentereftalát a voda. U těchto vzorků se objem písku potřebný na přípravu jedné trojformy, což je 870 ml, nahradí u dvou sad vzorků z 10 % a u dvou sad vzorků z 20 % polyethylentereftalátem.

Postup přípravy vzorků byl obdobný jako u zkoušky doby zahřívání vzorků obsahující plastovou příměs. Nejdříve bylo na kalibrované váze s přesností na 0,1 g naváženo 450 g cementu. Následně bylo odměřeno buď 783 ml, nebo 696 ml písku pomocí odměrných válců, podle toho zdali se jednalo o deseti nebo dvacetiprocentní vzorky. Poté se odměřil také pomocí odměrných válců potřebný objem PET, který byl buď 87, nebo 174 ml, tak aby konečný objem písku a PET byl v součtu 870 ml. Tyto sypké složky byly důkladně promíchány ručně pomocí zednické lžice. Po promíchání bylo přidáno 200 ml vody a směs byla opět řádně promíchána. Vzniklá směs byla plněna do trojformy na trámečky ošetřené odformovacím olejem. Po naplnění byly vzorky hutněny na stolním vibrátoru.

Vzorky byly ponechány ve formách vždy 24 hodin a následně odformovány. Vyjmuté vzorky byly vloženy do vody a ponechány zrát 16 hodin při teplotě 60 °C v horkovzdušné sušárně. Vzorky vyjmuté z vody byly vysušeny opět na 60 °C v horkovzdušné sušárně. Po vysušení se polovina vzorků zahřívávala v peci na 3 hodiny na 250 °C. Poté byly všechny vzorky zváženy na digitální váze, byla změřena proměnná šířka pomocí posuvného měřítka a ze zjištěných hodnot byla pro každý vzorek určena objemová hmotnost.

3. Experimentální část



Obrázek 19 - 10 % PET



Obrázek 18 - 20 % PET



Obrázek 20 - Vzorek s 10% a 20% obsahem PET po zahřívání 3 h na 20 °C

Tabulka 17 - průměrná objemová hmotnost vzorků

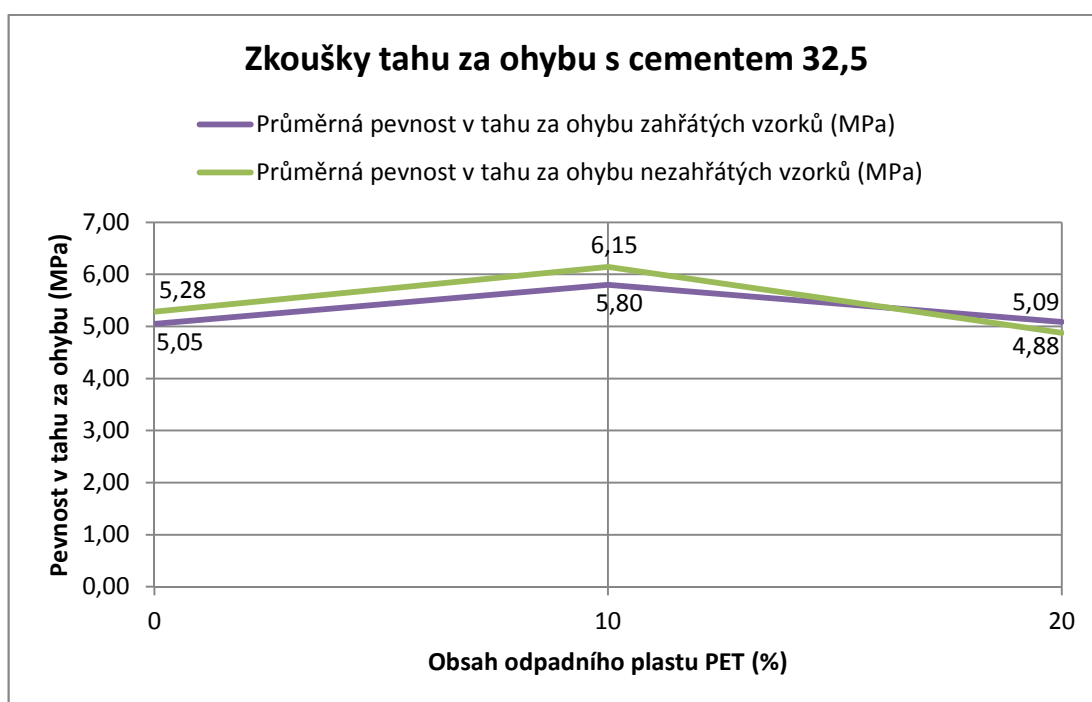
Obsah PET (%)	Průměrná objemová hmotnost nezahříváných vzorků (kg/m ³)	Průměrná objemová hmotnost zahříváných vzorků (kg/m ³)
0	2104	2042
10	2114	1997
20	2073	1963

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Na připravených vzorcích byla provedena zkouška stanovení pevnosti betonu v tahu ohybem. Stejným způsobem jako u předchozích zkoušek. Byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tahu za ohybu příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 18 - Průměrná pevnost v tahu za ohybu

Obsah PET (%)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu nezahříváných vzorků (MPa)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu zahříváných vzorků (MPa)
0	5,28	5,05
10	6,15	5,80
20	4,88	5,09



Graf 11 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 32,5 a PET

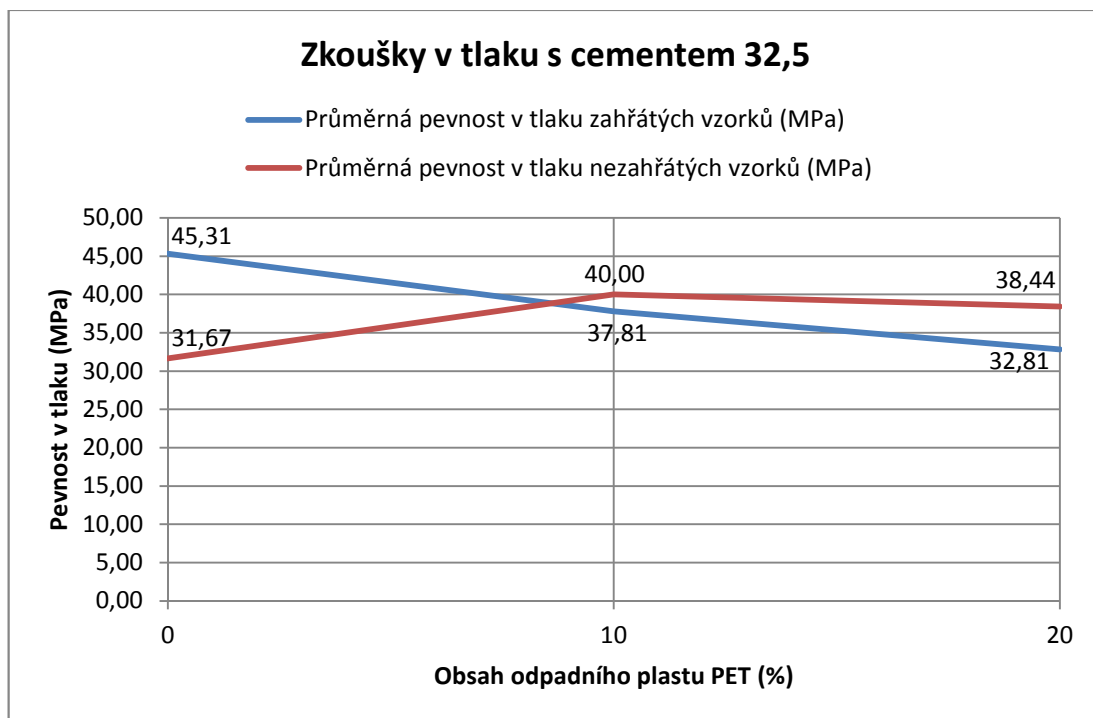
Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je patrný vzestup pevnosti v tahu za ohybu při náhradě 10 % objemu písku jak zahřátých tak nezahříváných vzorků. Dalším přidáním PET na 20 % se pevnost snížila a to na ještě nižší hodnotu, než bez přídavku PET. Pevnosti zahříváných vzorků za ohybu byly bez přídavku PET a s 10 % přídavkem nižší než nezahříváných. Zahříváné vzorky kde bylo 20 % objemu písku nahrazeno PET, vykazovali naopak vyšší pevnost než nezahříváné.

Stanovení pevnosti v tlaku

Na zbylých polovinách trámečků ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byla provedena zkouška pevnosti v tlaku stejným způsobem jako u předchozích zkoušek. Byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tlaku příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 19 - Průměrná pevnost betonu v tlaku

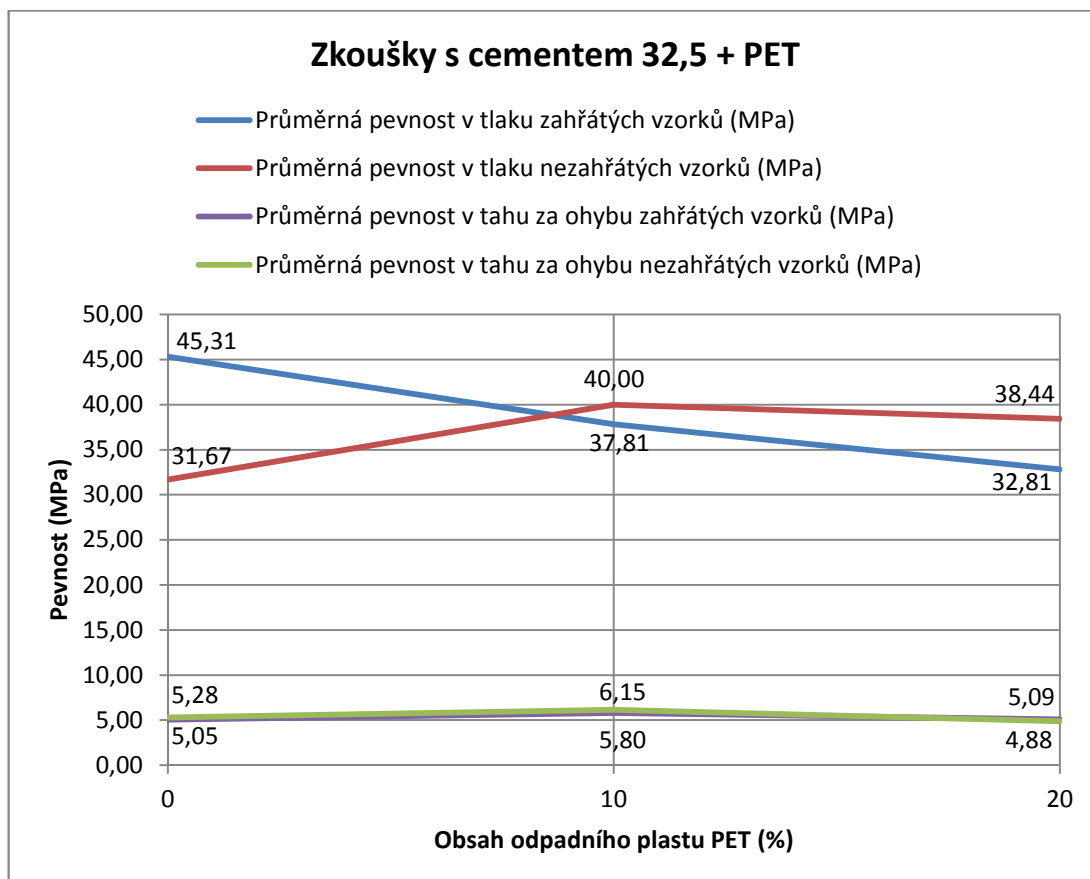
Obsah PET (%)	Průměrná pevnost v tlaku nezahříváných vzorků (MPa)	Průměrná pevnost v tlaku zahříváných vzorků (MPa)
0	31,67	45,31
10	40,00	37,81
20	38,44	32,81



Graf 12 – Pevnost v tlaku vzorků s cementem 32,5 a PET

Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je vidět jak pevnost betonu zahříváných vzorků klesá postupným navyšováním obsahu PET ve vzorcích. Avšak i nejnižší hodnota u vzorků kdy byl obsah písku z 20 % nahrazen PET, je vyšší než u vzorků bez plastové příměsi a bez zahřívání. Pevnost v tlaku nezahříváných vzorků naopak po přidání PET vzrostla.

Vyhodnocení vzorků s cementem 32,5 a PET



Graf 13 – Souhrnný graf pevnostní vzorků s cementem 32,5 a PET

Při pohledu na výsledky pevností jak v tahu, tak v tlaku 18 zkušebních vzorků na vyhodnocení vlastností betonu z cementu 32,5 a příměsí z polyethylentereftalátu lze konstatovat, že směs která vykazuje nejlepší vlastnosti je ta, která měla 10 % objemu písku nahrazen PET a nebyla zahřívána. Tato směs má totiž nejvyšší pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku je druhá nejvyšší.

Při dalším zkoumání souhrnného grafu s výsledky zkoušek je vidět, že průběh pevností v tahu za ohybu zahřátých a nezahřátých vzorků je skoro stejný. Pevnosti jak zahříváných tak nezahříváných vzorků s obsahem 20 % PET jsou všechny nižší než vzorků s obsahem 10 % PET.

Zkouška nasákavosti

Nejlepší směs, což je směs s 10 % obsahem PET bez zahřívání, byla vyzkoušená na 24 hodinovou nasákavost. Nasákavost betonu vyjadřuje schopnost nasycení pórů vodou. Hmotnostní nasákavost se udává v procentech a vypočítá se jako poměr hmotnosti nasáklé kapaliny a hmotnosti vysušeného vzorku. Čím je větší nasákavost betonu, tím bývá nižší mrazuvzdornost.

Zkouška byla provedena na trámečku o stejných rozměrech jako na předchozích zkouškách pevnosti. Vzorek byl stejně jako u předchozích zkoušek připraven zamícháním surovin ručně, naplněn do formy a hutněn pomocí vibrátoru. Vzorek byl jako u předchozích zkoušek odformován po 24 hodinách a vložen do vody a ponechán zrát 16 hodin při teplotě 60 °C v horkovzdušné sušárně. Vzorek vyjmutý z vody byl vysušen na 60 °C v horkovzdušné sušárně. Po tomto sušení, byl vzorek opět vložen do sušárny ovšem teď na 110 °C a byl sušen do ustálené hmotnosti. Po vysušení byl vzorek zvážen a následně vložen na 24 hodin do vody. Po 24 hodinách byl vzorek vyjmut z vody, povrchově osušen a zvážen na digitální váze. Z těchto naměřených hodnot, byla určena nasákavost vzorku z následující rovnice kde n_h je hmotnostní nasákavost, m_k je hmotnost nasáklé kapaliny, m_n je hmotnost nasáklého vzorku a m_s je hmotnost vysušeného vzorku.

$$n_h = \frac{m_k}{m_s} \times 100 = \frac{m_n - m_s}{m_s} \times 100$$

Tabulka 20 - Nasákavost vzorku s 10% objemem PET

Hmotnost vysušeného vzorku (g)	Hmotnost nasáklého vzorku (g)	Nasákavost (%)
546,7	577,3	5,6

3.2.4.1.2. Polyethylen

K přípravě těchto vzorků byl použit cement pevnostní třídy 32,5, kamenivo, polyethylen a voda. U těchto vzorků se objem písku potřebný na přípravu jedné trojformy, což je 870 ml, nahradí u dvou sad vzorků z 10 % a u dvou sad vzorků z 20 % polyethylenem.

Postup přípravy vzorků byl stejný jako v kapitole 3.2.4.1.1, pouze se změnou, že byl polyethylentereftalát nahrazen polyethylenem. Nejdříve bylo na kalibrované váze s přesností na 0,1 g naváženo 450 g cementu. Následně bylo odměřeno buď 783 ml, nebo 696 ml písku pomocí odměrných válců, podle toho zdali se jednalo o deseti nebo dvaceti procentní vzorky. Poté se odměřil také pomocí odměrných válců potřebný objem PE, který byl buď 87, nebo 174 ml, tak aby konečný objem písku a PE byl v součtu 870 ml. Tyto sypké složky byly důkladně promíchány ručně

pomocí zednické lžíce. Po promíchání bylo přidáno 200 ml vody a směs byla opět řádně promíchána. Vzniklá směs byla plněna do trojformy na trámečky ošetřené odformovacím olejem. Po naplnění byly vzorky hutněny na stolním vibrátoru.

Vzorky byly ponechány ve formách vždy 24 hodin a následně odformovány. Vyjmuté vzorky byly vloženy do vody a ponechány zrát 16 hodin při teplotě 60 °C v horkovzdušné sušárně. Vzorky vyjmuté z vody byly vysušeny opět na 60 °C v horkovzdušné sušárně. Po vysušení se polovina vzorků zahřívala v peci na 3 hodiny na 250 °C. Poté byly všechny vzorky zváženy na digitální váze, byla změřena proměnná šířka pomocí posuvného měřítka a ze zjištěných hodnot byla pro každý vzorek určena objemová hmotnost.

Tabulka 21 - Průměrná objemová hmotnost vzorků

Obsah PE (%)	Průměrná objemová hmotnost nezahřívaných vzorků (kg/m ³)	Průměrná objemová hmotnost zahřívaných vzorků (kg/m ³)
0	2104	2042
10	2105	1979
20	1977	1881

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

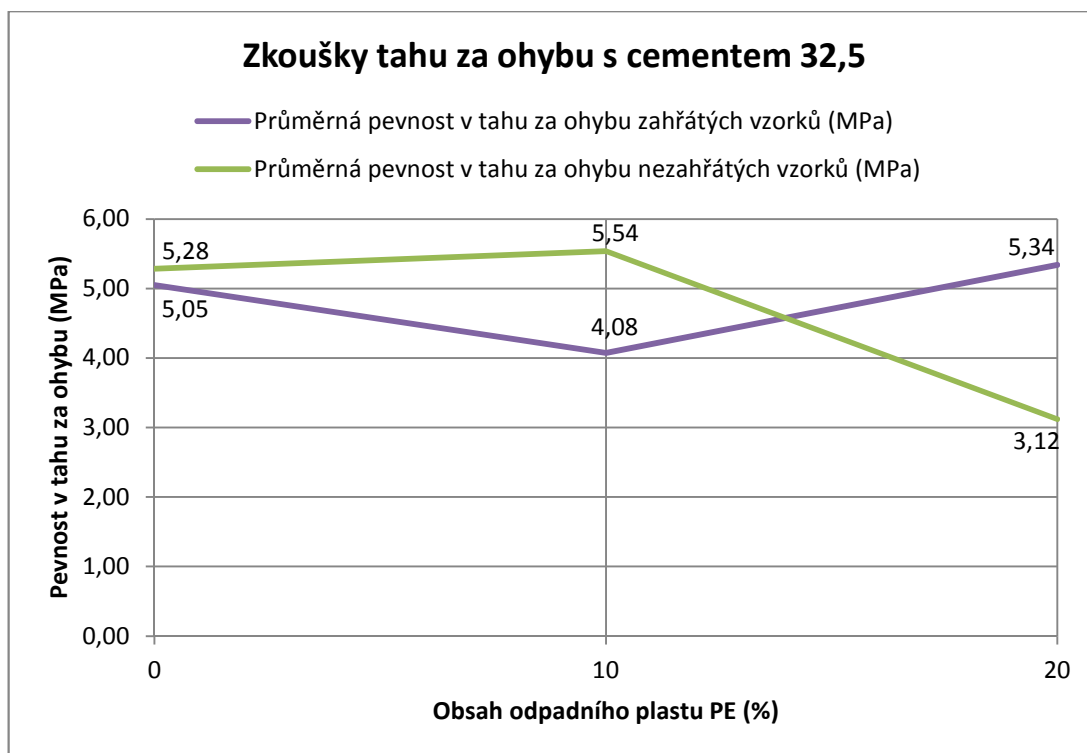
Na připravených vzorcích byla provedena zkouška stanovení pevnosti betonu v tahu ohybem. Stejným způsobem jako u předchozích vzorků. Byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tahu za ohybu příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 22 - Průměrná pevnost v tahu za ohybu

Obsah PET (%)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu nezahřívaných vzorků (MPa)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu zahřívaných vzorků (MPa)
0	5,28	5,05
10	5,54	4,08
20	3,12	5,34

Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je patrný vzestup pevnosti v tahu za ohybu při náhradě 10 % objemu písku u nezahřívaných vzorků. Naopak od zahřívaných vzorků kde je patrný pokles pevnosti tahu za ohybu. Při dalším navýšení obsahu PE na 20 % byl průběh opačný než u obsahu 10 %. Pevnost v tahu za ohybu nezahřátých vzorků klesá a zahřátých zase stoupá. Nejvyšší pevnost v tahu za ohybu

měly nezahříváné vzorky s 10 % obsahem PE, ale srovnatelnou pevnost měly také zahříváné vzorky s obsahem PE 20 % a nezahříváné vzorky bez obsahu plastů.



Graf 14 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 32,5 a PE

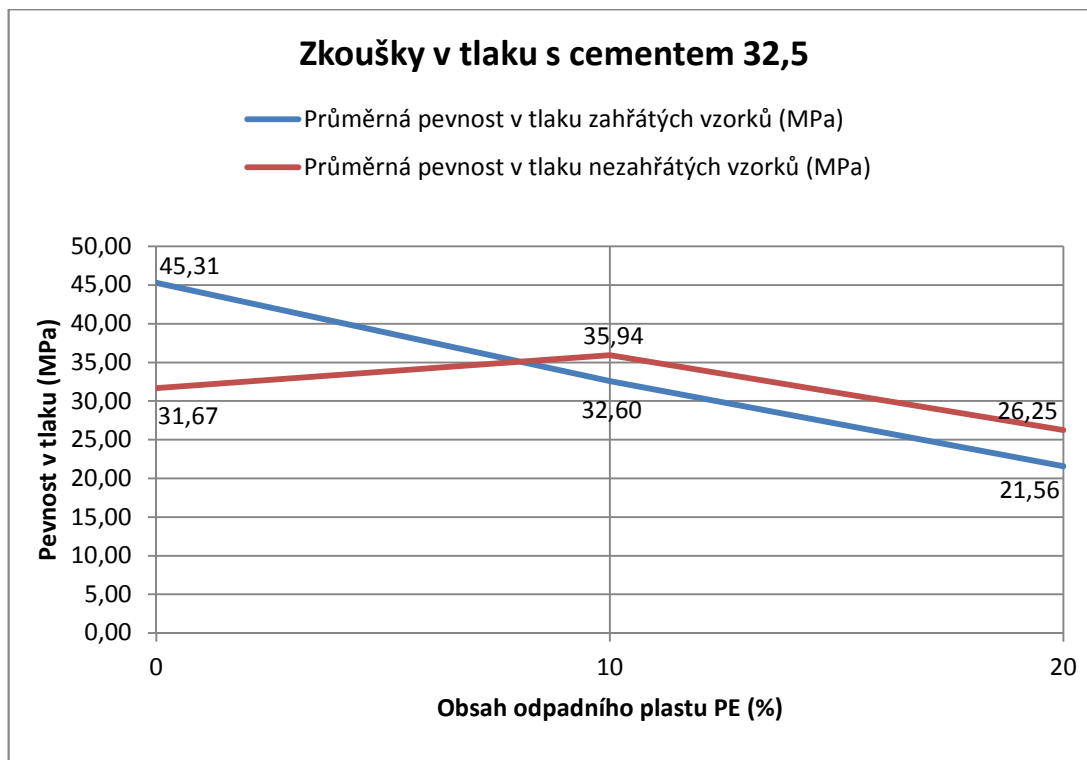
Stanovení pevnosti v tlaku

Na zbylých zlomcích trámečků ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byla provedena zkouška pevnosti v tlaku stejným způsobem jako u předchozích vzorků. Byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tlaku příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 23 - Průměrná pevnost betonu v tlaku

Obsah PET (%)	Průměrná pevnost v tlaku nezahříváných vzorků (MPa)	Průměrná pevnost v tlaku zahříváných vzorků (MPa)
0	31,67	45,31
10	35,94	32,60
20	26,25	21,56

Naměřené hodnoty byly vykresleny do grafu, kde je vidět jak pevnost betonu zahříváných vzorků klesá postupným navyšováním obsahu PE ve vzorcích. Avšak pevnost v tlaku zahříváných vzorků s 10 % obsahem PE je srovnatelná s pevností betonu nezahříváných vzorků bez plastové příměsi. Pevnost v tlaku nezahříváných vzorků naopak po přidání 10 % PE vrostla, avšak při navýšení na 20 % opět poklesla.

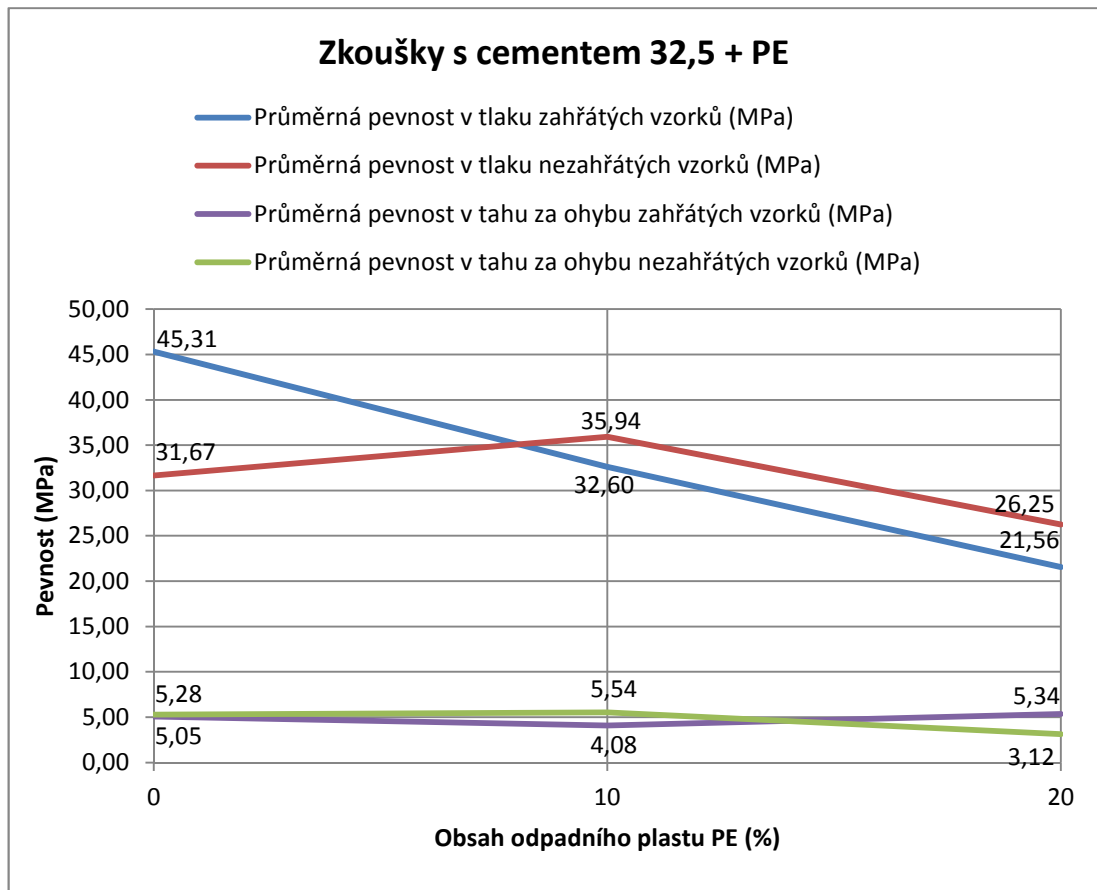


Graf 15 – Pevnost v tlaku vzorků s cementem 32,5 a PE

Vyhodnocení vzorků s cementem 32,5 a PE

Při pohledu na výsledky pevností jak v tahu, tak v tlaku 18 zkušebních vzorků na vyhodnocení vlastností betonu z cementu 32,5 a příměsí z polyethylenu lze konstatovat, že směs u které vzrostla jak pevnost v tlaku tak pevnost v tahu za ohybu, v porovnání s referenčním vzorkem, který byl bez plastové příměsi a nebyl zahříván je ta, která měla 10 % objemu písku nahrazen PE a nebyla zahřívána.

Při dalším zkoumání souhrnného grafu s výsledky zkoušek je vidět, že pevnosti jak zahříváných tak nezahříváných vzorků s obsahem 20 % PE jsou většinou nižší než vzorků s obsahem 10 % PE až na pevnost v tahu za ohybu zahříváných vzorků.



Graf 16 – Souhrnný graf pevnostní vzorků s cementem 32,5 a PE

Zkouška nasákavosti

Nejlépe vycházející směsi, byly směsi s 10 % obsahem plastového odpadu bez zahřívání, tyto směsi byly vyzkoušeny na 24 hodinovou nasákavost. V tomto případě se jedná o vzorek s obsahem 10 % PE. Hmotnostní nasákavost se udává v procentech a vypočítá se jako poměr hmotnosti nasáklé kapaliny a hmotnosti vysušeného vzorku.

Zkouška byla provedena na trámečku o stejných rozměrech jako na předchozích zkouškách pevnosti. Vzorek byl připraven stejně jako u vzorku s obsahem 10 % PET, což je popsáno v kapitole 3.2.4.1.1. Vzorek byl vysušen při 110 °C do ustálení hmotnosti a zvážen. Následně byl vzorek vložen na 24 hodin do vody. Po 24 hodinách byl vzorek vyjmut z vody, povrchově osušen a zvážen na digitální váze. Z těchto naměřených hodnot, byla určena nasákavost vzorku z následující rovnice kde n_h je hmotnostní nasákavost, m_k je hmotnost nasáklé kapaliny, m_n je hmotnost nasáklého vzorku a m_s je hmotnost vysušeného vzorku.

$$n_h = \frac{m_k}{m_s} \times 100 = \frac{m_n - m_s}{m_s} \times 100$$

Tabulka 24 - Nasákavost vzorku s 10 % objemem PE

Hmotnost vysušeného vzorku (g)	Hmotnost nasáklého vzorku (g)	Nasákavost (%)
533,5	561,6	5,3

3.2.4.2. Zkoušky s cementem 42,5

Následně se přistoupilo ke zkouškám s cementem pevnostní třídy 42,5. U těchto vzorků byl obdobně jako u vzorků s cementem pevnostní třídy 32,5 objem písku částečně nahrazován dvěma druhy plastového odpadu a výsledné vzorky zahřívány, nebo nezahřívány na 250 °C a následné výsledky zkoušek pevnosti porovnávány.

3.2.4.2.1. Polyethylentereftalát

K přípravě zkušebních vzorků byl použit cement pevnostní třídy 42,5, kamenivo, polyethylentereftalát a voda. U těchto vzorků se objem písku potřebný na přípravu jedné trojformy, což je 870 ml, nahradí u dvou sad vzorků z 10 % a u dvou sad vzorků z 20 % polyethylentereftalátem.

Postup přípravy vzorků byl stejný jako v kapitole 3.2.4.1.1. pouze se změnou pevnostní třídy cementu. U připravených vzorků byla změřena proměnná šířka pomocí posuvného měřítka a ze zjištěných hodnot byla pro každý vzorek určena objemová hmotnost.

Tabulka 25 - průměrná objemová hmotnost vzorků

Obsah PET (%)	Průměrná objemová hmotnost nezahříváných vzorků (kg/m ³)	Průměrná objemová hmotnost zahříváných vzorků (kg/m ³)
0	2166	2042
10	2124	1965
20	2072	1956

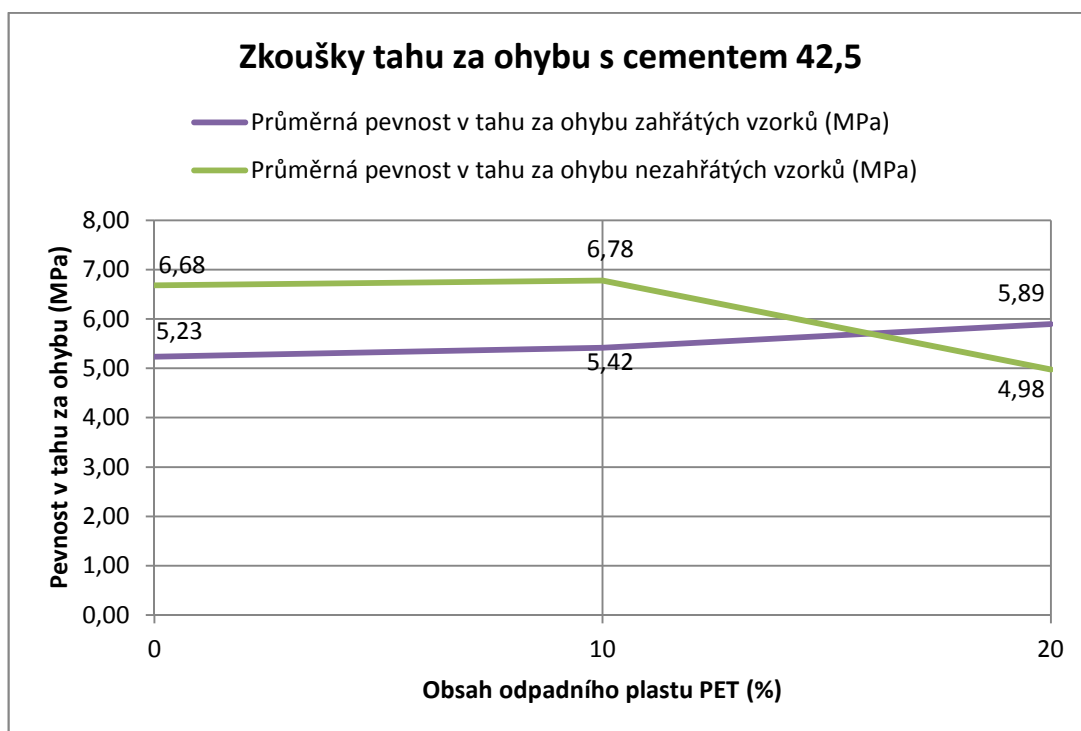
Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Na připravených vzorcích byla provedena zkouška stanovení pevnosti betonu v tahu ohybem. Stejným způsobem jako u předchozích zkoušek. Byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tahu za ohybu příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 26 - Průměrná pevnost v tahu za ohybu

Obsah PET (%)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu nezahříváných vzorků (MPa)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu zahříváných vzorků (MPa)
0	6,68	5,23
10	6,78	5,42
20	4,98	5,89

Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je patrný vzestup pevnosti v tahu za ohybu při náhradě 10 % objemu písku jak zahřátých tak nezahříváných vzorků. Dalším přidáním PET na 20 % se ale pevnost nezahříváných vzorků opět sníží. Zahříváné vzorky kde bylo 20 % objemu písku nahrazeno PET, vykazovaly jediné vyšší pevnost než nezahříváné, jinak vyšší pevnost v tahu za ohybu vykazují nezahříváné vzorky.



Graf 17 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 42,5 a PET

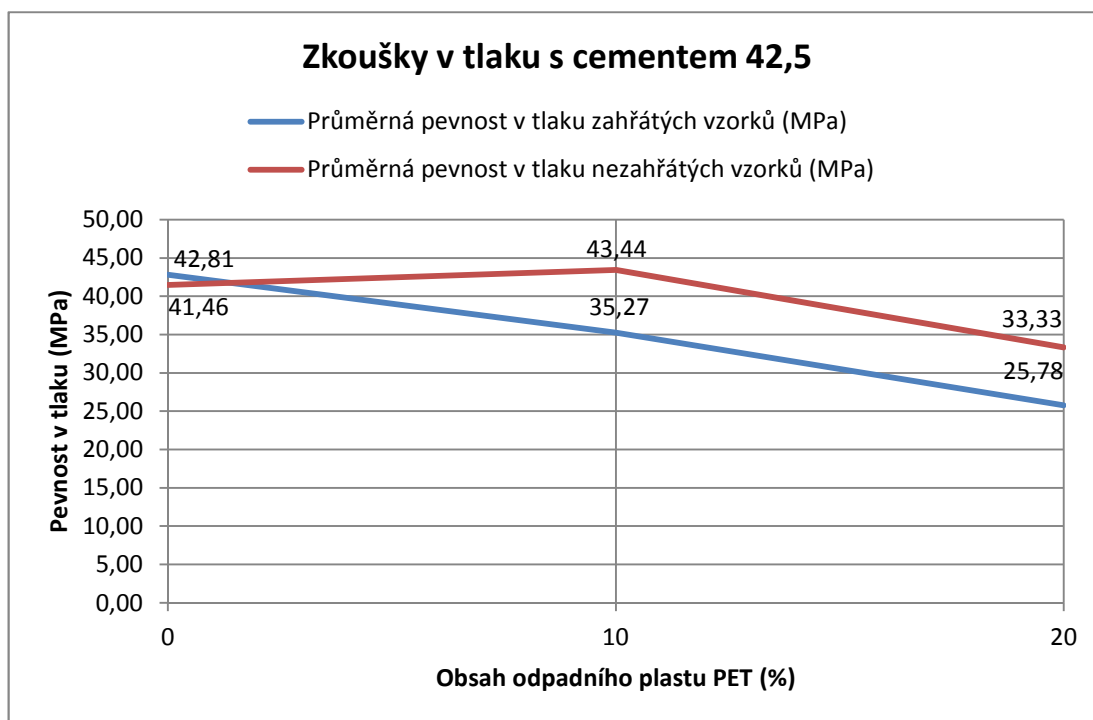
Stanovení pevnosti v tlaku

Na zbylých polovinách trámečků ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byla provedena zkouška pevnosti v tlaku stejným způsobem jako u předchozích zkoušek. Byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tlaku příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 27 - Průměrná pevnost betonu v tlaku

Obsah PET (%)	Průměrná pevnost v tlaku nezahříváných vzorků (MPa)	Průměrná pevnost v tlaku zahříváných vzorků (MPa)
0	41,46	42,81
10	43,44	35,27
20	33,33	25,78

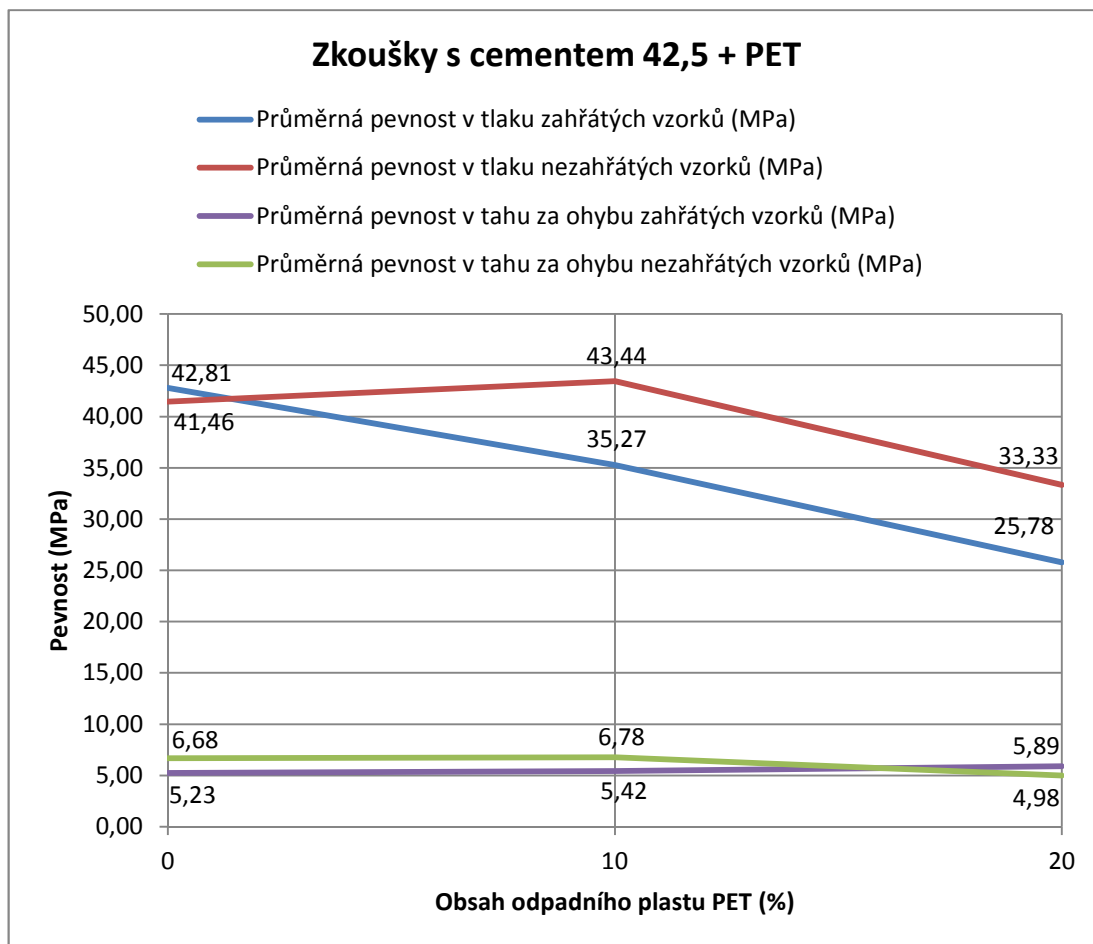
Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je vidět jak pevnost betonu zahříváných vzorků klesá postupným navyšováním obsahu PET ve vzorcích. Pevnost v tlaku nezahříváných vzorků po nahrazení 10 % písku PET zůstala obdobná, avšak po dalším přidání na 20 % pevnost klesla.



Graf 18 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 42,5 a PET

Vyhodnocení vzorků s cementem 42,5 a PET

Při pohledu na výsledky pevností jak v tahu, tak v tlaku 18 zkušebních vzorků na vyhodnocení vlastností betonu z cementu 42,5 a příměsí z polyethyltereftalátu lze konstatovat, že směs která vykazuje nejlepší vlastnosti je ta, která měla 10 % objemu písku nahrazen PET a nebyla zahřívána. Tato směs má nejvyšší pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku je také nejvyšší.



Graf 19 – Souhrnný graf pevnostní vzorků s cementem 42,5 a PET

Při dalším zkoumání souhrnného grafu s výsledků zkoušek je vidět, že všechny pevnosti jak zahříváných tak nezahříváných vzorků s obsahem 20 % PET jsou nižší než pevnosti vzorků s obsahem 10 % PET, až na pevnost v tahu za ohybu u zahříváných vzorků. Dále až na pevnost v tahu za ohybu při obsahu 20 % PET a u pevnosti v tlaku vzorků bez obsahu PET jsou všechny pevnosti zahříváných vzorků nižší než nezahříváných.

Zkouška nasákavosti

Celkově nejlépe vycházející směsi, byly směsi s 10 % obsahem plastového odpadu bez zahřívání. Tyto směsi byly vyzkoušeny na 24 hodinovou nasákavost. V tomto případě se jedná o vzorek s obsahem 10 % PET. Hmotnostní nasákavost se udává v procentech a vypočítá se jako poměr hmotnosti nasáklé kapaliny a hmotnosti vysušeného vzorku.

Zkouška byla provedena na trámečku o stejných rozměrech jako na předchozích zkouškách pevnosti. Vzorek byl připraven stejně jako v kapitole 3.2.4.1.1. pouze se změnou pevnostní třídy cementu. Vzorek byl vysušen při 110 °C

do ustálení hmotnosti a zvážení. Následně byl vzorek vložen na 24 hodin do vody. Po 24 hodinách byl vzorek vyjmut z vody, povrchově osušen a zvážen na digitální váze. Z těchto naměřených hodnot, byla určena nasákavost vzorku z následující rovnice kde n_h je hmotnostní nasákavost, m_k je hmotnost nasáklé kapaliny, m_n je hmotnost nasáklého vzorku a m_s je hmotnost vysušeného vzorku.

$$n_h = \frac{m_k}{m_s} \times 100 = \frac{m_n - m_s}{m_s} \times 100$$

Tabulka 28 - Nasákavost vzorku s 10 % objemem PET

Hmotnost vysušeného vzorku (g)	Hmotnost nasáklého vzorku (g)	Nasákavost (%)
551,7	574,5	4,1

3.2.4.2.2. Polyethylen

K přípravě těchto vzorků byl použit cement pevnostní třídy 42,5, kamenivo, polyethylen a voda. U těchto vzorků se objem písku potřebný na přípravu jedné trojformy, což je 870 ml, nahradí u dvou sad vzorků z 10 % a u dvou sad vzorků z 20 % polyethylenem.

Postup přípravy vzorků byl stejný jako v kapitole 3.2.4.1.2. pouze se změnou pevnostní třídy cementu. U připravených vzorků byla změřena proměnná šířka pomocí posuvného měřítka a ze zjištěných hodnot byla pro každý vzorek určena objemová hmotnost.

Tabulka 29 - průměrná objemová hmotnost vzorků

Obsah PE (%)	Průměrná objemová hmotnost nezahříváných vzorků (kg/m ³)	Průměrná objemová hmotnost zahříváných vzorků (kg/m ³)
0	2166	2042
10	2108	1999
20	2044	2098

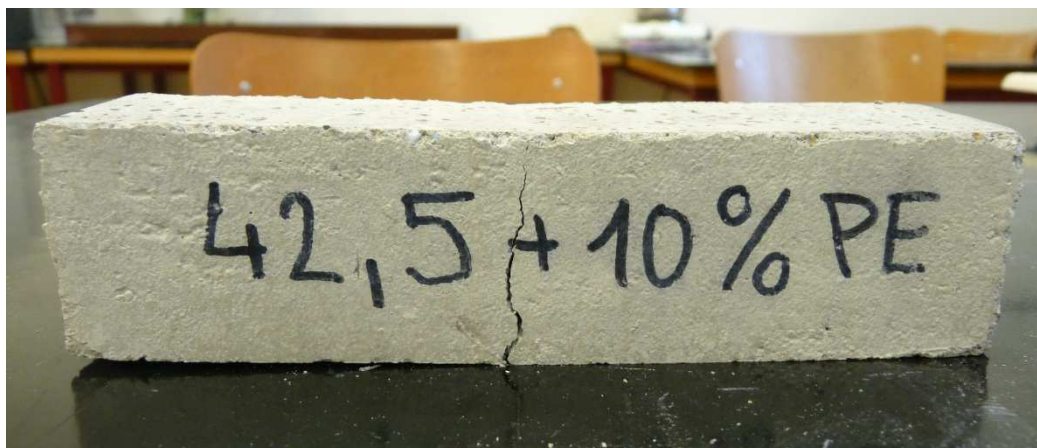
Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Na připravených vzorcích byla provedena zkouška stanovení pevnosti betonu v tahu ohybem. Stejným způsobem jako u předchozích zkoušek. Byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tahu za ohybu příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

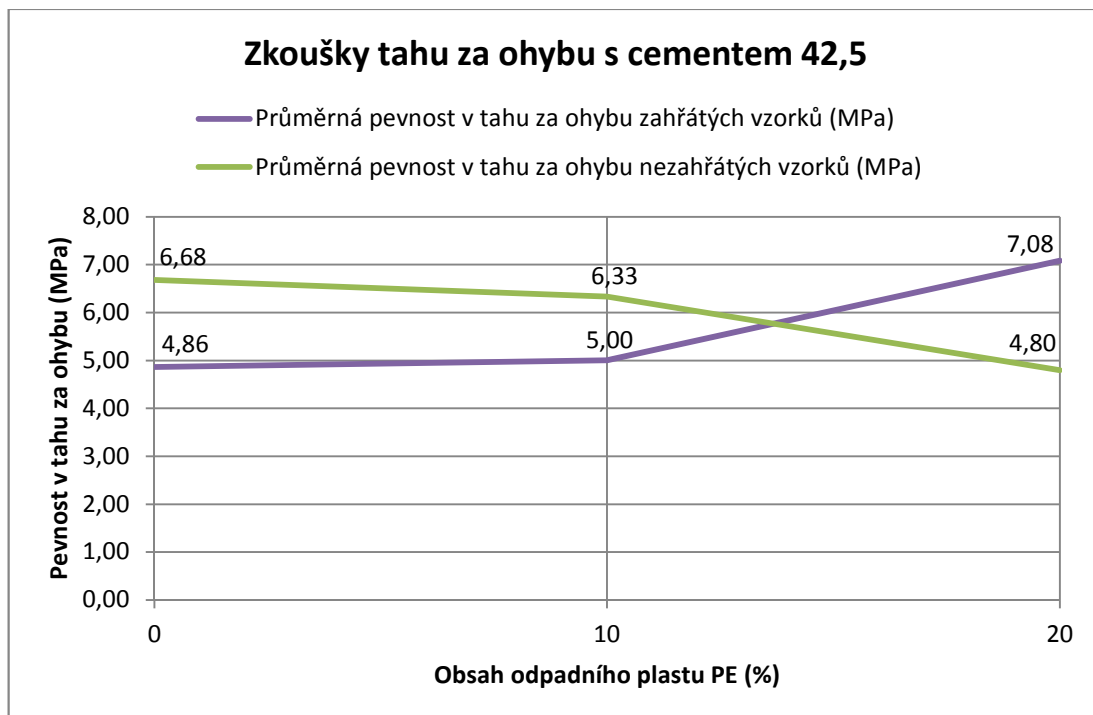
3. Experimentální část

Tabulka 30 - Průměrná pevnost v tahu za ohybu

Obsah PE (%)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu nezahřívaných vzorků (MPa)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu zahřívaných vzorků (MPa)
0	6,68	5,23
10	6,33	5,00
20	4,80	7,08



Obrázek 21 - Fotografie vzorku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu



Graf 20 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 42,5 a PE

Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je patrný pokles pevnosti v tahu za ohybu při postupném navyšování objemu PE u nezahříváných vzorků. U zahříváných vzorků pevnost v tahu za ohybu nejdříve lehce poklesla a následně se zvýšila při navyšování objemu PE. Nejvyšší pevnost měly zahříváné vzorky, které měly objem písku z 20 % nahrazen polyethylem. Jen o něco málo menší pevnosti měli vzorky bez obsahu plastového odpadu, které nebyly zahřívány.



Obrázek 22 - Lom vzorkem s obsahem PE (zvětšený detail)

Stanovení pevnosti v tlaku

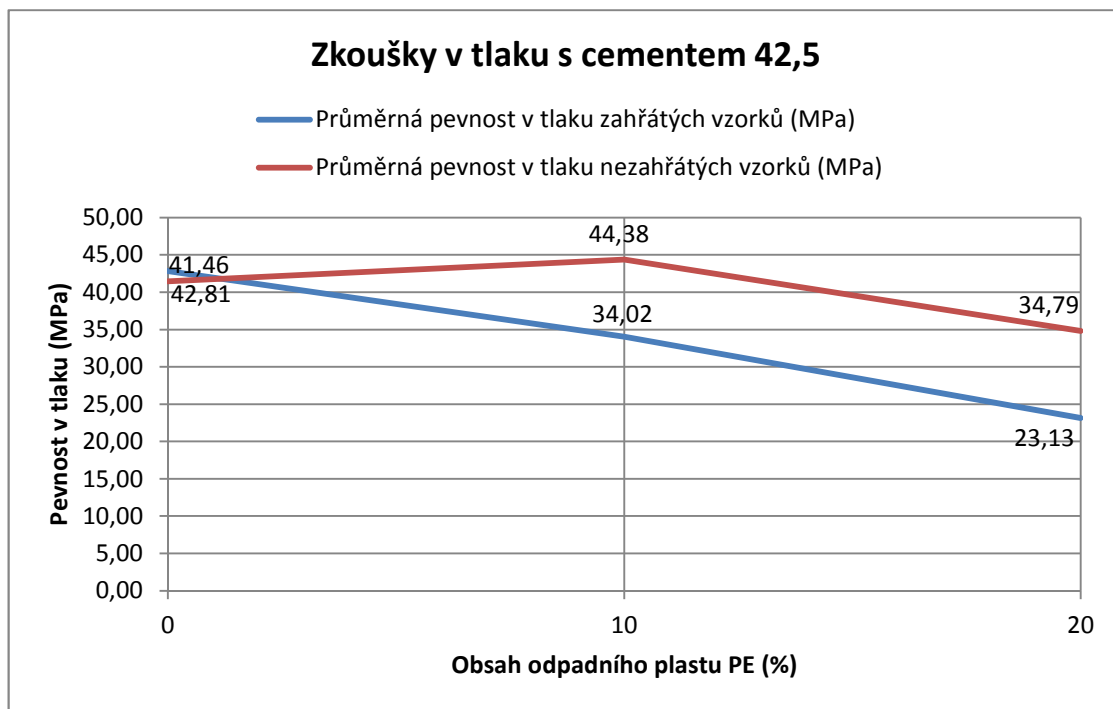
Na zbylých polovinách trámečků ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byla provedena zkouška pevnosti v tlaku stejným způsobem jako u předchozích zkoušek. Byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tlaku příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 31 - Průměrná pevnost betonu v tlaku

Obsah PET (%)	Průměrná pevnost v tlaku nezahříváných vzorků (MPa)	Průměrná pevnost v tlaku zahříváných vzorků (MPa)
0	41,46	42,81
10	44,38	34,02
20	34,79	23,13

3. Experimentální část

Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je vidět jak pevnost betonu zahříváných vzorků klesá postupným navyšováním obsahu PE ve vzorcích. Pevnost v tlaku nezahříváných vzorků po nahrazení 10 % písku PE vzrostla, avšak po dalším přidání na 20 % pevnost klesla.

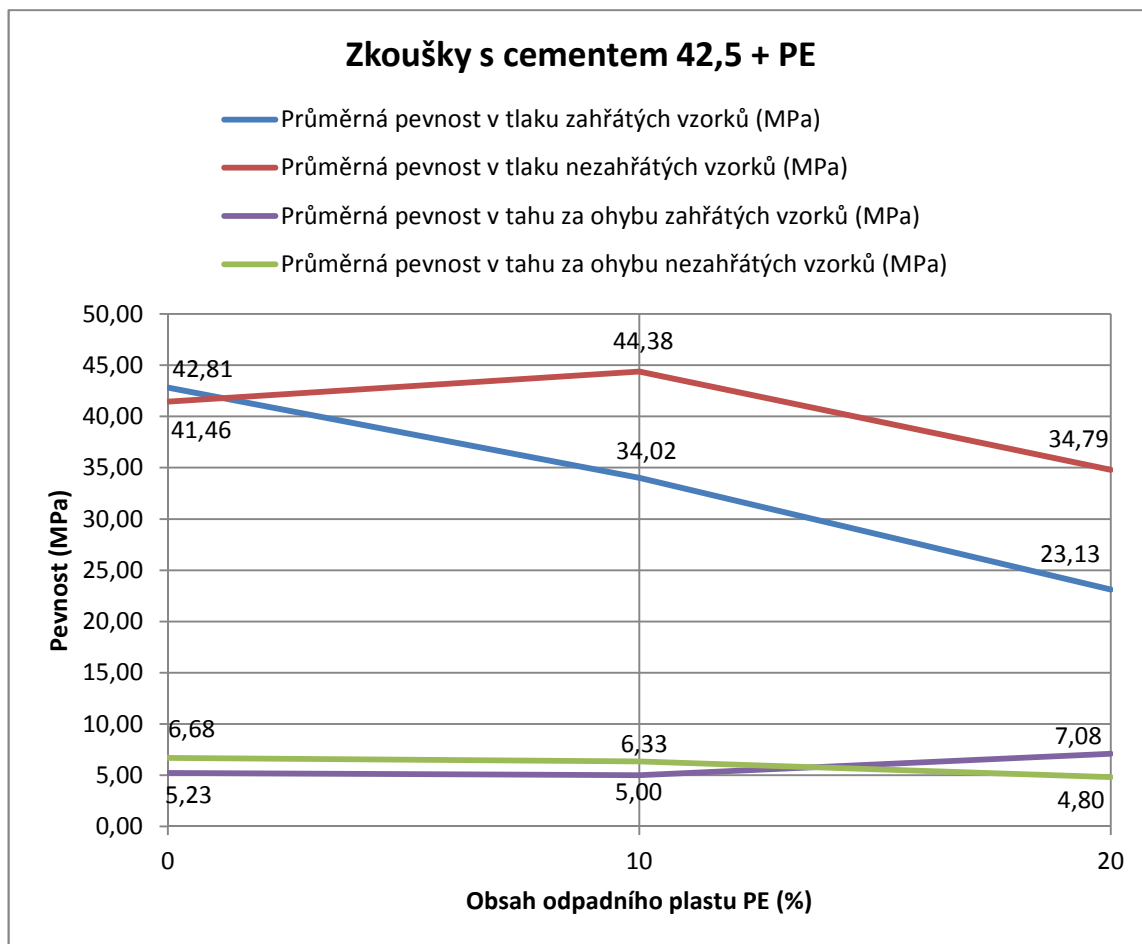


Graf 21 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 42,5 a PE

Vyhodnocení vzorků s cementem 42,5 a PE

Při pohledu na výsledky pevností jak v tahu, tak v tlaku 18 zkušebních vzorků na vyhodnocení vlastností betonu z cementu 42,5 a příměsí z polyethylenu lze říci, že směs která vykazuje celkově nejlepší vlastnosti je ta, která měla 10 % objemu písku nahrazen PET a nebyla zahřívána. Tato směs má nejvyšší pevnost v tlaku a pevnost v tahu je srovnatelná s referenčním vzorkem bez příměsí.

Při dalším zkoumání souhrnného grafu s výsledky zkoušek je vidět, že většina pevností jak zahříváných tak nezahříváných vzorků s obsahem 20 % PET jsou nižší než pevnosti vzorků s obsahem 10 % PE až na pevnost v tahu za ohybu u zahříváných vzorků. Dále až na pevnost v tahu za ohybu při obsahu 20 % PET a u pevnosti v tlaku vzorků bez obsahu PET jsou všechny pevnosti zahříváných vzorků nižší než nezahříváných.



Graf 22 – Souhrnný graf pevnostní vzorků s cementem 42,5 a PE

Zkouška nasákavosti

Celkově nejlépe vycházející směsi, byly směsi s 10 % obsahem plastového odpadu bez zahřívání. Tyto směsi byly vyzkoušeny na 24 hodinovou nasákavost. V tomto případě se jedná o vzorek s obsahem 10 % PE. Hmotnostní nasákavost se udává v procentech a vypočítá se jako poměr hmotnosti nasáklé kapaliny a hmotnosti vysušeného vzorku.

Zkouška byla provedena na trámečku o stejných rozměrech jako na předchozích zkouškách pevnosti. Vzorek byl připraven stejně jako v kapitole 3.2.4.1.1. pouze se změnou pevnostní třídy cementu. Vzorek byl vysušen při 110 °C do ustálení hmotnosti a zvážen. Následně byl vzorek vložen na 24 hodin do vody. Po 24 hodinách byl vzorek vyjmut z vody, povrchově osušen a zvážen na digitální váze. Z těchto naměřených hodnot, byla určena nasákavost vzorku z následující rovnice kde n_h je hmotnostní nasákavost, m_k je hmotnost nasáklé kapaliny, m_n je hmotnost nasáklého vzorku a m_s je hmotnost vysušeného vzorku.

$$n_h = \frac{m_k}{m_s} \times 100 = \frac{m_n - m_s}{m_s} \times 100$$

Tabulka 32 - Nasákavost vzorku s 10 % objemem PE

Hmotnost vysušeného vzorku (g)	Hmotnost nasáklého vzorku (g)	Nasákavost (%)
541,0	561,7	3,8

3.2.4.3. Zkoušky s cementem 52,5

Nakonec se přistoupilo ke zkouškám s cementem pevnostní třídy 52,5. U těchto vzorků byl obdobně jako u vzorků s cementem pevnostní třídy 32,5 objem písku částečně nahrazován dvěma druhy plastového odpadu a výsledné vzorky zahřívány, nebo nezahřívány na 250 °C a následné výsledky zkoušek pevnosti porovnávány.

3.2.4.3.1. Polyethylentereftalát

K přípravě zkušebních vzorků byl použit cement pevnostní třídy 52,5, kamenivo, polyethylentereftalát a voda. U těchto vzorků se objem písku potřebný na přípravu jedné trojformy, což je 870 ml, nahradí u dvou sad vzorků z 10 % a u dvou sad vzorků z 20 % polyethylentereftalátem.

Postup přípravy vzorků byl stejný jako v kapitole 3.2.4.1.1. pouze se změnou pevnostní třídy cementu. U připravených vzorků byla změřena proměnná šířka pomocí posuvného měřítka a ze zjištěných hodnot byla pro každý vzorek určena objemová hmotnost.

Tabulka 33 - průměrná objemová hmotnost vzorků

Obsah PET (%)	Průměrná objemová hmotnost nezahříváných vzorků (kg/m ³)	Průměrná objemová hmotnost zahříváných vzorků (kg/m ³)
0	2128	2105
10	2029	2084
20	2102	2000

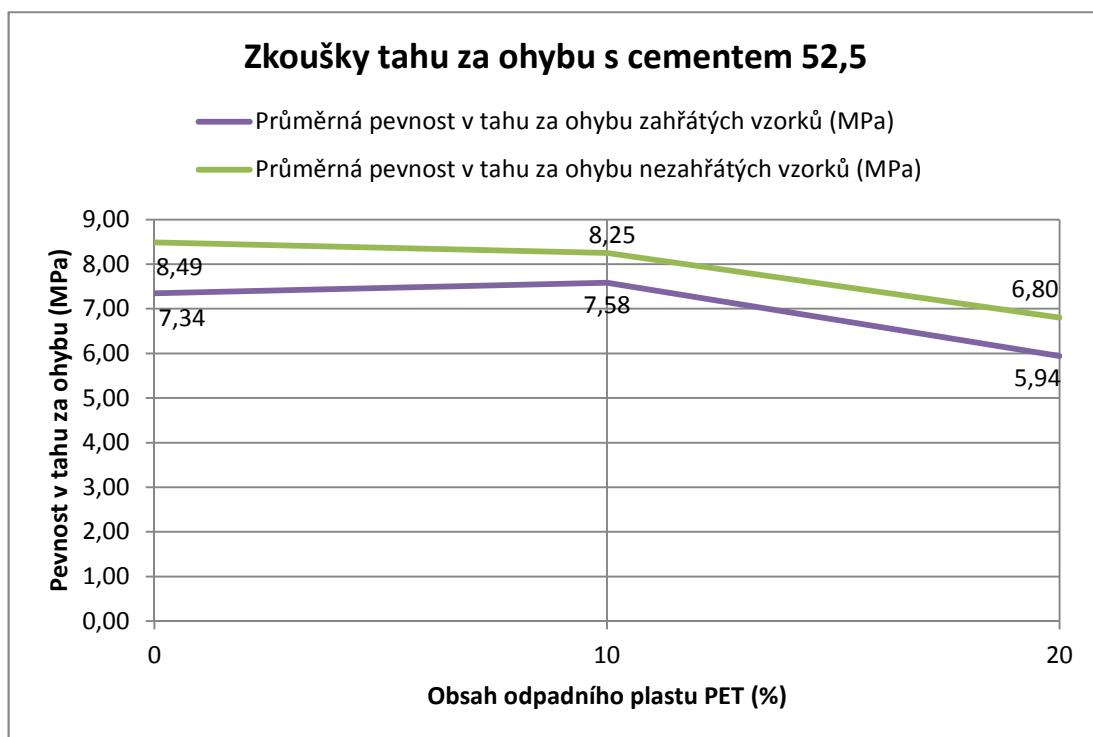
Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Na připravených vzorcích byla provedena zkouška stanovení pevnosti betonu v tahu ohybem. Stejným způsobem jako u předchozích zkoušek. Byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tahu za ohybu příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 34 - Průměrná pevnost v tahu za ohybu

Obsah PET (%)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu nezahříváných vzorků (MPa)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu zahříváných vzorků (MPa)
0	8,49	7,34
10	8,25	7,58
20	6,80	5,94

Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je patrný vzestup pevnosti v tahu za ohybu při náhradě 10 % objemu písku zahřátých vzorků. Dalším přidáním PET na 20 % se ale pevnost opět sníží. Pevnost v tahu za ohybu u nezahříváných vzorků klesá se zvyšováním objemu PET ve vzorku.



Graf 23 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 52,5 a PET

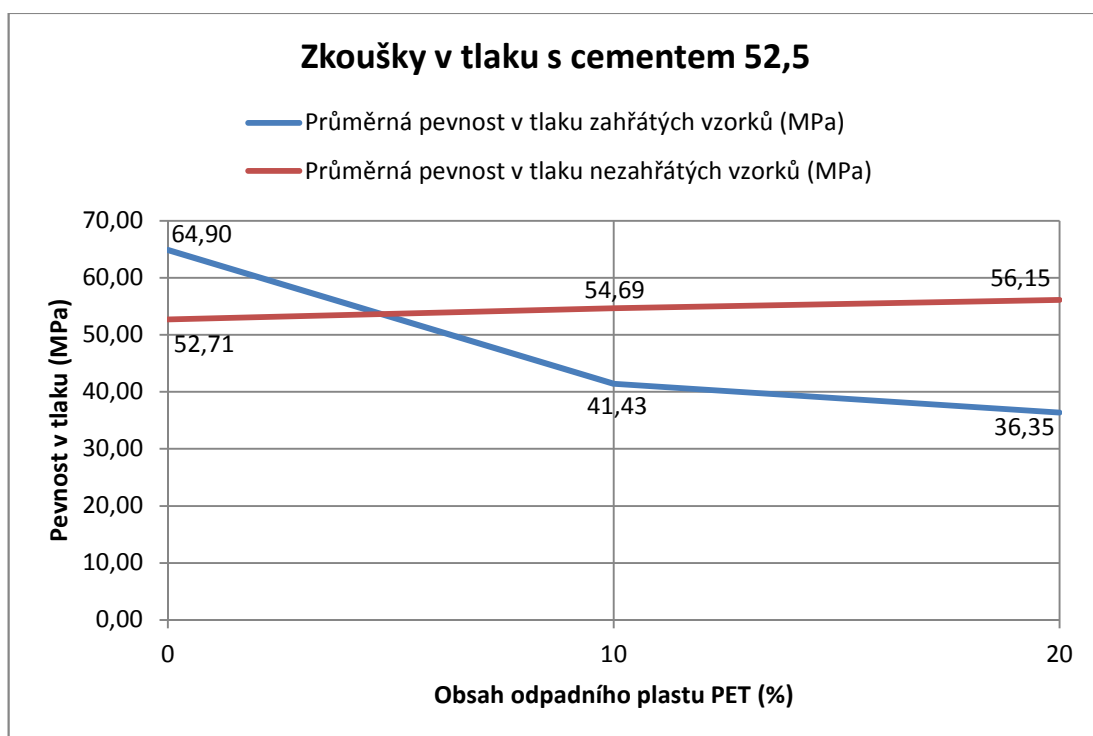
Stanovení pevnosti v tlaku

Na zbylých zlomcích trámečků ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byla provedena zkouška pevnosti v tlaku stejným způsobem jako u předchozích zkoušek. Byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tlaku příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 35 - Průměrná pevnost betonu v tlaku

Obsah PET (%)	Průměrná pevnost v tlaku nezahříváných vzorků (MPa)	Průměrná pevnost v tlaku zahříváných vzorků (MPa)
0	52,71	64,90
10	54,69	41,43
20	56,35	36,35

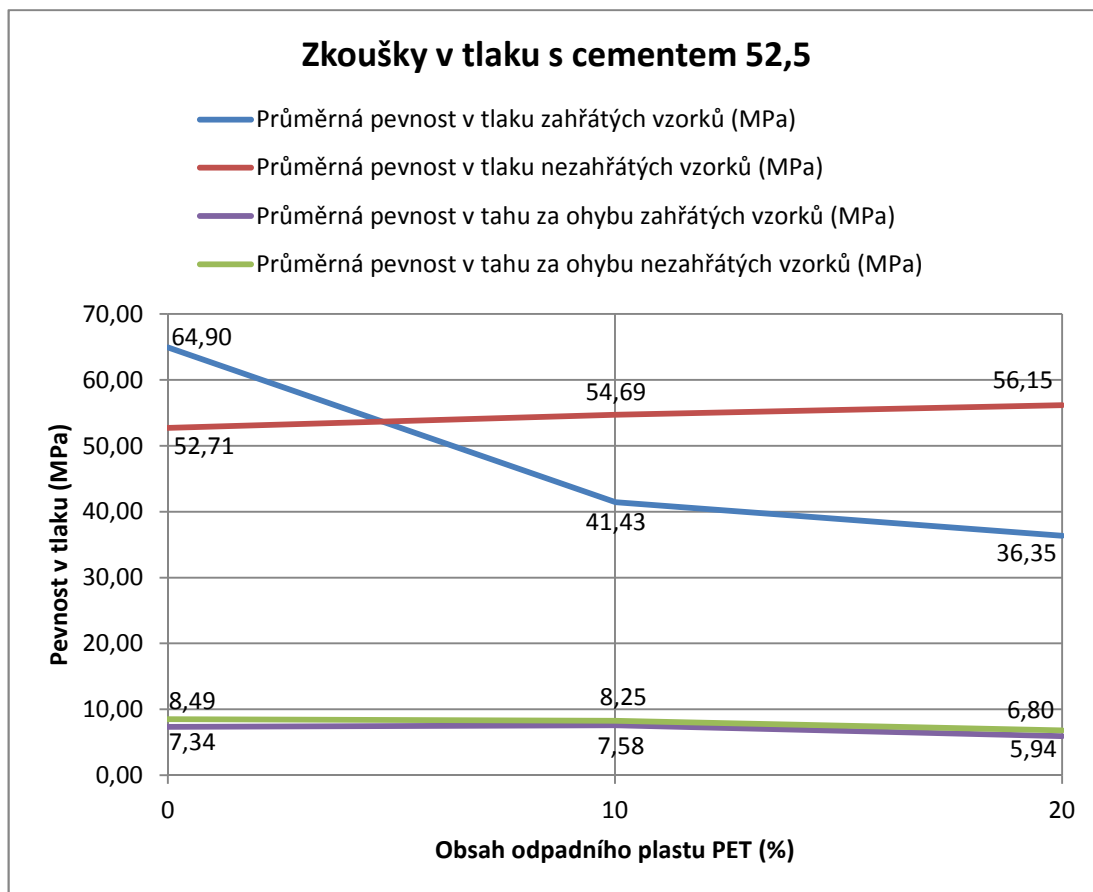
Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je vidět jak pevnost betonu zahříváných vzorků klesá postupným navyšováním obsahu PET ve vzorcích. Pevnost v tlaku nezahříváných vzorků naopak postupně vzrůstala s postupným navyšováním obsahu PET ve vzorcích.



Graf 24 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 52,5 a PET

Vyhodnocení vzorků s cementem 52,5 a PET

Při pohledu na výsledky pevností jak v tahu, tak v tlaku 18 zkušebních vzorků na vyhodnocení vlastností betonu z cementu 52,5 a příměsí z polyethyltereftalátu lze konstatovat, že směs která vykazuje nejlepší vlastnosti je ta, která měla 10 % objemu písku nahrazen PET a nebyla zahřívána. Tato směs má totiž nejvyšší pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku je třetí nejvyšší.



Graf 25 – Souhrnný graf pevnostní vzorků s cementem 52,5 a PET

Při dalším zkoumání souhrnného grafu s výsledky zkoušek je vidět, že průběh pevností v tahu za ohybu zahřátých a nezahřátých vzorků je obdobný. Pevnosti jak zahříváných tak nezahříváných vzorků s obsahem 20 % PET jsou všechny nižší než vzorků s obsahem 10 % PET až na pevnost v tlaku nezahříváných vzorků s obsahem 20 % PET.

Zkouška nasákavosti

Celkově nejlépe vycházející směsi, byly směsi s 10 % obsahem plastového odpadu bez zahřívání. Tyto směsi byly vyzkoušeny na 24 hodinovou nasákavost. V tomto případě se jedná o vzorek s obsahem 10 % PET. Hmotnostní nasákavost se udává v procentech a vypočítá se jako poměr hmotnosti nasáklé kapaliny a hmotnosti vysušeného vzorku.

Zkouška byla provedena na trámečku o stejných rozměrech jako na předchozích zkouškách pevnosti. Vzorek byl připraven stejně jako v kapitole 3.2.4.1.1. pouze se změnou pevnostní třídy cementu. Vzorek byl vysušen při 110 °C do ustálení hmotnosti a zvážen. Následně byl vzorek vložen na 24 hodin do vody. Po 24 hodinách byl vzorek vyjmut z vody, povrchově osušen a zvážen na digitální váze. Z těchto naměřených hodnot, byla určena nasákavost vzorku z následující rovnice

kde n_h je hmotnostní nasákavost, m_k je hmotnost nasáklé kapaliny, m_n je hmotnost nasáklého vzorku a m_s je hmotnost vysušeného vzorku.

$$n_h = \frac{m_k}{m_s} \times 100 = \frac{m_n - m_s}{m_s} \times 100$$

Tabulka 36 - Nasákavost vzorku s 10 % objemem PET

Hmotnost vysušeného vzorku (g)	Hmotnost nasáklého vzorku (g)	Nasákavost (%)
566,3	585,3	3,4

3.2.4.3.2. Polyethylen

K přípravě těchto vzorků byl použit cement pevnostní třídy 52,5, kamenivo, polyethylen a voda. U těchto vzorků se objem písku potřebný na přípravu jedné trojformy, což je 870 ml, nahradí u dvou sad vzorků z 10 % a u dvou sad vzorků z 20 % polyethylenem.

Postup přípravy vzorků byl stejný jako v kapitole 3.2.4.1.2. pouze se změnou pevnostní třídy cementu. U připravených vzorků byla změřena proměnná šířka pomocí posuvného měřítka a ze zjištěných hodnot byla pro každý vzorek určena objemová hmotnost.

Tabulka 37 - průměrná objemová hmotnost vzorků

Obsah PE (%)	Průměrná objemová hmotnost nezahříváných vzorků (kg/m ³)	Průměrná objemová hmotnost zahříváných vzorků (kg/m ³)
0	2128	2105
10	2121	2031
20	2020	1870

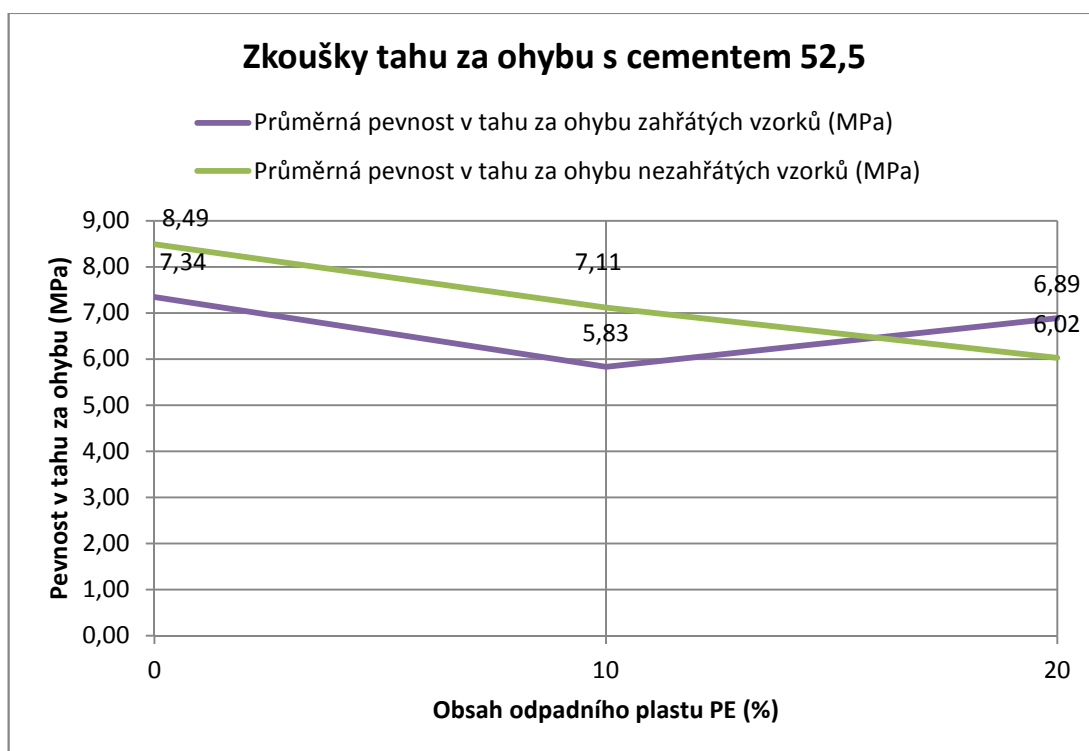
Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Na připravených vzorcích byla provedena zkouška stanovení pevnosti betonu v tahu ohybem. Stejným způsobem jako u předchozích zkoušek. Byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tahu za ohybu příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 38 - Průměrná pevnost v tahu za ohybu

Obsah PE (%)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu nezahříváných vzorků (MPa)	Průměrná pevnost v tahu za ohybu zahříváných vzorků (MPa)
0	8,49	7,34
10	7,11	5,83
20	6,02	6,89

Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je patrný pokles pevnosti v tahu za ohybu při postupném navyšování objemu PE u nezahříváných vzorků. U zahříváných vzorků pevnost v tahu za ohybu také nejdříve klesá při náhradě objemu písku z 10 % PE. Při dalším přidání PE naopak pevnost v tahu vzrůstá.



Graf 26 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 52,5 a PE

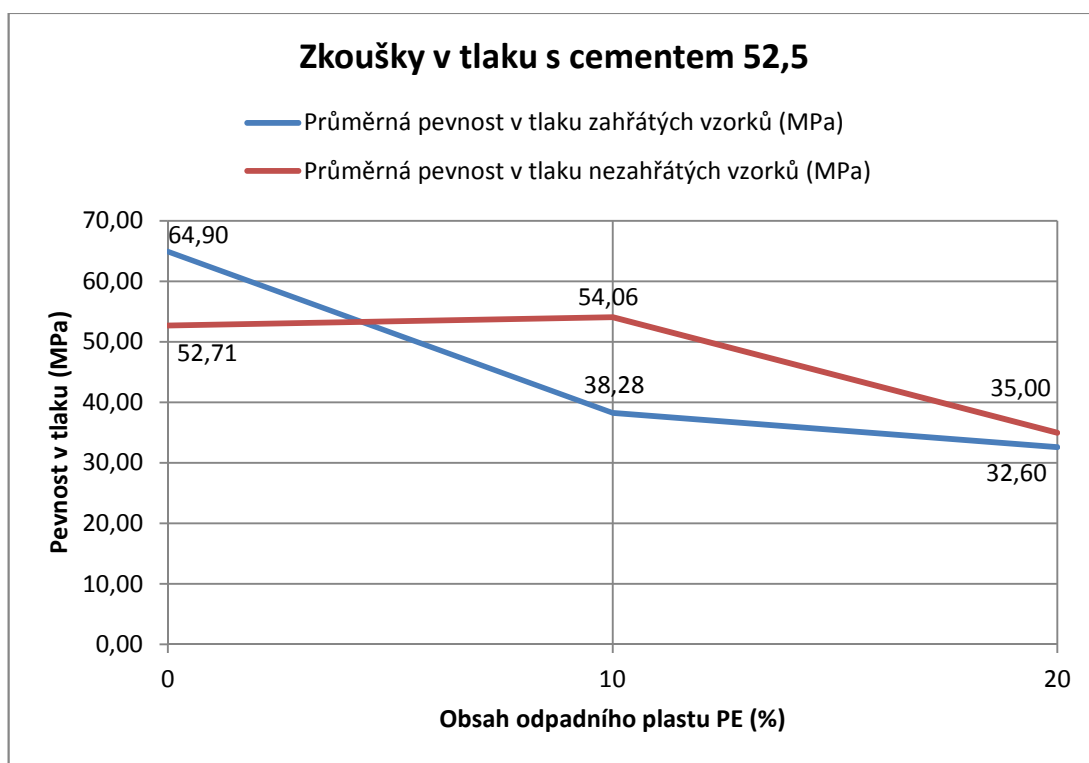
Stanovení pevnosti v tlaku

Na zbylých polovinách trámečků ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byla provedena zkouška pevnosti v tlaku stejným způsobem jako u předchozích zkoušek. Byly provedeny zkoušky vždy tří zkušebních vzorků vystavených stejným podmínkám. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná pevnost v tlaku příslušných sad vzorků, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 39 - Průměrná pevnost betonu v tlaku

Obsah PET (%)	Průměrná pevnost v tlaku nezahříváných vzorků (MPa)	Průměrná pevnost v tlaku zahříváných vzorků (MPa)
0	52,71	64,90
10	54,06	38,28
20	35,00	32,60

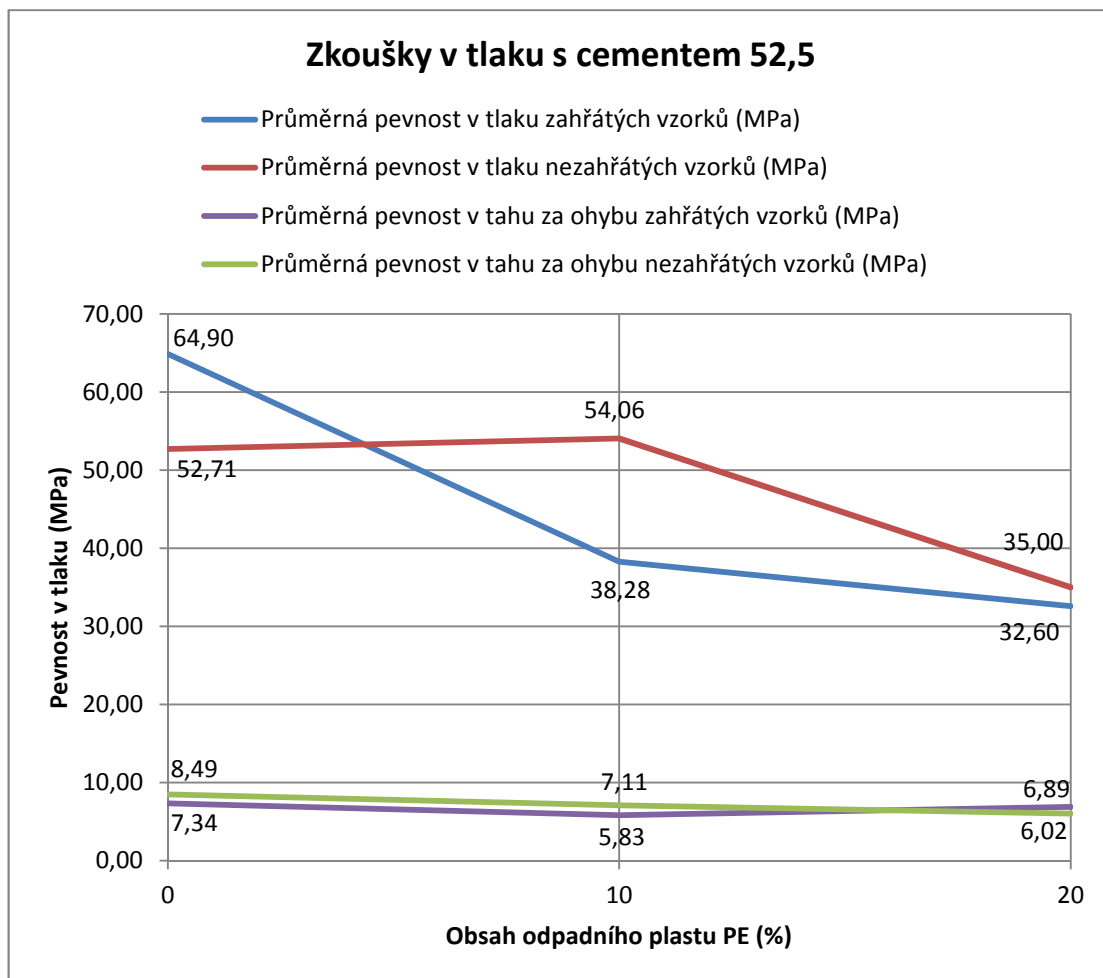
Naměřené hodnoty jsou vykresleny v grafu, kde je vidět jak pevnost betonu zahříváných vzorků klesá postupným navyšováním obsahu PE ve vzorcích. Pevnost v tlaku nezahříváných vzorků po nahrazení 10 % písku PE vzrostla, avšak po dalším přidání na 20 % pevnost klesla.



Graf 27 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 52,5 a PE

Vyhodnocení vzorků s cementem 52,5 a PE

Při pohledu na výsledky pevností jak v tahu, tak v tlaku 18 zkušebních vzorků na vyhodnocení vlastností betonu z cementu 52,5 a příměsí z polyethylenu lze říci, že směs, která vykazuje celkově nejlepší vlastnosti je ta, která byla bez příměsí PE a byla zahřívána. Tato směs má nejvyšší pevnost v tlaku a pevnost v tahu je druhá nejvyšší.



Graf 28 – Souhrnný graf pevnostní vzorků s cementem 52,5 a PE

Při dalším zkoumání souhrnného grafu s výsledky zkoušek je vidět, že většina pevnostní jak zahříváných tak nezahříváných vzorků s obsahem 20 % PE jsou nižší než pevnosti vzorků s obsahem 10 % PE, až na pevnost v tahu za ohybu při obsahu 20 % PE.

Zkouška nasákavosti

Celkově nejlépe vycházející směsi, byly směsi s 10 % obsahem plastového odpadu bez zahřívání. Tyto směsi byly vyzkoušeny na 24 hodinovou nasákavost. V tomto případě se jedná o vzorek s obsahem 10 % PE. Hmotnostní nasákavost se udává v procentech a vypočítá se jako poměr hmotnosti nasáklé kapaliny a hmotnosti vysušeného vzorku.

Zkouška byla provedena na trámečku o stejných rozměrech jako na předchozích zkouškách pevnosti. Vzorek byl připraven stejně jako v kapitole 3.2.4.1.1. pouze se změnou pevnostní třídy cementu. Vzorek byl vysušen při 110 °C do ustálení hmotnosti a zvážen. Následně byl vzorek vložen na 24 hodin do vody. Po 24 hodinách byl vzorek vyjmut z vody, povrchově osušen a zvážen na digitální váze.

Z těchto naměřených hodnot, byla určena nasákavost vzorku z následující rovnice kde n_h je hmotnostní nasákavost, m_k je hmotnost nasáklé kapaliny, m_n je hmotnost nasáklého vzorku a m_s je hmotnost vysušeného vzorku.

$$n_h = \frac{m_k}{m_s} \times 100 = \frac{m_n - m_s}{m_s} \times 100$$

Tabulka 40 - Nasákavost vzorku s 10 % objemem PE

Hmotnost vysušeného vzorku (g)	Hmotnost nasáklého vzorku (g)	Nasákavost (%)
561,5	579,2	3,2

3.3. Závěr experimentální části

Experimentální část si dávala za cíl zjistit skutečný vliv příměsi rozdrčeného odpadního plastu na pevnost betonu s různými pevnostními třídami cementu. Jako příměs byly použity dva druhy odpadního plastu a to drcený polyethylentereftalát a polyethylen získaný od společnosti WANSYDA Int. s. r. o. zabývající se zpracováním odpadních plastů.

V experimentální části byla zjišťována, objemová hmotnost, pevnost betonu v tahu za ohybu a pevnost betonu v tlaku na připravených vzorcích a u nejlépe vycházejících vzorků ještě nasákavost.

Z výsledků zkoušek pevnosti v tlaku vzorků, které nebyly zahřívány, vyplývá, že příměs plastů 10 % objemu kameniva mírně zlepšuje pevnost vzorků a to průměrně o cca 6,85 %. Vyšší příměs (20 %) další zlepšení pevnosti nepřináší, ale naopak dochází k jejímu snížení průměrně o cca 9,75 %. Lze předpokládat, že malé množství přídavku plastů vhodným způsobem doplňuje křivku zrnitosti kameniva a působí tak jako mírně pozitivní příměs. Při větším přídavku plastů se pravděpodobně začíná projevovat nižší pevnost plastů než je pevnost kameniva a pevnost vzorků klesá.

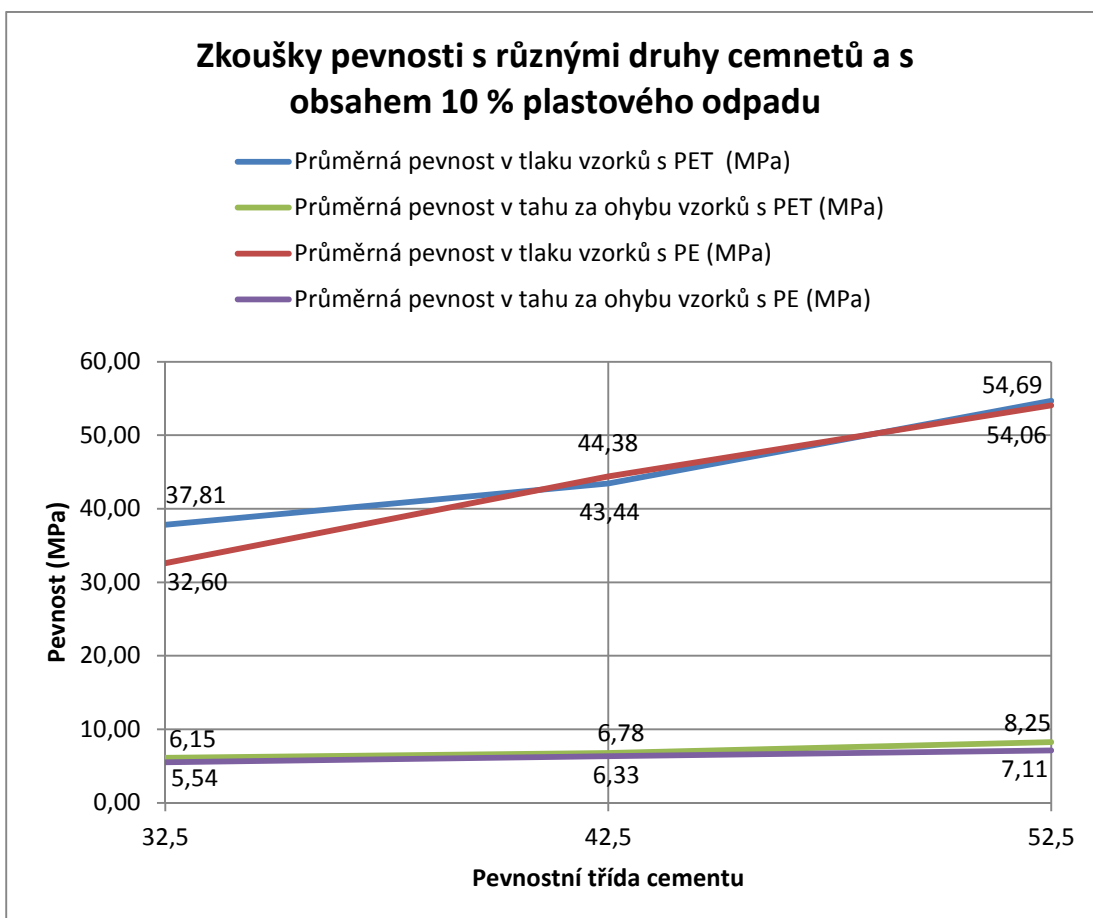
Porovnání pevnosti v tlaku vzorků, které byly zahřívány, vykazuje podstatně jiný trend. Pevnost vzorků bez přídavku plastů byla vyšší než u vzorků nezahřátých, to lze vysvětlit tím, že se urychlila zahřátím hydratace cementu a tak byla pevnost v době zkoušení u těchto vzorků vyšší. Přídavek plastu 10 % vede k poklesu pevnosti průměrně cca 26,64 % a přídavek 20 % k poklesu pevnosti o cca 43,23 %. Původní předpoklad, že se roztavený plast zapojí do struktury betonu jako další pojivo se tak nepotvrdil. Naopak dochází ke ztrátě pevnosti její příčinou je pravděpodobně to, že plasty mají podstatně vyšší tepelnou roztažnost (PET cca 5x a PE dokonce cca 15x), při zahřátí tak podstatně zvětší objem, mnohem více než cementový gel a dojde

k narušení cementových vazeb. Jejich náhrada vazbami přes plasty není zdaleka plnohodnotná, tudíž výsledný vliv přídavku plasty je negativní.

U nezahříváných vzorků s přídavkem 10 % odpadních plastů je vliv na pevnost v tahu za ohybu většinou zanedbatelný, pevnost je průměrně o cca 1,5 % vyšší. U nezahříváných vzorků s 20% přídavkem odpadního plasty je vliv na pevnost v tahu za ohybu většinou negativní, pevnost je průměrně o 25,18 % nižší. Je tedy zřejmé, že zrna plasty nemají žádný pozitivní vliv na pevnost v tahu za ohybu, současně ale při přídavku do 10 % není vliv na pevnost zásadní.

U pevnosti v tahu zahřátých vzorků je pokles pevnosti při přídavku 10 % průměrně 3,74 %, při přídavku 20 % se pevnost navýší o 4,89 %. Zde je velmi pravděpodobné, že vyšší přídavek plasty je schopen u tahové pevnosti „slepením“ roztaveným plastem částečně kompenzovat ztrátu pevnosti způsobenou narušením vazeb cementovým gelem.

Z výsledků je patrné, že nejlepší, nebo jedny z nejlepších jsou vzorky s 10% náhradou kameniva plastovým odpadem a to ty které nebyly zahřívány. Výsledky zkoušek jednotlivých cementů jsou shrnuty v grafu č. 29 a v grafu č. 30 v kapitole 4 jsou zaznamenány výsledky zkoušky nasákavosti na těchto nejlepších vzorcích.



Graf 29 – Výsledky zkoušek pevnosti vzorků s 10% obsahem plastového odpadu

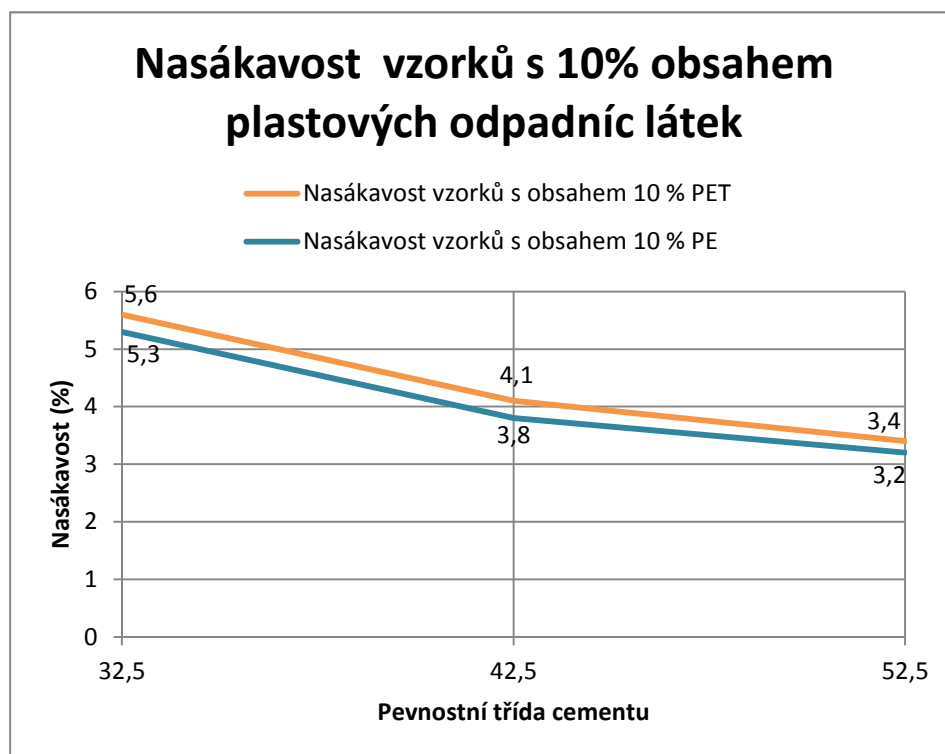
4. Závěr

Diplomová práce se zabývá vlivem příměsi termoplastů, konkrétně polyethylenu a polyethylentereftalátu na pevnost betonu za rozdílných podmínek. Hlavní část této práce analyzuje vliv různého množství přidávaných termoplastů, včetně vlivu tepelné úpravy kompozitu na změnu pevnosti v tahu, v tlaku a objemové hmotnosti.

Budoucnost recyklace plastového odpadu je v nalézání nových možností jeho využití. Cílem tedy není jen zlepšení vlastností kompozitů, nebo náhrada kameniva méně nákladným plnivem, ale především nalézt způsob využití polymerního odpadu.

Kompozitní směsi, v nichž se používají odpadní polymery, mají široké aplikace v různých oblastech průmyslu, ale také přispívají ke zlepšování životního prostředí. Plastové odpady jsou ve stavebnictví stále více využívány například do zatravnovacích dlažeb, protihlukových stěn, střešních krytin, plotů a desek teras.

Z provedených zkoušek v rámci této práce lze obecně konstatovat, že přídavek plastů nepřináší podstatné zlepšení vlastností betonu. Nízký přídavek plastů (10 % objemu kameniva) má mírně pozitivní vliv na pevnost v tlaku průměrně o 6,85 % a jen nepatrně pozitivní vliv na tahovou pevnost, průměrně o 1,5 % především u cementů nižších pevnostních tříd, vyšší přídavek pak snižuje obě pevnosti. Zahřívání vzorků požadovaný efekt nepřineslo a to pravděpodobně vlivem vysoké tepelné roztažnosti plastů, která vede k narušení cementových vazeb a tedy ke snížení pevnosti.

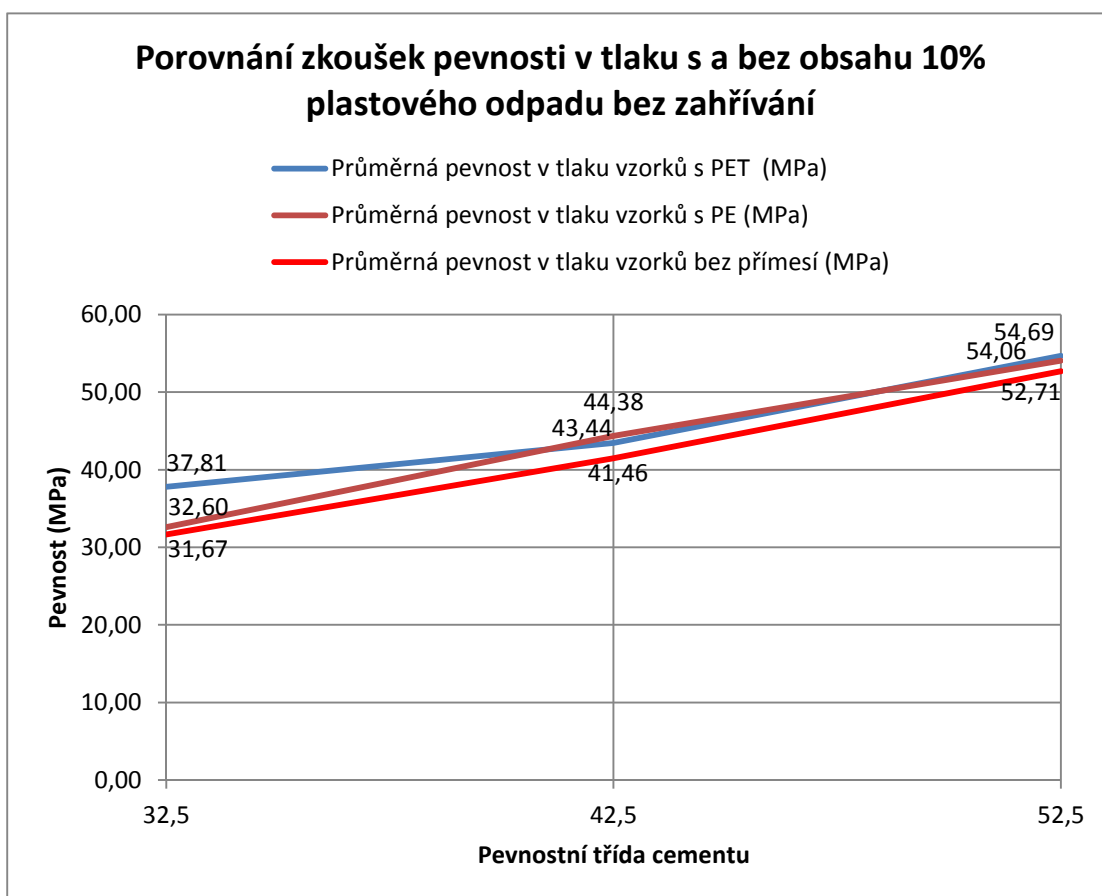


Graf 30 – Nasákavost vzorků s 10 % obsahem plastových odpadních látek

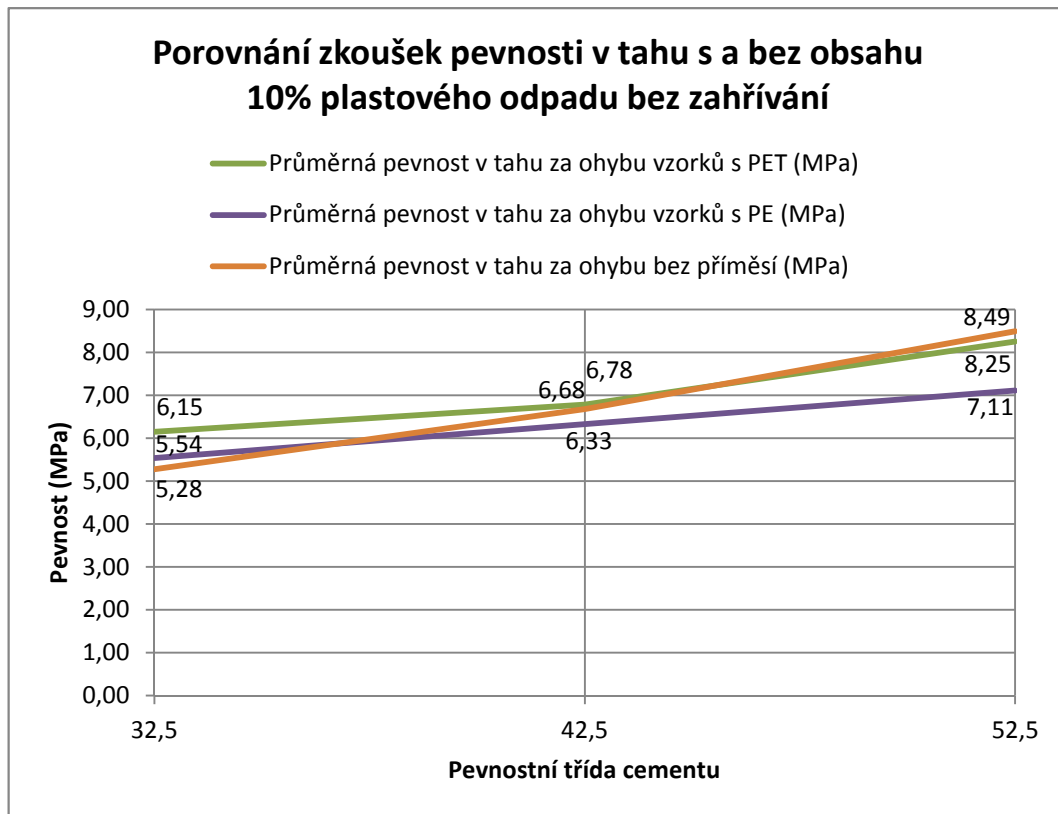
4. Závěr

Nasákavost vzorků nebyla prováděna systematicky, ale jen pro ověření, zda přídavek plastů neovlivňuje zásadně nasákavost, což by mělo vliv na využitelnost takto upraveného betonu pro použití v exteriérech. Nasákavost byla zjištěna v rozmezí cca 3,2–5,6 % a to odpovídá nasákavosti betonu bez přídavku plastů. Nasákavost vzorků s přídavkem polyethylenu byla nižší než nasákavost vzorků s přídavkem polyethylenterftalátu.

Výsledky prokazují, že nízký přídavek plastů může být jejich vhodným využitím pro úsporu kameniva a mírné zlepšení mechanických vlastností. Využije se tak plastový odpad a mírnělepší pevnost v tlaku, nárůst pevnosti je znázorněn v grafu 31 a 32. Takto upravený beton by se pravděpodobně dal používat pro drobné betonové výrobky, kde by náhrada části kameniva plastovým odpadem mohla být i cenovým přínosem.



Graf 31 – Porovnání výsledků zkoušek pevnosti v tlaku nezahříváných vzorků s 10% obsahem plastového odpadu a bez



Graf 32 – Porovnání výsledků zkoušek pevnosti v tahu nezahříváných vzorků s 10% obsahem plastového odpadu a bez

5. Přílohy

Pracovní pomůcky



Obrázek 23 - Digitální posuvné měřítko



Obrázek 24 - Automatická prosévačka



Obrázek 25 - Zkušební lis



Obrázek 26 - Tlakový přípravek do zkušebního lisu



Obrázek 27 - Odměrné válce, kyblík, stříčka, ocelový kartáč, zednická lžíce, kovová stěrka, lopatka



Obrázek 28 - Ocelová forma na zkušební trámečky

5. Přílohy



Obrázek 29 - Horkovzdušná sušárna



Obrázek 30 - Elektrická pec



Obrázek 31 - Digitální váha



Obrázek 32 - Vibrolis

Použité zdroje

- [1] *Termoplast* [online]. [cit. 2019-10-02] Dostupný z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Termoplast>
- [2] ČSN EN 197-1 ed. 2 (72 2101) Cement – Část : Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné požití, 2012
- [3] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu* Brno: VUTIUM, 2000, ISBN 80-214-1647-5
- [4] KŘÍŽOVÁ, Katarína. *Betonové konstrukce I pro SPŠ a SOU stavební* Praha: Sobotáles, 2010, ISBN 978-80-86817-39-2
- [5] DVOŘÁK, Jiří; KVÍTEK, Zdeněk; SLABÝ, Jiří. *Betonové konstrukce I pro 3. Ročník SPŠ stavebních* Praha: Sobotáles, 1996, ISBN 80-85920-20-4
- [6] SVOBODA, Luboš; a kolektiv. *Stavební hmoty* Bratislava: JAGA, 2007, ISBN 978-80-5076-057-1
- [7] Českomoravský cement a. s. *Příručka technologa BETON : HEIDELBERG CEMENT Group*, 2010
- [8] *Jak se u nás vyrábí portlandský cement* [online]. [cit. 2019-11-02] Dostupný z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/vyroba>
- [9] STAVEBNÍ KOMUNITA. *Druhy cementů do betonu* [online]. 2012 [cit. 2019-11-05] Dostupný z: <http://stavebnikomunita.cz/profiles/blogs/druhy-cementu-do-betonu>
- [10] ADÁMEK, Jiří; NOVOTNÝ, Bohumil; KOUKAL, Jan. *Stavební materiály* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996
- [11] *Historie cementu* [online]. [cit. 2019-11-09] Dostupný z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/historie-cementu>
- [12] *Cementy – základní vlastnosti* [online]. [cit. 2019-11-10] Dostupný z: http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty_cement_zk
- [13] ČSN EN 12620+A1 (721502) Kamenivo do betonu, 2008
- [14] *Kamenivo* [online]. [cit. 2019-11-19] Dostupný z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/kamenivo>
- [15] PAVLŮ, Tereza. *Zkoušení a vlastnosti recyklovaného kameniva pro použití do betonu* [online]. 2013 [cit. 2019-11-20] Dostupný z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10265-zkouseni-a-vlastnosti-recyklovaneho-kameniva-pro-pouziti-do-betonu>

- [16] ČSN EN 1008 (732028) Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, 2013
- [17] STAVEBNÍ KOMUNITA. *Voda do betonu* [online]. 2012 [cit. 2019-11-15] Dostupný z: <http://stavebnikomunita.cz/profiles/blogs/voda-do-betonu>
- [18] KRATOCHVÍL, Bohumil; ŠVORČÍK, Václav; VOJTĚCH, Dalibor. *Úvod do studia materiálů* Praha: VŠCHT Praha, 2005, ISBN 80-7080-568-4
- [19] *Fyzikální základy vědy o materiálu* [online]. 2006 [cit. 2019-11-22] Dostupný z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>
- [20] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 2014 [cit. 2019-11-25] Dostupný z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [21] *Vše co potřebujete vědět o polyetylenu* [online]. 2017 [cit. 2019-11-25] Dostupný z: <https://www.obcanskavystavba.cz/2017/07/vse-co-potrebujete-vedet-o-polyetylenu/>
- [22] *Polykondenzace* [online]. 2015 [cit. 2019-11-30] Dostupný z: <http://chemie.g6.cz/?p=220>
- [23] *Fototapeta: Polyethylentereftalát* [online]. [cit. 2019-11-30] Dostupný z: <https://myloview.cz/fototapeta-polyethylentereftalat-pet-pete-polyester-plast-c-141B5A5>
- [24] KŘÍŽ, Jan. *Stavební a izolační materiály pro stavebnictví na bázi polymerů* [online]. 2017 [cit. 2019-12-03] Dostupný z: <https://www.technopark-kralupy.cz/zamereni/stavebni-a-izolacni-materialy>
- [25] VÖRÖS, František. *Odpadní plasty ze stavebnictví* [online]. 2012 [cit. 2019-12-03] Dostupný z: <https://www.obcanskavystavba.cz/2017/07/vse-co-potrebujete-vedet-o-polyetylenu/>
- [26] *Použití, stavebnictví* [online]. [cit. 2019-12-03] Dostupný z: <https://www.fatra.cz/usage/stavebnictvi/>
- [27] *Plastics – the Facts 2019* [online]. 2019 [cit. 2019-12-03] Dostupný z: https://www.plasticseurope.org/application/files/1115/7236/4388/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf
- [28] ČERMÁK, Jan. *Polybet – technologie materiálového využití odpadních plastů* [online]. 2018 [cit. 2019-12-03] Dostupný z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/technologie/polybet-technologie-materialoveho-vyuziti-odpadnich-plastu_45553.html

- [29] JANOŠKO, Ivan. *Odpadní plasty – odstraňování a recyklace* [online]. 2011 [cit. 2019-12-11] Dostupný z: <https://www.komunalweb.cz/odpadni-plasty-odstranovani-a-recyklace/>
- [30] KRULIŠ, Zdeněk. *Možnosti recyklace plastů* [online]. 2011 [cit. 2019-12-11] Dostupný z: <http://www.enviweb.cz/88360>
- [31] *Pyrolýza odpadů – moderní způsob jejich zneškodnění* [online]. 2013 [cit. 2019-12-12] Dostupný z: <http://www.enviweb.cz/94618>
- [32] ŠŤASTNÁ, Jarmila. *Pyrolýzní jednotka pro plasty už není jen teorií* [online]. 2008 [cit. 2019-12-12] Dostupný z: <https://www.odpady-online.cz/pyrolyzni-jednotka-pro-plasty-uz-neni-jen-teorii/>
- [33] BOTEK, František; URBAN, Rudolf; ZEMÁNEK, Zdeněk. *Recyklace* Vyškov: Vysoká vojenská škola pozemního vojska, 2003, ISBN 80-238-9919-8
- [34] *Recyklace a využití plastu* [online]. 2013 [cit. 2019-12-14] Dostupný z: <https://jaktridit.cz/cz/co-se-deje-s-odpadem/recyklace-a-vyuziti-plastu>
- [35] *Depolymerizace plastů* [online]. [cit. 2019-12-14] Dostupný z: <https://www.lbgmoravia.cz/technologie/zpracovani-odpadu/depolymerizace-plastu-p53/>
- [36] *Ve stavebnictví se úspěšně využívají i odpady* [online]. [cit. 2019-12-16] Dostupný z: <https://www.e15.cz/magazin/ve-stavebnictvi-se-s-uspechem-vyuzivaji-i-odpady-977117>
- [37] *Výhody Perwood* [online]. [cit. 2019-12-16] Dostupný z: <https://www.perwood.cz/produkty/vyhody-systemu-perwood/vyhody-perwood/>
- [38] *Traplast* [online]. [cit. 2019-12-16] Dostupný z: <https://www.recyklace.cz/traplast>
- [39] *Leták - capacco* [online]. 2017 [cit. 2019-12-16] Dostupný z: <https://www.capacco.cz/wp-content/uploads/2018/02/letak-capacco-2017-1.pdf>
- [40] DOLEŽAL, Michal. *Co na střechu dřevostavby? Zkuste krytinu z recyklovaných plastů* [online]. 2015 [cit. 2019-12-16] Dostupný z: <https://www.drevostavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/strecha/3396-co-na-strechu-drevostavby-zkuste-krytinu-z-recyklovanych-plastu>
- [41] KUDRNA, Jan; DAŠEK, Ondřej. *Technické podmínky 148 - Hutněné asfaltové vrstvy s pojivem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik* Brno: Ministerstvo dopravy ČR, 2009
- [42] KUDRNA, Jan; DAŠEK, Ondřej. *Využití gumoasfaltového pojiva do obrusných vrstev vozovek* [online]. 2007 [cit. 2019-12-16] Dostupný z:

https://www.casopisstavebnictvi.cz/vyuziti-gumoasfaltoveho-pojiva-do-obrusnych-vrstev-vozovek_N277

- [43] *Pryžový granulát* [online]. [cit. 2019-12-16] Dostupný z: <https://www.rpgrecycling.cz/pryzovy-granulat>
- [44] KUDRNA, Jan; DAŠEK, Ondřej. *Využití gumoasfaltového pojiva do obrusných vrstev vozovek* [online]. 2007 [cit. 2019-12-16] Dostupný z: https://www.casopisstavebnictvi.cz/vyuziti-gumoasfaltoveho-pojiva-do-obrusnych-vrstev-vozovek_N277
- [45] FOTI, Dora. *Preliminary analysis of concrete reinforcer with waste bottles PET fibers BARI* [online]. 2011 Dostupný z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061810005969>
- [46] SAFIUDDIN, Md; JUMAAT, Mohd Zamin; SALAM, M.A; ISLAM, M. S.; HASHIM, R. *Utilization of solid wastes in construction materials* [online]. 2010 Academic Journals Dostupný z: https://academicjournals.org/article/article1380817337_Safiuddin%20et%20al.pdf
- [47] *Technický list – CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R* [online]. 2019 [cit. 2019-10-13] Dostupný z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemiibmsll325r>
- [48] *Technický list – CEM I 42,5 R* [online]. 2019 [cit. 2019-10-13] Dostupný z: https://www.lafarge.cz/sites/czech/files/atoms/files/2018_tl_cem_i_425_r_special_plus_ccc2018.pdf
- [47] *Technický list – CEM I 52,5 R* [online]. 2019 [cit. 2019-10-13] Dostupný z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi525r>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Znázornění výroby cementu [8]	12
Obrázek 2 - Struktury polymerů [19].....	20
Obrázek 3 - Struktura polyethylenu [19]	22
Obrázek 4 - Struktura polyethylentereftalátu [23]	23
Obrázek 5 - Procentuální využití polymerů v různých odvětvích [27].....	24
Obrázek 6 - Zastoupení různých druhů polymerů v různých odvětvích [27]	25
Obrázek 7 - Světová produkce polymerů [27]	26
Obrázek 8 - Procentuální zastoupení různých druhů polymerů v evropské poptávce [27]....	27
Obrázek 9 - Vývoj nakládání s plastovými odpady v Evropské unii od roku 2006 do 2018 [27].....	29
Obrázek 10 - zatravnovací dlažba z traplastu [38].....	30

Obrázek 11 - střešní krytina společnost Capacco spol. s r. o [40].	31
Obrázek 12 - pryžový granulát [43].	31
Obrázek 13 - Drť PET frakce 0–4 mm použitá na přípravu vzorků (zvětšený detail)	37
Obrázek 14 - Drť PE frakce 0–4 mm použitá na výrobu vzorků (zvětšený detail)	39
Obrázek 15 - Vzorky na zkoušku vlivu teploty na pevnost betonu	40
Obrázek 16 - vzorky odpadních plastů po zahřívání na různé teploty	44
Obrázek 17 - vzorky pro zkoušku doby zahřívání vzorků s PE	45
Obrázek 18 - 20 % PET	51
Obrázek 19 - 10 % PET	51
Obrázek 20 - Vzorek s 10% a 20% obsahem PET po zahřívání 3 h na 20 °C	51
Obrázek 21 - Fotografie vzorku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu	65
Obrázek 22 - Lom vzorkem s obsahem PE (zvětšený detail)	66
Obrázek 23 - Digitální posuvné měřítko	82
Obrázek 24 - Automatická prosévačka	82
Obrázek 25 - Zkušební lis	82
Obrázek 26 - Tlakový přípravek do zkušební lisu	83
Obrázek 27 - Odměrné válce, kyblík, stříčka, ocelový kartáč, zednická lžíce, kovová stěrka, lopatka	83
Obrázek 28 - Ocelová forma na zkušební trámečky	83
Obrázek 29 - horkovzdušná sušárna	84
Obrázek 30 - Elektrická pec	84
Obrázek 31 - Digitální váha	84
Obrázek 32 - Vibrolis	84

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Druhy cementů dle směsnosti [3]	11
Tabulka 2 - Složení cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R [47]	34
Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R [47]	34
Tabulka 4 - Složení cementu CEM I 42,5 R [48]	34
Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R [48]	34
Tabulka 6 - Složení cementu CEM I 52,5 R [49]	35
Tabulka 7 - Mechanické vlastnosti CEM I 52,5 R [49]	35
Tabulka 8 - Kamenivo použité pro zkoušky	35
Tabulka 9 - PET použité na zkoušky	37
Tabulka 10 - Průměrná objemová hmotnost vzorků	40
Tabulka 11 - Průměrné pevnosti v tahu za ohybu	41
Tabulka 12 - Průměrná pevnost betonu v tlaku	42
Tabulka 13 - průměrná objemová hmotnost vzorků	45
Tabulka 14 - Průměrné pevnosti v tahu za ohybu	46
Tabulka 15 - průměrná pevnost betonu v tlaku	47
Tabulka 16 - pevnosti různých druhů cementů	49

Tabulka 17 - průměrná objemová hmotnost vzorků	52
Tabulka 18 - Průměrná pevnost v tahu za ohybu.....	52
Tabulka 19 - Průměrná pevnost betonu v tlaku	53
Tabulka 20 - Nasákavost vzorku s 10% objemem PET	55
Tabulka 21 - Průměrná objemová hmotnost vzorků.....	56
Tabulka 22 - Průměrná pevnost v tahu za ohybu.....	56
Tabulka 23 - Průměrná pevnost betonu v tlaku	57
Tabulka 24 - Nasákavost vzorku s 10 % objemem PE	60
Tabulka 25 - průměrná objemová hmotnost vzorků	60
Tabulka 26 - Průměrná pevnost v tahu za ohybu.....	61
Tabulka 27 - Průměrná pevnost betonu v tlaku	62
Tabulka 28 - Nasákavost vzorku s 10 % objemem PET	64
Tabulka 29 - průměrná objemová hmotnost vzorků	64
Tabulka 30 - Průměrná pevnost v tahu za ohybu.....	65
Tabulka 31 - Průměrná pevnost betonu v tlaku	66
Tabulka 32 - Nasákavost vzorku s 10 % objemem PE	69
Tabulka 33 - průměrná objemová hmotnost vzorků	69
Tabulka 34 - Průměrná pevnost v tahu za ohybu.....	70
Tabulka 35 - Průměrná pevnost betonu v tlaku	71
Tabulka 36 - Nasákavost vzorku s 10 % objemem PET	73
Tabulka 37 - průměrná objemová hmotnost vzorků	73
Tabulka 38 - Průměrná pevnost v tahu za ohybu.....	74
Tabulka 39 - Průměrná pevnost betonu v tlaku	75
Tabulka 40 - Nasákavost vzorku s 10 % objemem PE	77

Seznam grafů

Graf 1 – Křivka zrnitosti použitého kameniva.....	36
Graf 2 – Křivka zrnitosti použitého polyethyltereftalátu	37
Graf 3 – Křivka zrnitosti použitého polyethylenu.....	38
Graf 4 – Vliv teploty na pevnost betonu v tahu za ohybu.....	41
Graf 5 – Vliv teploty na pevnost betonu v tlaku	42
Graf 6 – Vliv teploty na pevnost betonu.....	43
Graf 7 – Vliv doby zahřívání na pevnost betonu v tahu za ohybu	46
Graf 8 – Vliv teploty na pevnost betonu v tlaku	47
Graf 9 – Vliv teploty na pevnost betonu v tlaku	48
Graf 10 – Pevnost betonu s různými pevnostními třídami cementu	49
Graf 11 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 32,5 a PET	52
Graf 12 – Pevnost v tlaku vzorků s cementem 32,5 a PET	53
Graf 13 – Souhrnný graf pevnostní vzorků s cementem 32,5 a PET	54
Graf 14 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 32,5 a PE.....	57

Graf 15 – Pevnost v tlaku vzorků s cementem 32,5 a PE	58
Graf 16 – Souhrnný graf pevnostní vzorků s cementem 32,5 a PE	59
Graf 17 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 42,5 a PET	61
Graf 18 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 42,5 a PET	62
Graf 19 – Souhrnný graf pevnostní vzorků s cementem 42,5 a PET	63
Graf 20 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 42,5 a PE.....	65
Graf 21 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 42,5 a PE.....	67
Graf 22 – Souhrnný graf pevnostní vzorků s cementem 42,5 a PE	68
Graf 23 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 52,5 a PET	70
Graf 24 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 52,5 a PET	71
Graf 25 – Souhrnný graf pevnostní vzorků s cementem 52,5 a PET	72
Graf 26 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 52,5 a PE.....	74
Graf 27 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků s cementem 52,5 a PE.....	75
Graf 28 – Souhrnný graf pevnostní vzorků s cementem 52,5 a PE	76
Graf 29 – Výsledky zkoušek pevnosti vzorků s 10% obsahem plastového odpadu	78
Graf 30 – Nasákavost vzorků s 10 % obsahem plastových odpadních látek	79
Graf 31 – Porovnání výsledků zkoušek pevnosti v tlaku nezahříváných vzorků s 10% obsahem plastového odpadu a bez.....	80
Graf 32 – Porovnání výsledků zkoušek pevnosti v tahu nezahříváných vzorků s 10% obsahem plastového odpadu a bez.....	81