

UNIVERZITA PARDUBICE

DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2023

Tadeáš Šustr

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Experimentální analýza pěnobetonu
Bakalářská práce

2023

Tadeáš Šustr

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tadeáš Šustr**
Osobní číslo: **D19045**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Téma práce: **Experimentální analýza pěnobetonu**
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Zásady pro vypracování

Je požadováno zpracovat rešerši stávající míry poznání v ČR a v zahraničí.

Je doporučeno zaměřit se na výrobu technické pěny pomocí pěnogenerátoru (aplikace pěnotvorného koncentrátu).

Vlastní výroba bude prováděna v laboratoři CEMEX Czech Republic, s.r.o.

V experimentální části práce je požadováno laboratorně stanovit optimální koncentraci, následně provést zkoušky ztvrdlého pěnobetonu na autorem zhotovených zkušebních tělesech. Při výrobě pěnobetonu se doporučuje využít směsný cement.

Požadované výstupy:

Úvod

Přehled stanovených cílů

1) Teoretická část

Vstupní suroviny (přírodní / syntetický pěnotvorný koncentrát)

Pěna

Pěnobeton

Výroba pěnobetonu

Mobilní mechanické zařízení na tvorbu pěny – pěnogenerátor

2) Experimentální část

Výroba pěny v pěnogenerátoru

Výroba pěnobetonu

Zkoušení ztvrdlého pěnobetonu

3) Vyhodnocení dosažených výsledků

Verifikace a závěr

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- ČSN EN 206+A2. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- ČSN P 73 2404. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- ASTM C796 / C796M Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Prefomed Foam.
- ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- ČSN EN 1015-3 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešovacího stolku). Praha: Český normalizační institut, 2000.
- ČSN EN 1015-11 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- AMRAN, Y. H., Nima FARZADNIA a A. A. ABANG ALI. Properties and applications of foamed concrete; a review. Construction and Building Materials. 2015, 1011, p. 990-1005. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815305328>.
- COLLEPARDI, M., 2009. Moderní beton. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- MEHTA, P. Kumar a Paulo J. M. MONTEIRO. Concrete: microstructure, properties, and materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-179787-0; MHID 0-07-179787-4.
- NEDBAL, František, Milada MAZUROVÁ a Karel TRTÍK, 2004. Speciální betony. II. vydání: Aktualizovaný dotisk 2006. Praha: CZ SVB. ISBN 80-238-2678-6.
- PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladimír Suchánek, Ph.D.**
Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce: **26. září 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2023**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. září 2022

Prohlašuji:

Práci s názvem Experimentální analýza pěnobetonu jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 8. 5. 2023

Tadeáš Šustr v.r.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladimíru Suchánkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Chtěl bych také poděkovat společnosti CEMEX Czech Republic s.r.o. za možnost využití produktů a poskytnutí podkladů pro bakalářskou práci, jmenovitě panu Michalu Konířovi a Ing. Danieli Šmídovi. Dále bych chtěl poděkovat Střední průmyslové škole Chrudim za pomoc se zapojením topného tělesa. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat za možnost využití finančních prostředků z grantu č. SGS_2023_014 „Aktuální výzkumná témata z oblastí dopravních prostředků a infrastruktury řešená na DFJP“. Na závěr bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům, kteří mi byli podporou po celou dobu mého studia.

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá pěnobetonem včetně jeho výroby a použití. Experimentální část se zaměřuje na zkoušku pevnosti v tlaku na krychlích, stanovení dynamického modulu pružnosti a experimentálního stanovení součinitele tepelné vodivosti. Stanovení součinitele tepelné vodivosti probíhá pomocí autorem navrženého zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

pěnobeton, krychelná pevnost v tlaku, dynamický modul pružnosti, součinitel tepelné vodivosti, návrh měřicího zařízení

TITLE

Experimental Analysis of Foamed Concrete

ANNOTATION

The bachelor thesis deals with foam concrete including its production and use. The experimental part focuses on the compressive strength test on cubes, determination of the dynamic modulus of elasticity and the experimental determination of the thermal conductivity coefficient. The determination of the thermal conductivity coefficient is achieved by using a device designed by the author.

KEYWORDS

foam concrete, cubic compressive strength, dynamic modulus of elasticity, thermal conductivity coefficient, design of measuring device

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	11
SEZNAM GRAFŮ.....	13
ÚVOD A CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	14
TEORETICKÁ ČÁST.....	15
1. Definice betonu.....	15
2. Vstupní složky betonu	16
2.1. Voda	16
2.2. Cement.....	17
2.3. Kamenivo.....	20
2.4. Přísady a příměsi	21
3. Speciální betony	23
3.1. Samozhutnitelný beton	23
3.2. Stříkaný beton	23
3.3. Vysokopevnostní beton	24
3.4. Vláknobetony	25
3.5. Těžké betony	25
3.6. Lehké betony.....	26
3.6.1. Konstrukční lehké betony.....	27
3.6.2. Plynobetony.....	28
4. Pěnobeton	29
4.1. Složky pěnobetonu	29
4.1.1. Voda.....	30
4.1.2. Cement	30
4.1.3. Kamenivo	30
4.1.4. Přísady.....	33
4.1.5. Příměsi	33
5. Výroba pěnobetonu	36
5.1. Pěnogenerátor.....	37
6. Využití pěnobetonu	40
7. Zkoušení pěnobetonu	43
7.1. Pevnost pěnobetonu v tlaku	44
7.2. Dynamický modul pružnosti pěnobetonu	44
7.3. Součinitel tepelné vodivosti pěnobetonu	45
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	47
1. Přehled zkoušených receptur pěnobetonů	47
1.1. POROFLOW CF.....	47

1.2 POROFLOW RF	47
2. Pevnost pěnobetonových těles v tlaku	49
2.1. Zařízení k měření potřebných veličin	49
2.2. Průběh zkoušky pro stanovení dynamického modulu pružnosti	50
2.3. Výpočet dynamického modulu pružnosti	51
2.4. Vyhodnocení výsledků součinitelů tepelné vodivosti	53
3. Dynamický modul pružnosti pěnobetonu	67
3.1 Zařízení k měření potřebných veličin	68
3.2 Průběh zkoušky pro stanovení dynamického modulu pružnosti	69
3.3 Výpočet dynamického modulu pružnosti	71
3.4 Vyhodnocení výsledků součinitelů tepelné vodivosti	72
4. Součinitel tepelné vodivosti pěnobetonu	82
4.1 Výroba měřicího zařízení.....	82
4.1.1 Měrná tepelná deska	82
4.1.2 Tepelná izolace	85
4.1.3 Zařízení k měření potřebných veličin	87
4.2 Průběh zkoušky pro stanovení součinitele tepelné vodivosti.....	93
4.3 Výpočet součinitele tepelné vodivosti	96
4.4 Vyhodnocení výsledků součinitelů tepelné vodivosti	103
ZÁVĚR BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	104
ZDROJE.....	107

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Vlevo běžný beton a vpravo beton ošetřený hydrofobním postřikem [2]	22
Obr. 2: Lehký beton A s expandovaným jílem, B s polystyrenem, C provzdušnění [2]	27
Obr. 3: Recyklované drcené sklo v betonu [21]	31
Obr. 4: Kamenivo v podobě nadrceného recyklovaného skla [20]	32
Obr. 5 : Na obrázku „a“ a „c“ recyklované kamenivo z EPS, na obrázku „b“ a „d“ kamenivo z EPS kuliček [19]	32
Obr. 6: Příměs do betonu – popílek [5]	34
Obr. 7: Příměs do betonu – křemičitý úlet [6]	35
Obr. 8: Proces výroby pěnobetony s pěnou vyrobenou v pěnogenerátoru zvlášť	37
Obr. 9: Mobilní pěnogenerátor	38
Obr. 10: Pěna vyrobená pomocí pěnogenerátoru	39
Obr. 11: Pěna přidávána do autodomíchávače	39
Obr. 12: Pěnobetonový dům postavený za šest dní [15]	41
Obr. 13: Využití pěnobetonu jako výplňový materiál [8]	42
Obr. 14: Pěnobetonová podlaha v rodinném domě [8]	42
Obr. 15: Zkušební lisy	50
Obr. 16: Měření rozměrů [30]	50
Obr. 17: Sušení porušené těles	51
Obr. 18: Porušená krychle po pevnostní zkoušce, CF300	54
Obr. 19: Špatně odformovaná tělesa, CF300	55
Obr. 20: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, CF500	57
Obr. 21: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, CF500	57
Obr. 22: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF500	59
Obr. 23: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF500	60
Obr. 24: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF500	60
Obr. 25: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF900	62
Obr. 26: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF900	62
Obr. 27: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF900	63
Obr. 28: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF900	63
Obr. 29: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, CF500+plast	65
Obr. 30: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, CF500+plast	65
Obr. 31: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, CF500+plast	66
Obr. 32: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, CF500+plast	66

Obr. 33: a) přímá metoda, b) polopřímá metoda, c) nepřímá metoda [33].....	67
Obr. 34: PULSONIC Ultrasonic Pulse Analyser 58–E4900.....	68
Obr. 35: Kalibrace ultrazvukového přístroje.....	69
Obr. 36: Měřicí základny	70
Obr. 37: Topná fólie [23]	83
Obr. 38: Topné těleso [24].....	84
Obr. 39: Nařezané hliníkové plechy s topným tělesem.....	85
Obr. 40: Pěnový polyetylen (XPE), Polyuretanová pěna, izolační páska	86
Obr. 41: Výsledné zařízení osazené pěnobetonovými deskami	87
Obr. 42: Mobilní aplikace pro odečítání času	88
Obr. 43: Wattmetr DT26	88
Obr. 44: Použitý fotorezistor	89
Obr. 45: Přilepený fotorezistor na termostatu KT3100.....	90
Obr. 46: Schéma zapojení komponentů pro stopky [22]	91
Obr. 47: Sestavené a naprogramované stopky s fotorezistorem	91
Obr. 48: Infračervený bezkontaktní teploměr	92
Obr. 49: Teplotní čidla s dataloggerem	93
Obr. 50: Průběh zkoušky, přední a zadní strana zařízení	95
Obr. 51: Průběh zkoušky, pohled shora	95

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 : Skupiny cementů dle EN 197-1 [26].....	19
Tab. 2: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 1. krychle receptury CF300.....	53
Tab. 3: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 2. krychle receptury CF300.....	53
Tab. 4: Pevnosti na krychlích ze zkušebního lisu ve společnosti Cemex, CF300	53
Tab. 5: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 1. krychle receptury CF500.....	55
Tab. 6: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 2. krychle receptury CF500.....	55
Tab. 7: Pevnosti na krychlích ze zkušebního lisu ve společnosti Cemex, CF500	56
Tab. 8: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 1. krychle receptury RF500.....	58
Tab. 9: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 2. krychle receptury RF500.....	58
Tab. 10: Pevnosti na krychlích ze zkušebního lisu ve společnosti Cemex, CF500	58
Tab. 11: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 1. krychle receptury RF900.....	60
Tab. 12: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 2. krychle receptury RF900.....	61
Tab. 13: Pevnosti na krychlích ze zkušebního lisu ve společnosti Cemex, RF900	61
Tab. 14: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 1. krychle receptury CF500.....	64
Tab. 15: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 2. krychle receptury CF500.....	64
Tab. 16: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 1. deska receptury CF300 ...	72
Tab. 17: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 2. deska receptury CF300 ...	73
Tab. 18: Vypočítané dynamické moduly pružnosti, CF300	73
Tab. 19: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 1. deska receptury CF500 ...	74
Tab. 20: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 2. deska receptury CF500 ...	75
Tab. 21: Vypočítané dynamické moduly pružnosti, CF500	75
Tab. 22: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 1. deska receptury RF500 ...	76

Tab. 23: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 2. deska receptury RF500 ...	77
Tab. 24: Vypočítané dynamické moduly pružnosti, RF500	77
Tab. 25: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 1. deska receptury RF900 ...	79
Tab. 26: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 2. deska receptury RF900 ...	79
Tab. 27: Vypočítané dynamické moduly pružnosti, RF900	80
Tab. 28: Výsledné hodnoty jednotlivých receptur	81
Tab. 29: Rozměry desek, receptura CF300.....	97
Tab. 30: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, CF300.....	97
Tab. 31: Rozměry desek, receptura CF500.....	98
Tab. 32: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, CF500.....	99
Tab. 33: Rozměry desek, receptura RF500.....	100
Tab. 34: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, RF500.....	100
Tab. 35: Rozměry desek, receptura RF900.....	101
Tab. 36: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, RF900.....	102
Tab. 37: Porovnání výsledků	103

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Závislost hydratačního tepla na čase [1].....	18
Graf 2: Diagram vyjadřující závislosti vlastností kameniva na dávkování betonové směsi a na výsledných charakteristikách betonu [1]	21
Graf 3: Vliv urychlovače tuhnutí (s) a tvrdnutí (h) na stupeň hydratace (α) a pevnost v tlaku (f) [2]	22
Graf 4: Hodnoty pevností (červeně univerzitní lis, modře lis ze spol. Cemex), CF300	54
Graf 5: Hodnoty pevností, CF500	56
Graf 6: Hodnoty pevností, RF500	59
Graf 7: Hodnoty pevností, RF900	61
Graf 8: Výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti po vyřazení nevyhovujících hodnot, CF300	74
Graf 9: Výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti po vyřazení nevyhovujících hodnot, CF500	76
Graf 10: Výsledné hodnoty dynamických modulů, RF500	78
Graf 11: Výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti po vyřazení nevyhovujících hodnot, RF900	80
Graf 12: Výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti	81
Graf 13: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, CF300.....	98
Graf 14: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, CF500.....	99
Graf 15: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, RF500.....	101
Graf 16: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, RF900.....	102
Graf 17: Porovnání výsledků.....	103

ÚVOD A CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pěnobetony jsou speciální lehké betony s objemovou hmotností od 300 do 1550 kg/m³. Významnou složkou je pěna, podle které dostal pěnobeton svůj název. Samotná pěna se vyrábí v pěnogenerátoru pomocí pěnotvorné přísady. Pěnotvorné přísady, jak je známe dnes, se používají teprve od 80. let 20. století, jedná se tedy o relativně nový typ lehkého betonu.

Jelikož se jedná o relativně nový beton, nebyly zcela prozkoumány jeho vlastnosti a všechna možná použití. S tím souvisí, že do této doby nebyly vytvořeny potřebné normy ke zkoušení vlastností pěnobetonů. Vzhledem k širokému použití pěnobetonů mají různé receptury různé požadavky na vlastnosti ať už čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Pro zkoušení je třeba postupovat dle dané receptury a daných požadavků na betony. Ke zkoušení pěnobetonů se využívají již existující normy pro zkoušení jiných lehkých betonů, které ovšem nejsou vždy ideální volbou pro zkoušení.

Cílem **teoretické části** je uvést čtenáře do problematiky pěnobetonů. Nejprve je třeba definovat samotný beton a jeho vstupní složky, kde se čtenář poprvé seznámí s termínem speciální betony, do kterých patří i pěnobeton. Následně se v bakalářské práci uvedou příklady speciálních betonů se zaměřením na lehké betony, které se dále rozdělí do jednotlivých skupin. Po rozdělení lehkých betonů práce obeznámí se vstupními složkami do pěnobetonů, výrobou a využitím samotných betonů. Na závěr teoretické části se nastíní zkoušky pěnobetonů použitých v experimentální části.

V úvodu **experimentální části** budou vypsány a stručně popsány zkoušené receptury pěnobetonů a jejich rozlišení. Následně budou provedeny jednotlivé zkoušky.

V prvé řadě budou jednotlivé receptury zkoušeny na **pevnost v tlaku**. Zkoušení bude probíhat dle existujících norem pro autoklávovaný beton a mezerovitý beton a následné porovnání s deklarovanými pevnostmi společností CEMEX Czech Republic, s.r.o.

Druhým cílem experimentální části bude stanovení **dynamického modulu pružnosti** jednotlivých receptur za pomoci ultrazvukového měřicího přístroje.

Posledním cílem bude experimentální stanovení **součinitele tepelné vodivosti**. Pro tuto zkoušku bude autorem práce sestaveno zkušební zařízení. Cílem je sestavit zařízení v rámci daného rozpočtu (studentského grantu) a následně provést požadovanou zkoušku dle platné normy.

TEORETICKÁ ČÁST

1. Definice betonu

Beton je jedním z nejpoužívanějších stavebních materiálů, jedná se o kompozitní materiál neboli materiál složený ze dvou a více složek různých charakteristik, kdy tyto složky dají dohromady jeden ucelený materiál s určitými (jinými) charakteristikami. Beton lze také definovat jako umělý slepenec cementu a kameniva.

V porovnání s dobou před 50 lety je dnes beton hojně využívaným materiálem díky svým vlastnostem a výhodám. V určitých stavebních odvětvích je i používanější než dobře známá ocel nebo dřevo. Odhadované využití betonu je okolo 3 miliard kubických metrů za měsíc. [1]

Výhody

Jednou z výhod je odolnost betonu vůči vodě. U již zmíněného dřeva voda zásadně negativně ovlivňuje vlastnosti, kdy se dřevo stává těžším, méně pevným a pružným. U oceli voda způsobuje korozi, která způsobuje úbytek materiálu a úbytek pevnosti. Díky odolnosti vůči vodě lze betony využívat například jako materiál pro přehradu, nebo pro prvky vystavené vlhkosti například betonové základy, sloupy, stropy či nosníky [1].

Dominantní výhodou je finanční stránka betonu, kdy vstupní složky betonu, jako je cement, voda, kamenivo a přísady jsou dobře dostupné a ve svém poměru použití jsou i levnější než například ocel. Údržba staveb je také nedílnou finanční stránkou. Betony vyžadují mnohem menší nároky na údržbu například vůči zmíněným ocelím, hlavní příčinou je koroze povrchu ocelí, kdy tato nevýhoda u betonů odpadá. [1]

V neposlední řadě je výhodou tvarovatelnost (plastická konzistence) čerstvého betonu, díky které lze vytvářet různé tvary betonových prvků ať už ve formě prefabrikátu, nebo betonáží na stavbě pomocí bednění. [1]

Nevýhody

Nevýhodou betonu je pevnost v tahu, která dosahuje zhruba desetiny pevnosti v tlaku, oproti ocelím, které mají stejnou pevnost v tlaku i tahu. Je tedy náročnější návrh

a posouzení betonových prvků z hlediska namáhání. Při výpočtech (výpočetních modelech) se pevnost v tahu betonu neuvažuje.

2. Vstupní složky betonu

Jak již bylo zmíněno, beton je kompozitní materiál, konkrétně se skládá z kameniva a cementové matrice, která pojí jednotlivá zrna kameniva mezi sebou. Cementová matrice je tvořena vodou a cementem [1][2]. Do betonu se dále přidávají příměsi a přísady za účelem změny některých vlastností ať už čerstvého nebo ztvrdlého betonu.

Kamenivo může do betonu vstupovat jako hrubé nebo drobné kamenivo. Zástupcem hrubého kameniva je štěrk, materiál definovaný frakcí kameniva křivkou zrnitosti od 2,00 mm do 60 mm. Nedílnou součástí je drobné kamenivo. Do této skupiny řadíme písek, vymezený v křivce zrnitosti na interval frakce od 0,063 mm do 2,00 mm. Nesmíme opomenout také strusku, která může být jak přírodní, nebo získána z průmyslových procesů (vysokopecní struska). V neposlední řadě je třeba zmínit materiály získané demolicí objektů a následnou recyklací kamenné suti, cihel či betonu [1]. Pro lehké betony se používají například pemzy a tufy [3].

Nedílnou součástí je cement neboli hydraulické pojivo, jedná se o jemnozrnný a suchý materiál, tento typ pojiva sám o sobě nemá pojivé vlastnosti, ale po smíchání s vodou vznikne kašovitá směs, která po čase ztvrdne a tím spojí kamenivo. Základní složkou cementů je slínek, který vzniká po vypálení v cementářských pecích namletého vápence na moučku. Nejběžnějším a nejpoužívanějším cementem je portlandský cement složený ze slínku, sádrovce a anhydritu. [1][2]

Do betonu se mohou přidávat různé přísady a příměsi, nejsou však nutnou složkou v betonu. Tyto přísady a příměsi mohou pozitivně změnit vlastnosti betonu, podle zadaných požadavků. Tyto betony nazýváme speciálními betony. Například pro samozhutnitelný beton se používají superplastifikační a ztekucovací přísady pro snížení potřebného množství vody [3]. Dále nám přísady mohou pomoci při požadavku na rychlejší, nebo naopak pomalejší tuhnutí a tvrdnutí, viz kap. 1.2.4.

2.1. Voda

„Voda (water) má v čerstvém betonu dvě funkce: spolupodílí se na hydrataci a ovlivňuje jeho zpracovatelnost. Po zamíchání vody s cementem startuje chemická reakce

nazývaná hydratace, v důsledku čehož začíná beton po několika desítkách minut tuhnout a tvrdnout. Minimální potřeba vody pro hydrataci je asi 25–35 % z hmotnosti cementu.“ [4]

Podle normy [40] se voda rozděluje do 6 klasifikací podle způsobu získání. Nejvhodnějším typem je pitná voda, tento druh vody není třeba nijak zkoušet a je možné ji přímo použít pro výrobu. Dalším typem vhodným pro použití pro výrobu betonu je voda získaná při recyklaci v betonárně, avšak tato voda obsahuje velmi jemné částice v různých koncentracích podle konkrétního způsobu získání. Příkladem je voda získaná po mytí míchaček nebo voda, která byla využita pro řezání betonu vodním paprskem. Do betonu lze využít i vodu podzemní, či povrchovou, u těchto vod jsou už třeba zkoušky pro určení vhodnosti použití. Pro beton bez výztuže lze použít mořská voda, nebo voda obsahující soli. Nepoužitelnou vodou pro výrobu betonu je voda splašková. [40]

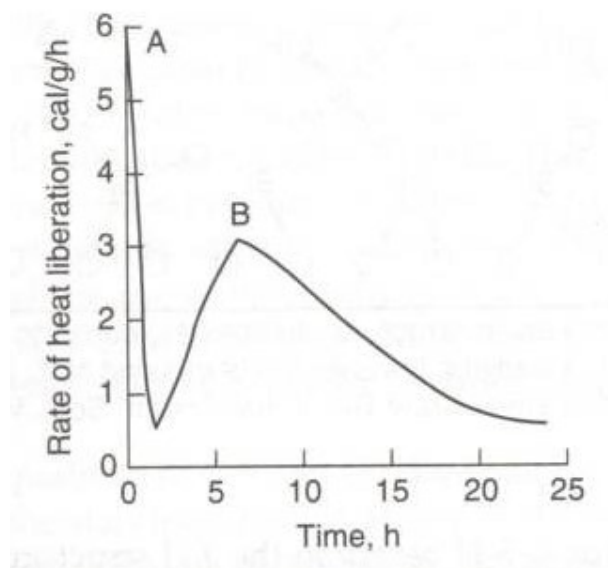
Voda musí splňovat také řadu požadavků na vlastnosti, podle kterých se určuje vhodnost vody. Tyto požadavky jsou podrobeny příslušnými zkouškami, dle normy [40]. Základní požadavky na beton se týkají olejů a tuků, čisticích prostředků, barvy vody, rozptýlených látek, zápachu, kyselosti a humusovitých látek. Je nutné sledovat i obsah chloridů, limitní hodnoty závisí na typu výztuže betonu (bez výztuže, s betonářskou výztuží, předepjatý beton a beton se všesměrně rozptýlenou výztuží), obsah síranů, alkálií a znečišťujících látek (cukry, fosfáty, dusičnany, olovo, zinek). [40]

2.2. Cement

„Beton nelze vyrobit bez kterékoliv ze základních složek – cementu, vody a kameniva. Je ovšem pravda, že duší, nebo chcete-li srdcem betonu, je cement. On je tím protagonistou, díky němuž jsou betonové konstrukce někdy označovány jako cementové konstrukce.“ [2]

Díky procesu hydratace se z kašovitě substance stává tvrdý a mechanicky odolný konstrukční materiál. Hydratace zahrnuje samotné tuhnutí materiálu, kdy po smíchání vody a cementu začíná tato kašovitá látka tuhnout. V procesu tuhnutí sledujeme počátek a dobu samotného tuhnutí, tyto dvě veličiny popisuje norma [29] na tzv. Vicatově přístroji. Druhou změnou je tvrdnutí, tato změna vyjadřuje nárůst pevnosti v tlaku za určitou dobu, standardní dobou, kdy očekáváme minimální deklarovanou pevnost v tlaku je 28 dní. Tato pevnost se musí zkoušet dle normy [30]. Samotné pevnostní třídy stanovuje norma [25]. [2]

Při hydrataci vzniká určité množství tepla, jedná se o exotermickou reakci. Nelze říci, jestli je tento jev pozitivní (například betonáž při nižších teplotách), či negativní (betonáž masivních konstrukcí), kdy může nastat pokles pevnosti nebo trvanlivosti konstrukce. Nejvíce tepla se uvolní v první hodině po přidání vody, následně toto uvolňování tepla razantně klesne. Mezi 5. a 10. hodinou tuhnutí se opět tepelný tok zvýší, ale na mnohem menší hodnotu, než tomu bylo v první hodině.



Graf 1: Závislost hydratačního tepla na čase [1]

Jednotlivé typy cementu se rozlišují podle zastoupení hlavních složek. Jednou z nich je pucolánový cement. Samotný pucolán s vodou netvrdne, k tvrdnutí je potřeba přidání vápna. Hydratací portlandského cementu vzniká vápno, je tedy možné nahradit vápno tímto cementem, je však třeba zvolit vhodný poměr pro vytvoření dostatečného množství vápna, tento poměr je zhruba 1:1. Další příměsí cementu je struska, u které je ovšem potřeba větší množství vápna, díky kterému dokáže po smíchání s vodou tvrdnout. Bez přidání vápna či portlandského cementu, probíhá tvrdnutí velmi pomalu, proto se přidává portlandský cement (6–95 %). Výhodou pucolánových a struskoportlandských cementů je pomalejší uvolňování hydratačního tepla. Do cementu lze přidat i další příměsí, popílek, křemičitý úlet nebo mikrosilika. [2]

Hlavní druhy	Označení 27 výrobků (druhy pro obecné použití)	Složení (poměry složek podle % hmotnosti*)													Doplnující složky		
		Hlavní složky															
		Slínek	Vysokopecní struska	Křemičitý úlet	Pucolány		Popílek		Kalcinovaná břidlice	Vápenec		L	LL				
					přírodní	přírodní kalcinované	křemičitý	vápenatý		V	W						
K	S	D ^p	P	Q	V	W	T	L	LL								
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský struskový cement	CEM III/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM III/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský pucolánový cement	CEM III/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský popílkový cement	CEM III/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III/A-W		80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM III/B-W		65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM III/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
	CEM III/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
	CEM III/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
	CEM III/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
Portlandský cement s vápencem	CEM III/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
	CEM III/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5		
	CEM III/A-M	80-88	←----- 12-20 ----->													0-5	
	CEM III/B-M	65-79	←----- 21-35 ----->													0-5	
CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35-64	36-85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Pucolánový cement ^f	CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Směsný cement ^f	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 ----->	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 ----->	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM V	Směsný cement ^f	CEM V/A	40-64	19-30	-	←----- 18-30 ----->	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←----- 31-49 ----->	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	

Tab. 1 : Skupiny cementů dle EN 197-1 [26]

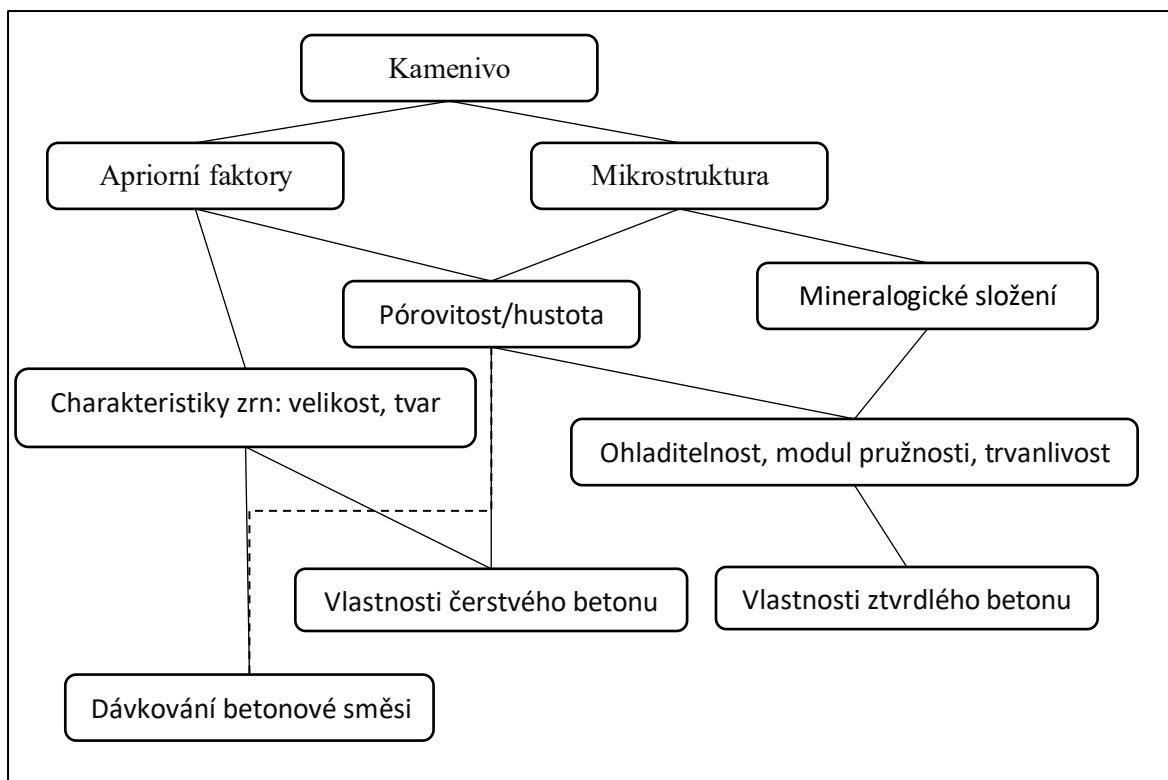
2.3. Kamenivo

Kamenivo je významnou složkou betonu díky svým vlastnostem, zlepšuje pevnost, trvanlivost, objemovou stabilitu a také snižuje celkovou cenu betonu, jelikož je levnější než cement.

Kamenivo se dělí na hrubé a drobné. Jsou-li zrna větší než 4 mm jedná se o hrubé kamenivo a pokud jsou zrna menší než tato hodnota, jedná se o drobné (jemnozrnné) kamenivo [41]. Nejpoužívanějším jemnozrnným kamenivem je písek, u hrubého kameniva štěrk. Zrnitost materiálu určujeme pomocí křivky zrnitosti, která vyjadřuje graficky závislost mezi velikostí zrn a procentuálním propadem kameniva. Ke zjištění těchto propadů se používá prosévací zkouška.

Kamenivo dále dělíme dle původu, přírodní kamenivo se získává pouze pomocí mechanických procesů. Kamenivo umělé (anorganické) získané průmyslovými procesy, jako jsou tepelné úpravy jílu a břidlic, výsledkem je kamenivo s nízkou objemovou hmotností. V neposlední řadě máme tzv. recyklované kamenivo, které se získává z materiálu po demolici objektů. Tento materiál však může být kontaminován sádrou, kovy, dřevem či plasty. V procesu recyklace je snaha o eliminaci těchto kontaminací, avšak ne vždy lze všechno odstranit, proto mají recyklovaná kameniva větší nejistotu svých konečných vlastností, které mohou negativně ovlivnit charakteristiky čerstvého nebo ztvrdlého betonu. [1][41]

U kameniva lze sledovat řadu charakteristik, které jsou důležité pro volbu vhodného kameniva do čerstvého betonu pro dosažené požadovaných vlastností. Stejně jako voda a cement musí i kamenivo tedy splňovat určité požadavky dle příslušné normy. První skupinou jsou geometrické požadavky, do této skupiny patří již zmíněná zrnitost kameniva, která se stanoví dle [32], tvar zrn, obsah schránek živočichů, obsah a kvalita jemných částic. Druhou skupinou požadavků jsou fyzikální požadavky, jako je odolnost proti drcení, otěru, ohladitelnosti, povrchovému obrusu, zmrazování a rozmrazování. [41]



Graf 2: Diagram vyjadřující závislosti vlastností kameniva na dávkování betonové směsi a na výsledných charakteristikách betonu [1]

2.4. Přísady a příměsi

Do betonu lze přidávat i přísady a příměsi. Díky nim můžeme získat lepší chování či vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu podle našich požadavků.

Příměsi jsou pevné práškovité látky, které konkrétně dokáží snížit cenu betonové směsi, snížit hydratační teplo, zlepšení pevnosti a nepropustnosti (snížení množství pórů) nebo odolnost proti síranům. Příměsi přidáváme v množství 5 % a více, zpravidla 20–70 % z hmotnosti cementu. [1]

Rozlišujeme dva základní typy, příměs typu I, do které patří filer z kameniva a pigmenty, a příměs typu II, kam zařazujeme popílek, křemičitý úlet a mletou granulovanou vysokopecní strusku. [25]

Přísady jsou většinou naopak kapalné látky, které se přidávají v množství menším jak 5 % z hmotnosti cementu. Existuje nepřeberné množství přísad s různými vlivy na beton, uvedu jen některé příklady. [1][2]

Jednou z přísad jsou inhibitory koroze, které díky svým vlastnostem dokáží zpomalit postup koroze výztuže. Hlavní složkou je dusitan vápenatý nebo levnější dusičnan sodný. [2]

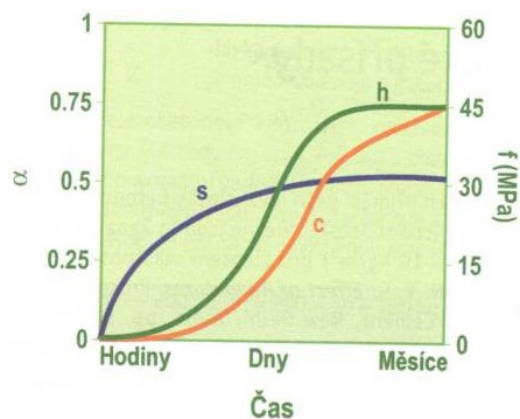
V případě, kdy potřebujeme beton s nízkým obsahem vlhkosti, či povrchovou odolností proti působení vody, je možné použít hydrofobizačních přísad na bázi silanu. Tuto přísadu lze vmíchat přímo do čerstvého betonu, ale je také možné vytvořit postřík na beton, pro povrchovou úpravu. [2]



Obr. 1: Vlevo běžný beton a vpravo beton ošetřený hydrofobním postříkem [2]

Používanými přísadami jsou také zpomalovače, či urychlovače tuhnutí a tvrdnutí, v principu snižují nebo zvyšují stupeň hydratace. Tyto přísady naleznou využití například v teplém počasí, kdy je třeba kvůli vyšším okolním teplotám snížit stupeň hydratace. [2]

Další přísady budou uvedeny u konkrétních speciálních betonů v kapitole 1.3 a 1.4.



Graf 3: Vliv urychlovače tuhnutí (s) a tvrdnutí (h) na stupeň hydratace (α) a pevnost v tlaku (f) [2]

3. Speciální betony

3.1. Samozhutnitelný beton

Samozhutnitelný beton vznikl na počátku 80. let minulého století. U hustě vyztužených konstrukcí byl zapotřebí beton, který by byl dostatečně tekutý, aby se rovnoměrně rozlil do všech míst bez jakékoliv segregace kameniva. Výhodou je dále snadná zpracovatelnost čerstvého betonu.

Pro správné samozhutnění musí být vhodné složení směsi. U samozhutnitelného betonu musí kamenivo splňovat požadavky maximální velikosti zrna, kdy se používá nejvýše 20 mm, popřípadě i 25 mm, aby mohlo dojít ke snadnějšímu tečení a zabránění segregace. Nejsou požadavky na použití určitého druhu cementu. Voda použitá pro samozhutnitelný beton musí vyhovovat požadavkům dle kap. 1.2.1. Do betonové směsi se přidávají i příměsi, které brání segregaci kameniva, konkrétně se používají minerální moučky, popílky nebo mleté vysokopecní strusky. Jako přísady se používají plastifikátory a přísady modifikující viskozitu, použitím více plastifikátorů lze docílit nahrazení jemných podílů kameniva, avšak dávkování více přísad je složitější a náchylnější k určité chybě. [2]

Samozhutnitelný beton obecně nalezne použití pro hustě vyztužené konstrukce, dále jako pohledový beton, kde jsou požadavky na hladký a neporézní povrch. Použití nalezne také při zakládání staveb, kde není možné provádět hutnění, jako jsou vrtané piloty, opěrné zdi nebo podzemní stěny. V Japonsku byl samozhutnitelný beton použit pro kotevní bloky visutého mostu. [3]

3.2. Stříkaný beton

Stříkaný beton je speciální typ betonu (technologie), který je tlakem aplikován vysokou rychlostí na daný podklad. Díky všestrannosti můžeme beton aplikovat na mnohé druhy podkladu (zemina, skála, ocel, beton, zdivo) a umožňuje zhotovení mnoha druhů konstrukcí. [2]

Vstupní suroviny stříkaného betonu jsou stejné jako u běžného betonu, avšak konkrétní složení záleží na druhu technologie, rozeznáváme suchý a mokvý způsob. Starší technologie je suchý způsob, při tomto způsobu se smíchají suché směsi, následně se tato suchá směs dopraví pod tlakem vzduchu k trysce. V trysce pomocí vodního prstence je suchá směs smíchávána s vodou a stříkána na podklad. Kvalita stříkaného betonu u této metody závisí na zkušenostech obsluhy, jelikož kontroluje množství vody, může se stát, že kvalita

bude místy jiná. Výhodou je však možnost transportu na dlouhé vzdálenosti, jelikož se suchá směs smíchává s vodou až na požadovaném místě. [1]

Druhým způsobem je mokřý způsob, při tomto způsobu se používá předpřipravené betonové směsi (voda, cement, kamenivo), která se dopraví přímo do stříkacího zařízení, odkud je pomocí tlaku vzduchu stříkána na povrch. Výhodou je tedy stálá směs, bez výrazných změn vlastností a menší množství materiálu při odrazu. [1]

Stříkaný beton má široké použití, například se využívá pro opravy betonů na mostech, přehradách a tunelech, dále tam, kde je složité bednění konstrukce, například klenby. Stříkaný beton se používá také pro betonáž tunelů na skalnatý povrch, nebo pro zesílení sloupů, desek a stěn. [1]

3.3. Vysokopevnostní beton

Již podle názvu lze vysokopevnostní beton usuzovat na vysoké pevnosti, který je definován od pevnostní třídy C50/60, dosahuje pevnosti v tlaku až 200 MPa. Tento typ speciálního betonu se používá především v zahraničí, konkrétně USA, u nás ovšem počet využití tohoto betonu narůstá. Díky vysoké pevnosti tohoto betonu lze zmenšit průřezové plochy nosných prvků, nebo snížit množství výztuže v betonových prvcích. [3]

Vysokopevnostní beton se vyznačuje nízkým vodním součinitelem, který dosahuje hodnot 0,3–0,4. Těchto hodnot je dosahováno použitím superplastifikátorů. Jako cement se používá portlandský cement, díky kombinaci portlandského cementu a superplastifikátorů lze dosáhnout nejvyšších pevností. Výběr kameniva pro vysokopevnostní beton je velmi důležitý. U nevhodně zvoleného kameniva může docházet ke vzniku trhlin v důsledku rozdílného tepelného smršťování. Kamenivo vybíráme s vysokým modulem pružnosti a nízkým koeficientem tepelné roztažnosti. Důležitou charakteristikou je maximální velikost zrna hrubého kameniva, například pro velikost 20–25 mm dosáhneme pevnosti až 70 MPa, pro velikost 14–20 mm dosáhneme pevnosti až 100 MPa a pro pevnosti vyšší jak 125 MPa je nutno použít maximální velikost zrna kameniva 10–14 mm. Přidání příměsí a přísad závisí na konkrétním vysokopevnostním betonu, lze použít přísady zpomalující tuhnutí, ztekucovací přísady nebo provzdušňovací přísady. Jako příměsí lze použít křemičitý úlet, struska a popílek. [1]

V zahraničí se vysokopevnostní beton používá především u výškových budov nebo pro výstavbu vrtných plošin pro těžbu ropy a zemního plynu. U nás tento beton nalezneme využití při stavbách dopravních staveb, konkrétně při stavbě betonových mostů. [3]

3.4. Vláknobetony

Vláknobetony jsou betony rovnoměrně vyztužené vlákny různých materiálů. Jedním z těchto materiálů může být kov nebo syntetické látky (polyvinylalkoholová vlákna). Ocelová vlákna se používají za účelem zvýšení schopnosti betonu odolávat tahovým napětím. Syntetická vlákna přispívají požární ochraně, kdy se při případném požáru vytaví a vytvoří prostor pro difuzi (vysrážení vodní páry) [7]. [2]

Cement do vláknobetonů je shodný s ostatními zmiňovanými betony, konkrétní použití závisí na požadovaných vlastnostech (pevnost v tlaku, rychlost hydratace, cena). Nároky na vodu jsou shodné dle kap. 1.2.1. Kamenivo se používá stejné jako u obyčejného betonu, tedy hrubozrnné a jemnozrnné. U vláknobetonů se setkáme s přidáním příměsí, nejčastěji je to popílek a silikonový prach. Přísady se používají pro lepší zpracovatelnost směsi z důvodu obsahu vláken. Poslední složkou jsou již zmíněná vlákna, která rozdělujeme podle nejrůznějších kritérií, jako je materiál vláken, poměr délky a průměru, tvar vláken a obsah vláken ve směsi. [3]

Vláknobeton byl použit například pro stavbu garáží, které byly sestaveny z vláknobetonových panelů, nebo na výrobu vzletové a přistávací letištní dráhy, sestavené z prefabrikovaných dílců. [1]

3.5. Těžké betony

Za těžký beton považujeme beton s objemovou hmotností větší než 2600 kg/m^3 [25].

Vstupní složkou, která dělá z betonu těžký je kamenivo, kdy objemová hmotnost kameniva má být co největší. Na kamenivo jsou kladeny podmínky, například minimální pevnost v tlaku, přídržnost ve směsi a minimální obrusnost. Používané kamenivo se dělí na přírodní a umělé. Mezi přírodní kameniva můžeme zařadit železné rudy (magnetit a hematit), limonit, baryt, dále lze použít ocel ve formě broků či drti obvykle o maximální velikosti 8 mm, konkrétní kamenivo se vybírá dle použití, musíme také brát zřetel na cenu těchto kameniv, která může být oproti běžnému kamenivu mnohem dražší. Vzhledem k vysoké objemové hmotnosti kameniva může dojít k jeho segregaci. Do směsi se používá

cement s nízkým hydratačním teplem, tedy portlandský cement s nízkým obsahem trikalciualuminátu, nebo vysokopecní cement. [3]

Nevýhodou těchto betonů je obtížná zpracovatelnost, zapříčiněná použitým kamenivem, jedná se například o čerpání betonů, které musí být uskutečněno na menší vzdálenost, aby nedocházelo k segregaci kameniva. [1]

Obecně se těžký beton používá pro zatěžovací části staveb, nebo pro stínění různých záření. Konkrétně lze tento beton použít pro výstavbu jaderných elektráren a ve zdravotnických zařízeních pro odstínění rentgenového záření. Bylo by možné použití jiných materiálů, ale těžký beton je ekonomičtější a zároveň k odstínění daných záření vyžaduje menší tloušťku. [1]

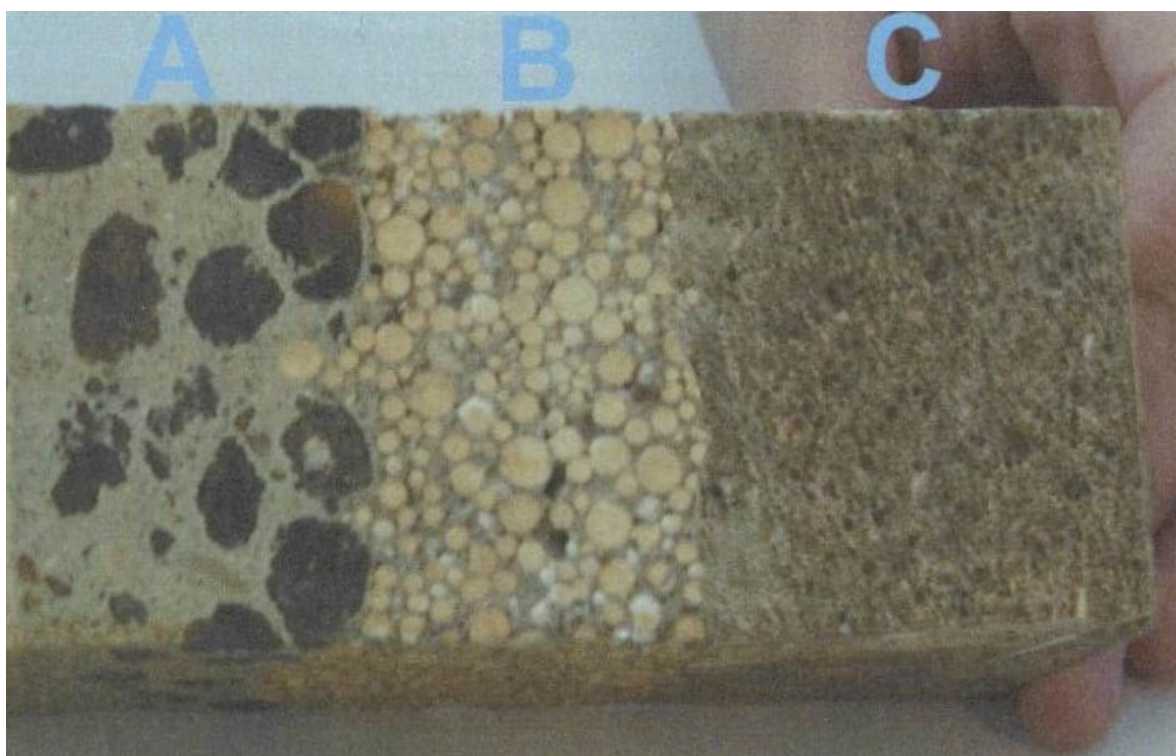
3.6. Lehké betony

Lehký beton se řadí mezi speciální betony, kdy objemová hmotnost lehkých betonů je podstatně menší než objemová hmotnost obyčejný betonů. Dle [25] lze za lehký beton považovat takový, který má po vysušení objemovou hmotnost větší než 800 kg/m^3 a menší než 2000 kg/m^3 . Pěnobetony se řadí mezi lehké betony a mohou mít až 300 kg/m^3 . Tuto skutečnost zohledňuje [2], kdy je tento interval od $300\text{--}1800 \text{ kg/m}^3$.

U obyčejného betonu představuje zatížení vlastní tíhou významnou část posuzování konstrukce kvůli jeho vyšší objemové hmotnosti. Proto je u některých konstrukcí lepší použít lehký beton, jelikož lze navrhnout menší průřezy nosných konstrukcí a zmenšit základy daného objektu [2]. Další výhodou může být rychlejší výstavba s menší pracností díky své hmotnosti, díky tomu se mohou snížit náklady na výstavbu daného stavebního objektu.

Jedná-li se o lehké betony používané k nosným konstrukcím nazýváme je **konstrukčními lehkými betony**, objemovou hmotnost mají v rozmezí $1400\text{--}2000 \text{ kg/m}^3$, dosahují pevnosti až 70 MPa . Tento beton se nejčastěji čerpá do bednění na stavbě, nebo se na stavbu už přepraví prefabrikované dílce. Jelikož se jedná o beton do nosných konstrukcí, umožňuje použití betonářské výztuže k pokrytí tahových napětí. [2][3]

Druhou skupinou patřící pod lehké betony jsou **tepelně izolační lehké betony**, tyto betony mají malou pevnost v tlaku 0,5 – 10 MPa, avšak vzhledem ke své nízké objemové hmotnosti (300–1200 kg/m³) je tato pevnost dostačující. Do této skupiny zařazujeme **plynobetony a pěnobetony**, kdy s přibývajícím objemovou hmotností roste pevnost v tlaku, ale snižuje se součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost tedy záleží na konkrétním použití.



Obr. 2: Lehký beton A s expandovaným jílem, B s polystyrenem, C provzdušnění [2]

Lehké betony mají mnoho zástupců, obecně se malé objemové hmotnosti docílí pomocí množství pórů ve ztvrdlém či čerstvém betonu. Tyto póry mohou vycházet ať už z použití kameniva nebo pomocí použití a zpracování plynotvorných a pěnotvorných přísad. [3]

3.6.1. Konstrukční lehké betony

Jak již bylo v úvodu zmíněno, jedná se o lehký beton s objemovou hmotností 1400–2000 kg/m³, který se používá pro nosné konstrukce. Tento typ betonu přináší výhody oproti obyčejnému betonu.

Složení betonové směsi ovlivňuje výsledné vlastnosti, konkrétně pevnost v tlaku, modul pružnosti a součinitel tepelné vodivosti. Do směsi se používá běžný portlandský, nebo směšný cement, kdy obsah cementu je doporučován v množství 300–450 kg/m³.

Kamenivo rozdělujeme na tři typy [3]:

1. **Přírodní anorganická kameniva**, do této skupiny patří například pemza a tufy, nevýhodou je nerovnoměrnost vlastností (pórovitost a objemová hmotnost)
2. **Umělá anorganická kameniva**, v této skupině nalezneme keramzit a zpěněné strusky, díky tovární výrobě mají rovnoměrné vlastnosti oproti přírodním.
3. **Umělá organická kameniva**, kam bychom mohli zařadit zpěněný polystyren, nevýhodou je nízká pevnost. [3]

Vzhledem k použitému pórovitému kamenivu je potřeba větší množství vody, kterou částečně nasákne kamenivo do svých pórů. [3]

Použití konstrukčních lehkých betonů vychází z jeho výhod. Hlavní výhodou je již zmíněná nízká objemová hmotnost, ačkoliv samotný lehký beton je dražší především kvůli kamenivu, celková konstrukce bývá levnější z důvodu použití menšího množství betonu.

Díky své nízké hmotnosti se hodí například pro výstavbu dalšího podlaží na stávající konstrukci, kdy nové podlaží tolik nezatíží konstrukci pod ním. Je také zapotřebí menšího množství výztuže. [2]

3.6.2. Plynobetony

Plynobeton se také řadí do skupiny lehkých betonů, ale na rozdíl od konstrukčního lehkého betonu jsou póry docíleny pomocí plynotvorné přísady, díky které v betonu vznikají uzavřené vzduchové bubliny.

Plynobetony mají široké možnosti vstupních surovin závislé na lokalitě, v Evropě nejsou specifikovány požadavky na vstupní složky, pouze na výsledné vlastnosti. Obecně jsou plynobetony vyráběny z jemného křemičitého písku, cementu, plynotvorné přísady na bázi hliníkového prášku, vápna a vody. [3]

Před samotnou výrobou je nutné písek rozemlet na požadovanou velikost zrn. Následuje smíchání vody, cementu, vápna a písku, tato směs se následně míchá zhruba 3–5 minut. Po zamíchání se přisype hliníkový prášek, který se krátce zamíchá, a nakonec se zpracuje do forem. Ve formě začnou složky spolu reagovat a začnou se vytvářet požadované uzavřené bubliny, v tomto procesu se zvětší objem plynobetonu zhruba o 50 %, díky čemuž klesne objemová hmotnost. [9]

Plynobetony se vyznačují mimo jiné také výbornými protipožárními vlastnostmi, není náchylný k výskytu plísní a díky pórům plynobetonu vykazují zvukoizolační vlastnosti. [9]

Z plynobetonu se vyrábějí většinou prefabrikované dílce, díky svým vlastnostem v čerstvém stavu lze vyrábět různé velikosti a tvary dílců. Nejznámějším produktem jsou plynobetonové tvárnice pro zděné budovy. Pro stěnové a střešní panely lze použít prefabrikáty s ocelovou výztuží. [3]

4. Pěnobeton

Pěnobeton se stejně jako plynobeton řadí do lehkých betonů, kde se nízké objemové hmotnosti docílí především pomocí dané přísady, v tomto případě se jedná o pěnotvorné přísady.

Díky variabilitě složení, lze dosáhnout různých pevností a různých objemových hmotností. Konkrétní rozmezí hodnot veličin však záleží na možnostech betonárek a použitých zařízeních. Obecně lze říci, že objemové hmotnosti pěnobetonů se pohybují v intervalu 300–1550 kg/m³, obsah vzduchu 28–78 % a pevnosti začínající přibližně na 1 MPa a dosahující pevnosti až 30 MPa, avšak běžně dosahuje pevností 10 MPa. [10]

Charakteristickou vlastností je tekutost a s tím související výhoda samozhutnitelnosti, kdy není třeba používat vibrační zařízení k dohutnění. S tekutostí a samozhutnitelností přichází další výhoda, a to samonivelační vlastnosti. Pěnobeton lze využít i pro povrchy v požadovaném spádu například pro odtok vody, pro tento účel je nutné změnit recepturu. Stejně jako plynobeton vykazuje i pěnobeton značné vlastnosti, co se týče tepelné rezistivity a zvukové izolace. Nesmíme opomenout ani důležitou vlastnost, pěnobeton je také ekologicky šetrný k přírodě. Co se týče pevností má pěnobeton skvělý poměr pevnosti k vlastní hmotnosti a v porovnání s půdou (zeminou) má i vysoký modul pružnosti. [10]

Díky těmto výhodám má pěnobeton široké využití v různých odvětvích stavitelství, ať už pozemního, či dopravního.

4.1. Složky pěnobetonu

Základní složky se nijak neliší od běžného betonu, obsahuje tedy cement, vodu a kamenivo, co ale výrazně odlišuje pěnobeton od obyčejného betonu je použití pěnotvorné

přísad. Název tohoto speciálního betonu vznikl právě z používání pěnotvorných přísad. Do pěnobetonu lze přidávat i různé příměsi, avšak nesmí nijak narušit stabilitu pěny, vzniklou v pěnogenerátoru.

4.1.1. Voda

Požadavky, způsoby získání vody a následná vhodnost vody je řešena v kapitole 1.2.1

Vodní součinitel je poměr obsahu (hmotnosti) vody k hmotnosti cementu. Pokud se použijí příměsi nebo kapalné přísady, musí se tento poměr zohlednit dle normy [25]. Vodní součinitel u pěnobetonů se pohybuje v intervalu 0,4–0,8 [10]. Konkrétní součinitel závisí na požadované konzistenci, která souvisí s použitím. Jinou konzistenci budeme požadovat pro samonivelační účinky a jinou pro možnost vytvoření spádu střechy.

Použitý druh kameniva může také ovlivnit vodní součinitel. Při velkém množství velmi jemného kameniva ve směsi je zapotřebí větší množství vody, což zapříčiní nižší pevnosti. [10]

4.1.2. Cement

Cement je jedna z hlavních složek pěnobetonu, v praxi se používá v množství 300–500 kg/m³. Kromě klasického Portlandského cementu lze použít i cementy, které dokáží zlepšit vlastnosti betonu. [9]

Pro zlepšení odolnosti proti požáru lze použít geocement neboli cement na bázi geopolymérů, název vznikl z důvodu použití minerálů geologického původu. Zlepšení protipožárních vlastností zajistí také použití alkalického Portlandského cementu. [9]

Je-li nutné zkrátit dobu tuhnutí a zvýšit počáteční pevnosti lze do pěnobetonů použít i cement s vysokým obsahem oxidu hlinitého, sulfoaluminát vápenatý cement, nebo rychle tvrdnoucí Portlandský cement. [9]

4.1.3. Kamenivo

Při výrobě pěnobetonu se nepoužívá hrubozrnné kamenivo. Důvodů je více, prvním z nich je hmotnost kameniva, které by mohlo způsobit navýšení objemové hmotnosti, což je nežádoucí. Dalším a mnohem důležitějším důvodem je možnost rozpadu pěny během

míchání kvůli hmotnosti a velikosti jednotlivých zrn. S velikostí a hmotností zrn souvisí i segregace a tendence usazování, které naruší homogenitu betonové směsi. [10]

Jemnozrné kamenivo se používá s maximální velikostí zrn 5 mm, v této skupině se běžně setkáváme s jemnými písky, které vykazují nízkou objemovou hmotnost.

Kromě přírodních kameniv je možno použít i kameniva recyklovaná, kterým je například recyklované sklo. Jemnozrné kamenivo lze zcela nahradit tímto recyklovaným sklem, pokud je pouze nadrcené (mleté sklo už se považuje za příměs). Použití skla jako kameniva přináší problém v podobě alkalicko-křemičité reakce, která lze zmírnit použitím Portlandského cementu s nízkým obsahem alkálií. Drcený beton je dalším recyklovaným kamenivem, které je možno použít do směsi. Použitím recyklovaných materiálů lze napomoci snížení odpadů a negativního dopadu na životní prostředí. [10]

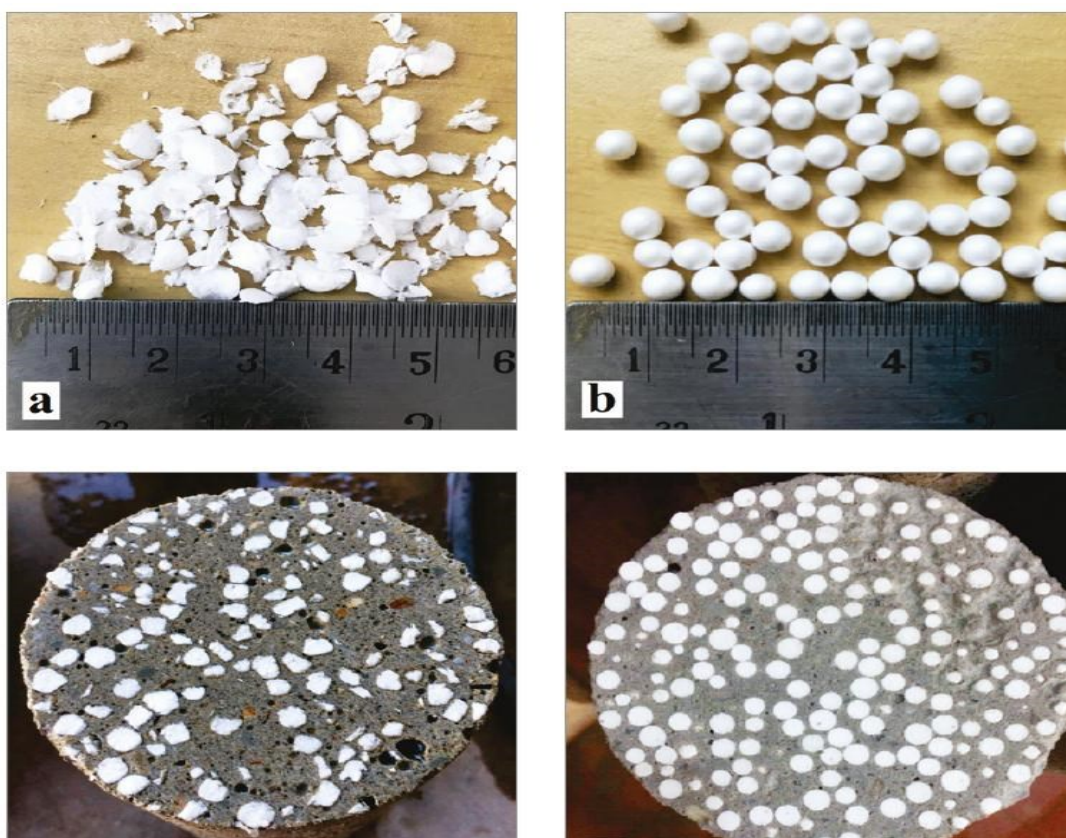


Obr. 3: Recyklované drcené sklo v betonu [21]



Obr. 4: Kamenivo v podobě nadrceného recyklovaného skla [20]

Jako syntetické kamenivo lze použít napěněné polystyrenové kuličky, k výhodám tohoto kameniva patří zvuková a tepelná izolace, oproti písku nedosahuje takových pevností, jelikož polystyrenové kuličky obsahují zhruba 98 % vzduchu. [11]



Obr. 5 : Na obrázku „a“ a „c“ recyklované kamenivo z EPS, na obrázku „b“ a „d“ kamenivo z EPS kuliček [19]

Mimo zmíněná kameniva lze použít i vápno, uhličitán vápenatý, pryžovou drť, žulový prach apod. [9][10]

Pro dosažení nejnižších objemových hmotností lze i jemnozrnné kamenivo zcela vynechat, nebo se také může nahradit vzduchovými bublinami. Tudíž se pěnobeton bude skládat pouze z cementu vody a pěnotvorné přísady.

4.1.4. Přísady

Ve výrobním procesu je nezbytné přidat pěnotvornou přísadu, následkem čehož nám vznikne lehký beton. Rozeznáváme dva základní druhy pěnotvorných přísad.

První z nich jsou přírodní pěnotvorné **přísady na bázi proteinů**. Už Římané před dvěma tisíci lety používali přírodní přísadu pro vznik vzduchových bublin v betonové směsi, touto přísadou byla zvířecí krev. Dnes jsou základem přísad na bázi proteinů také živočišné produkty. [9]

Výhodou je pevnější a uzavřenější struktura vzduchových bublin, proto jsou vhodnější pro pěnu s vysokým obsahem vzduchu (bublin). Lepší pevnost oproti syntetickým přísadám je docílena díky vlastnostem proteinů, které dokáží na sebe navázat vodu a udržet ji ve své struktuře. Voda se při hydrataci uvolňuje a reaguje s okolním cementem, výsledkem je zpevnění vzduchových bublin a již zmíněná pevnější struktura. Nevýhodou je omezená doba skladování, kvůli obsahu proteinů, a proměnlivé vlastnosti výsledné pěny, což opět souvisí s používáním přírodních surovin. [9]

Druhou jsou **syntetické pěnotvorné přísady**, vyrábí se většinou z aminů a aminových oxidů, formaldehydových naftalen sulfonátů atd. [9]

Co bylo nevýhodou u přírodních přísad, je výhodnou u syntetických přísad, konkrétně je to dlouhá doba skladování a stabilní, neproměnné vlastnosti vyrobené pěny. Další výhodou může být cena, která je nižší díky energeticky méně nákladné výrobě. V neposlední řadě se se syntetickými pěnotvornými přísadami lépe pracuje. Nevýhodou je, že některé z těchto přísad jsou nebezpečné pro zdraví člověka nebo pro životní prostředí. Týká se to hlavně přísad s obsahem formaldehydů, butylkarbitolů a glykolétrů. [9]

4.1.5. Příměsi

Přidáním příměsí můžeme docílit lepších vlastností, nebo požadovaných vlastností na výsledný beton. Je třeba si však dát pozor na množství a druh přísady, při špatném

dávkování můžeme zhoršit vlastnosti ať už ztvrdlého či čerstvého betonu nebo samotné pěny během zpracování.

Základní a prověřenou přísadou je uhelný popílek, tím lze nahradit cement až ze 75 %, dle různých výzkumů bylo zjištěno, že přidáním popílků byla zlepšena dlouhodobá pevnost, ale snížena počáteční pevnost. Popílek dále snižuje hydratační teplo, náklady na výrobu betonu (použití menšího množství cementu) a zlepšuje konzistenci. Čím větší množství popílku použijeme, tím větší množství vody je potřeba pro zachování správné konzistence. Popílek také napomáhá, pokud potřebujeme větší objem pěny v betonové směsi. [12]



Obr. 6: Příměs do betonu – popílek [5]

Je-li obsah pěny menší než 30 % směsi, je možné použít křemičitý úlet, který v tomto obsahu pěny dokáže zvýšit pevnost v tlaku bez ovlivnění množství vzduchových bublin v pěně. Avšak nad 30 % pěny ve směsi nemá křemičitý úlet žádný vliv na vlastnosti směsi. Díky snížení volné vody v důsledku přidání křemičitého úletu se zvyšují tepelně izolační charakteristiky. Křemičitý úlet se přidává až do 20 % z hmotnosti cementu. [9]



Obr. 7: Příměs do betonu – křemičitý úlet [6]

Mimo dvě zmíněné příměsi lze do směsi přidat i mletou granulovanou vysokopeční strusku v obsahu od 30–50 % z hmotnosti cementu, nebo lze také přidat příměsi vzniklé recyklací různých odpadů. [9]

5. Výroba pěnobetonu

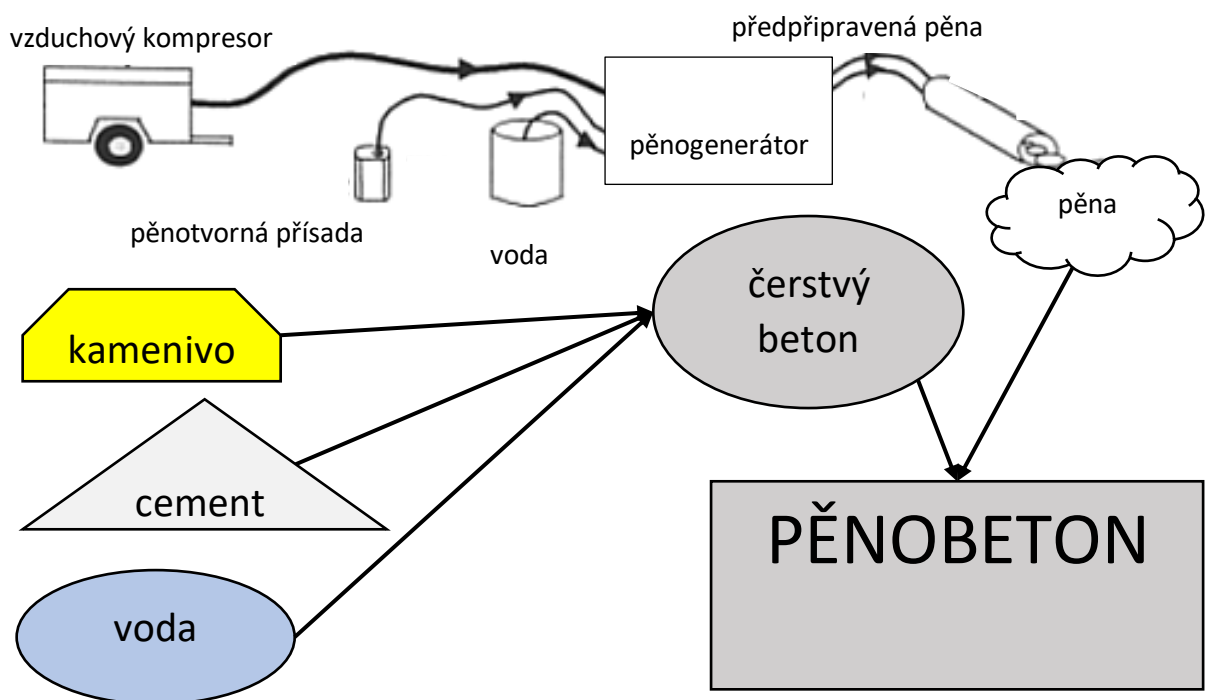
Při výrobě pěnobetonu rozeznáváme dva základní typy výroby, první z nich je metoda s **předpřipravenou pěnou** a druhá tzv. **metoda míchání pěny**.

Pěna je substance vzniklá výrobním procesem, ve kterém se použije pěnotvorná přísada (kap. 1.4.1.4.), voda (kap. 1.2.1. a 1.4.1.1.) a vzduch. Pěna má objemovou hmotnost přibližně 75 kg/m^3 , čím více pěny použijeme, tím je materiál lehčí neboli má nižší objemovou hmotnost. Použití pěnotvorných přísad pro výrobu lehkých betonů je relativně nová věc, používá se teprve od 80. let 20. století. [9][10]

První metoda se vyznačuje tím, že je nejprve vyrobena pěna, která se následně smíchá s ostatními složkami pro výrobu pěnobetonu. Takto vyrobená pěna může mít dvě formy, a to suchou pěnu a mokrou pěnu. [10]

Výroba **mokrě pěny** probíhá tak, že se roztok pěnotvorné přísady (obvykle syntetické) a vody stříká skrze jemné síto, kde vzniká pokles tlaku, díky čemuž dojde k nasátí vzduchu pro vyrovnání tlaku a výsledkem je vytvoření vzduchových bublin v rozmezí 2–5 mm. Mokrá pěna se používá pro pěnobetony s vyšší hustotou, konkrétně to znamená, že se používá pro výrobu pěnobetonů s objemovou hmotností nad 1100 kg/m^3 . Pěna musí zůstat stabilní, tu narušuje čerpání na větší vzdálenosti, lití do velkých hloubek. Stabilitu zaručíme, pokud bude ve směsi maximálně 50 % pěny a s tím právě souvisí zmíněná minimální objemová hmotnost výsledného pěnobetonu. [10]

Suchá pěna je na rozdíl od mokrě mnohem stabilnější a má také menší vzduchové bubliny, velikost je menší než 1 mm. Vzhledem a konzistencí připomíná „pěnu na holení“, kdežto mokrá pěna spíše připomíná pěnu vzniklou z mýdla. Vyrábí se v pěnogenerátoru, kde se roztok vody a pěnotvorné přísady smíchá a provzdušní a následně se do směsi přidává pod tlakem. [9][13]



Obr. 8: Proces výroby pěnobetonu s pěnou vyrobenou v pěnogenerátoru zvlášť

Druhá metoda spočívá ve smíchání pěnotvorné přísady, vody, cementu a popřípadě kameniva najednou. Při této metodě nelze dosáhnout takového napěnění přísady jako při metodě s napěněním přísady zvlášť.

5.1. Pěnogenerátor

Na trhu existuje spousta pěnogenerátorů o různých velikostech a výkonech, ale ať už se jedná o mobilní, či laboratorní pěnogenerátor, princip je u nich velice podobný, ne-li stejný.

Pěnogenerátory se skládají obecně z kompresoru, vodní pumpy, vzduchového ventilu, dávkovacího ústrojí, sestavy trubice pro vedení vody a pěnotvorné přísady do pěnogenerátoru a v samotném zařízení, a nakonec z ovládacího panelu. Pro laboratorní účely stačí menší množství pěny, proto mohou mít i zabudované nádoby na pěnotvornou přísadu. [14]

Před použitím pěnogenerátoru je potřeba zkontrolovat, zda jsou všechny trubice správně připojené. Následuje odvzdušnění vodního systému pomocí odvzdušňovacího ventilu. Nežli použijeme pěnogenerátor pro výrobu pěnobetonu je třeba si stanovit danou objemovou hmotnost a množství pěny dle požadované receptury.

Kalibrace objemové hmotnosti pěny probíhá po jejím načerpání do nádoby a známém objemu a zvažení. Pomocí získaných údajů vypočítáme objemovou hmotnost. Posléze lze seřídit pěnogenerátor pomocí vzduchového ventilu. [14]

Pro stanovení výrobního objemu pěny je třeba znát potřebné množství pěnobetonu a recepturu pro dané použití. Známe-li výrobní výkon pěnogenerátoru, uváděného většinou jednotce [l/s], lze už jednoduše vypočítat čas, po který bude pěnogenerátor vytvářet pěnu. V opačném případě lze výkon pěnogenerátoru stanovit pomocí objemnější nádoby a časomíry, pomocí kterých stanovíme naplnění nádoby za určitý čas. Nyní už je pěnogenerátor připravený a nastavený pro následné použití na stavbě. [14]

V konečné fázi je vhodné samotný pěnogenerátor vyčistit, některé mají naprogramovaný čistící cyklus, ostatní je třeba vyčistit ručně. [14]



Obr. 9: Mobilní pěnogenerátor



Obr. 10: Pěna vyrobena pomocí pěnogenerátoru



Obr. 11: Pěna přidávána do autodomíhávače

6. Využití pěnobetonu

Jak již bylo zmíněno, aplikace pěnobetonů jsou široké, záleží na konkrétních požadovaných vlastnostech pro dané použití. Pro malé objemové hustoty lze pěnobeton použít jako výplňový materiál různých dutin či nepoužívaných inženýrských. Pro vyšší objemové hmotnosti nalezne použití i jako konstrukční materiál. Pěnobeton se obecně využívá díky svým vlastnostem, a to výborné tepelně izolační vlastnosti, vysoká tekutost a samozhutnitelnost, nízké náklady na výrobu a snadná výroba.

V posledních 10 letech, se poptávka po pěnobetonu znatelně celosvětově zvýšila, důvodů pro zvýšenou poptávku je mnoho. Jedním z těchto důvodů může být zdražení ostatních stavebních materiálů (zdivo, dřevo, ale i cement), kdy výhodou pěnobetonu je nízká cena v porovnání s jinými materiály. S tím souvisí i cena přepravy materiálů a následně ekologická stopa této přepravy, pěnobeton lze vyrobit přímo na stavbě, kdežto ostatní materiály, jako tvárnice pro zděné stavby nebo dřevěné produkty pro dřevostavby, musí být dovezeny. [9]

Konkrétní využití lze také odvodit od místa využití, které souvisí s podmínkami na daném území. Střední východ je typický svými vysokými teplotami a častými zemětřeseními, proto se zde bude využívat pěnobeton jako **tepelný izolant** a materiál, který sníží účinky od zemětřesení. Pro tepelně izolační vlastnosti se používá i v severských oblastech. [9]

Tepelně izolovat lze například i mělce uložené inženýrské sítě, k izolování tepla zespodu nádrží s horkým olejem a jejich podepření. [10]

Nedostatek možnosti pro bydlení je dalším podnětem pro využití pěnobetonů, kdy lze postavit dům z pěnobetonu levně a rychle (během 6 dní).

První den se vytvoří základy na patkách a položí se trubní vedení. **Následující den** se základ natře hydroizolační vrstvou, postaví se bednění stěn včetně elektrického vedení a trubního vedení ve stěnách a vedle se položí bednění stropních panelů. Už **třetí den** probíhá betonáž stěn a stropních panelů pěnobetonem včetně odebrání vzorků pro laboratorní zkoušky betonu. **Další den** probíhá odbednění konstrukce a usazení střešních panelů. V **předposlední den** se opravují chyby po betonáži s následným provedením fasády, osazení oken a dveří včetně utěsnění a probíhá i pokládka podlah. **Poslední den** už zbývá pouze vymalovat, vybavit vnitřní prostory umyvadly a ostatním vybavením, osadit okapy

a ošetřit střechu voděodolným nátěrem. Na tomto příkladu můžeme názorně vidět velké výhody pěnobetonu, díky tepelně izolačním vlastnostem není třeba přidávat už žádnou tepelnou izolaci, pěnobetonové stěny mají dokonce až třikrát lepší zvukově izolační vlastnosti oproti zděným stavbám. Výhodu lze vidět i v rychlosti a ceně výstavby. Váha betonu v tomto případě pomůže v méně náročných základech. [15]



Obr. 12: Pěnobetonový dům postavený za šest dní [15]

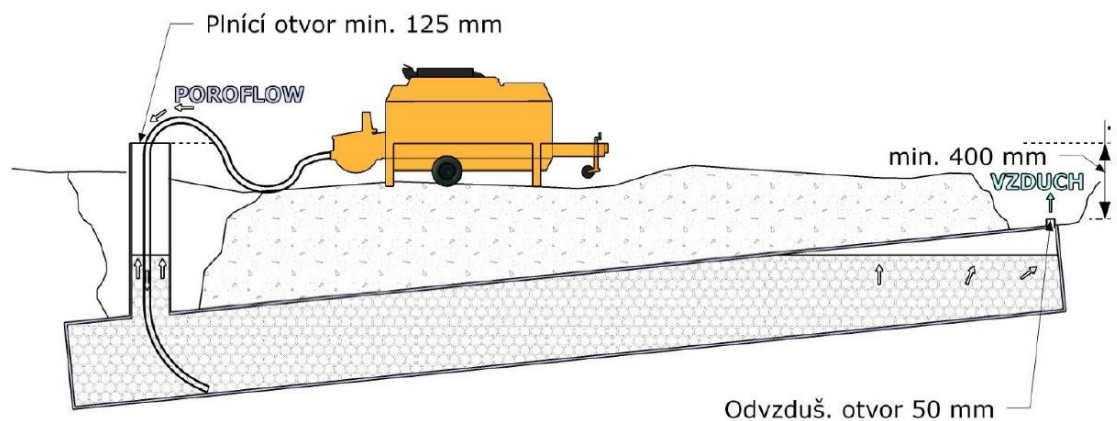
Vysoká tekutost se hodí pro **vyplňování různých dutin či prostorů**, pěnobeton se tudíž používá jako výplňový materiál. Vyplňovat lze staré kanalizace, sklepy, skladovací nádrže, dutiny pod vozovkami způsobené nejrůznějšími vlivy (nejčastěji působení vodou, opuštěné stanice metra a tunely, nebo pro vyplnění již nepotřebných propustků. Tato vlastnost se hodí i pro nové stavby, například pro podlahový beton, nebo i pro střešní beton. [10].

V dopravním stavitelství se pěnobeton používá pro podkladní vrstvy s nízkou únosností podloží, nebo jako prevence před mrazem a případným objemovým změnám v důsledku mrazu. Před mrazem můžeme pomocí pěnobetonu chránit i mělké piloty a mělké základy. [9]

Pěnobeton lze využít i v **prefabrikaci**, kde je možné vyrobit pěnobetonové tvárnice a panely pro stavbu obytných domů. Vzhledem k nízké hmotnosti lze prefabrikovat a přepravovat i celé stěny domů včetně otvorů pro okna a dveře, to významně zkrátí dobu výstavby.



Obr. 14: Pěnobetonová podlaha v rodinném domě [8]



Obr. 13: Využití pěnobetonu jako výplňový materiál [8]

V poslední řadě je třeba zmínit ještě jednu výhodu, která zde ještě nezazněla, **při případných opravách či sanacích** lze pěnobeton snadno odkopat, což značně usnadní práci a opět sníží náklady na opravu.

Na těchto příkladech můžeme vidět opravdu široké využití, které se dále bude postupem času rozšiřovat, jelikož ještě nejsou vyčerpány všechny možnosti použití pěnobetonu. Obecně však můžeme vidět využití v prostředích s nutností tepelné izolace, u konstrukcí s rychlou a levnou výstavbou.

7. Zkoušení pěnobetonu

Zkoušení betonů je důležitým procesem pro lepší poznání vlastností a dále pro systematické ověřování těchto hodnot při praktickém využití betonů. Pro pěnobetony zatím nebyly vydány žádné normy, pomocí kterých by bylo možné stanovovat konkrétní charakteristiky. V praxi se pro zkoušení pěnobetonů využívá dosud známých postupů **pro zkoušení obyčejného betonu, popřípadě autoklávovaného pórobetonu a mezerovitého betonu z pórovitého kameniva**. Samotné zkoušky jsou vázány s použitím betonu, to znamená, že se zkouší vlastnosti (veličiny), které jsou požadovány pro danou konstrukci a prostředí, které na něj působí.

Zkoušení betonů lze rozdělit podle nejrůznějších kritérií. Základní dělení je na zkoušky čerstvého a ztvrdlého betonu, vzhledem k vysoké tekutosti pěnobetonů budou v experimentální části prováděny pouze zkoušky ve ztvrdlém stavu.

Zkoušky ztvrdlého betonu lze dále dělit na zkoušky **odolností betonu** a zkoušky **mechanicko-fyzikálních vlastností betonu** [4].

Co se týče odolností betonu, tak zde máme chemické odolnosti, především odolnost proti vodě a CHRL, a mechanické odolnosti proti obrusu [4]. Jelikož se pěnobetony, které budou zkoušeny v experimentální části, nenachází v prostředích, kde by se vyskytovaly chemické rozmrazovací látky (CHRL) nebo prostředí s obrušováním betonu, nebudou tyto zkoušky prováděny.

Mechanicko-fyzikální zkoušky dělíme ještě na destruktivní a nedestruktivní zkoušky. Při destruktivních zkouškách dojde k takovému porušení vzorku, že ho nelze dále zkoušet, tyto zkoušky se hodí především pro laboratorní zkoušení, kde nám nevadí porušení vzorku. Naopak nedestruktivní zkoušky se hodí pro zkoušení stávajících konstrukcí, jelikož nedojde k jejich narušení (oslabení), avšak lze je provádět i v laboratoři.

Z destruktivních mechanicko-fyzikálních zkoušek bude prováděna zkouška **pevnosti v tlaku na krychlích**, jelikož pro daná použití je tato hodnota základním ukazatelem. Vzhledem k obecně nízkým hodnotám pevností pěnobetonů nebude prováděna zkouška pevnosti v tahu za ohybu, jelikož by bylo velmi obtížné zaznamenat sílu porušení daných zkušebních těles.

Na tělesech bude zkoušen i **modul pružnosti**, který bude stanovován nedestruktivní metodou pomocí ultrazvukového přístroje, tento modul pružnosti se nazývá dynamický.

Zkouška statického modulu pružnosti nebyla zvolena opět kvůli vlastnostem pěnobetonu, konkrétně se jedná o uchycení snímačů deformace (tenzometrů), které by kvůli pórům bylo obtížné uchytnout a mohly by nepříznivě ovlivňovat samotnou zkoušku a následně i výsledky.

Poslední nedestruktivní zkouškou, která bude v práci prováděna, je **stanovení součinitele tepelné vodivosti**. Jedná se o mechanicko-fyzikální zkoušku. Jelikož má pěnobeton tepelně izolační vlastnosti, je vhodné tuto zkoušku provést a stanovit součinitel tepelné vodivosti, popřípadě míru tepelného odporu.

7.1. Pevnost pěnobetonu v tlaku

První zkouškou, jak bylo v úvodu zmíněno, je zkouška pevnosti v tlaku, díky této zkoušce získáme pevnostní charakteristiky dané receptury pěnobetonu.

Kvůli absenci norem pro zkoušení pevnosti tlaku na pěnobetonech bude vycházeno ze základní normy pro zkoušení obyčejného betonu a z norem pro autoklávovaný pórobeton a mezerovitý beton.

Tělesa budou v podobě krychlí dle normy [36]. Norma umožňuje použít různé rozměry, pro pěnobeton jsem zvolil nejběžněji používaný rozměr 150x150x150 mm. Jelikož samotná pevnost bude velmi nízká a kvůli obtížnému formování těles nebudou použity tělesa ve formě válců.

Samotná zkouška probíhá ve zkušebním lisu, který průběžně zvyšuje sílu působící na danou plochu zkušebního tělesa. Výslednou pevnost (napětí) získáme podílem těchto hodnot. Kvůli očekávaným nízkým pevnostem zkušebních těles z pěnobetonu bude nutné nastavit lis pro větší citlivost, aby byl schopen zachytit nízké hodnoty působící síly.

Průběh a vyhodnocení zkoušky bude provedeno dle [30], [34] a [35].

Pro potřebu porovnání výsledků budou použity dva různé zkušební lisy, univerzitní a druhý lis nacházející se ve společnosti Cemex.

7.2. Dynamický modul pružnosti pěnobetonu

V inženýrské praxi se princip měření pomocí ultrazvuku používá v mnoha odvětvích, například ke zjištění závad, či pro změření veličin, jako je modul pružnosti, Poissonovo číslo nebo rovnoměrnost rozložení látky (betonu) [18]. Princip a aplikace ultrazvuku spočívá ve vysílání signálu pomocí vysílače a přijmutím ultrazvukové vlny na druhé straně vzorku pomocí přijímače.

V této práci bude měření ultrazvukem použito k nedestruktivnímu stanovení dynamického modulu pružnosti, kdy bude využita sestava vysílače a přijímače ultrazvukových vln. Jak ultrazvukový přijímač, tak i vysílač budou v kontaktu s povrchem pomocí akustické vazby a zařízení bude měřit čas průchodu pulzu skrze zkušební vzorek. [31]

Ultrazvuková impulzová metoda je velmi citlivá, proto existuje spousta faktorů ovlivňující přesnost měření. Na rychlost impulzu má vliv vlhkost daného vzorku, teplota vzorku, avšak pro teploty v rozmezí 10–30 °C se žádná korekce neuvažuje. Dále se snažíme o dostatečně dlouhou vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem, aby se odstranila chyba v heterogenitě betonu. V pěnobetonové struktuře se nachází spousta vzduchových bublin, což má za následek prodloužení času impulzu. [31]

Po změření času potřebného pro zachycení impulzu skrze měřené těleso lze výpočtem stanovit **dynamický modul pružnosti** a následně i pomocí koeficientů vypočítat statický modul pružnosti, který bude vždy nižší.

Zkouška bude probíhat na tělesech o rozměrech 340x400x100 mm dle platné normy [33].

7.3. Součinitel tepelné vodivosti pěnobetonu

Pro měření součinitele tepelné vodivosti existují obecně **dvě metody, stacionární a nestacionární metoda**. Nestacionární metoda se hodí spíše pro materiály s vysokou tepelnou vodivostí, nebo při měření za vysokých teplot. Jelikož je pěnobeton tepelně izolačním materiálem a má tudíž nízkou tepelnou vodivost, jsou nestacionární metody nevhodné.

Vhodnou metodou pro stanovení součinitele vodivosti pěnobetonu bude stacionární metoda neboli metoda ustáleného tepelného stavu. V této metodě můžeme použít **metodu chráněné tepelné desky, metoda měření tepelného toku a metodu kruhové trubky**.

Metoda měření tepelného toku se provádí na vzorku, který je umístěn mezi teplou a studenou deskou. Snímač měří tepelný tok generovaný mezi těmito dvěma deskami. Tato metoda nebyla zvolena z důvodu absence tohoto snímače. [16]

Součinitel tepelné vodivosti pěnobetonu bude měřen pomocí dvojvzorkové metody chráněné tepelné desky. Tato metoda byla zvolena vzhledem ke špatným tepelně vodivostním charakteristikám a poměrně jednoduché konstrukce samotného zařízení.

Výhodou této metody oproti ostatním stacionárním metodám je menší chyba při měření a větší rozsah měření [17]. Velkou nevýhodou je však dlouhá doba nutná pro dosažení ustáleného tepelného stavu. Při této metodě se nejdříve musí dosáhnout ustáleného tepelného stavu a až poté lze ve zvolených intervalech měřit dané veličiny pro výpočet součinitele tepelné vodivosti. Dvou vzorková metoda zahrnuje dva vzorky na jedno měření, což přináší jisté výhody. Odražené teplo od jedné desky putuje k druhé, nedochází tedy k takovým tepelným ztrátám. Druhou výhodou je menší pravděpodobnost chyby, jelikož v teoretické rovině se obě desky musí zákonitě zahřívat stejně, pokud tedy budou větší rozdíly v teplotách na površích, musíme zahrnout jistou chybu a větší míru nejistoty.

Měřicí sestava bude vytvořena dle platné normy [28]. V normě je sestava uvedena pouze schematicky a bez rozměrů. Proto pro měření budou použity stejné desky z druhé zkoušky, a to desky o rozměrech 340x400x100 mm.

Průběh této zkoušky bude probíhat také podle zmíněné normy, kdy po dosažení ustáleného tepelného stavu bude po daných intervalech měřen příkon nebo spotřebovaná elektrická energie a teploty na obou površích. Před a po měření budou ještě přeměřeny rozměry tělesa, potřebné do výpočtu dle normy.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1. Přehled zkoušených receptur pěnobetonů

Pro výrobu pěny byl použit laboratorní pěnogenerátor GFS LabE.

1.1. POROFLOW CF

Pěnobetony Poroflow CF od společnosti Cemex se používá pro vyrovnání nerovností podlah nebo tepelnou izolaci podlah. Při rekonstrukcích lze tyto receptury použít pro odlehčení stropních konstrukcí. Dále je lze také použít pro výplně okolo bazénů a jámek. [8]

Z těchto receptur byly vybrány CF300, CF500. Pro zkoušku pevnosti v tlaku byla kromě standardní receptury CF500 použita i receptura CF500+plast. Jedná se o recepturu CF500, kdy se do čerstvého betonu přidala plastifikační přísada, která by měla zlepšit zpracovatelnost čerstvého betonu a zlepšit pevnost ztvrdlého betonu.

POROFLOW CF300

- | | |
|--|--------|
| • CEM II/42,5 R | 250 kg |
| • Voda | 130 kg |
| • Pěnotvorný koncentrát na bázi proteinů | N/A kg |

POROFLOW CF500

- | | |
|--|--------|
| • CEM II/42,5 R | 300 kg |
| • Písek 0/4 mm | 160 kg |
| • Voda | 150 kg |
| • Pěnotvorný koncentrát na bázi proteinů | N/A kg |

1.2 POROFLOW RF

Pěnobetony Poroflow RF od společnosti Cemex se používá pro vytváření spádů, které se běžně provádějí do 2 %, ale speciálními postupy lze dosáhnout až 8 % spádu. Tyto spády se běžně realizují na střešních konstrukcích, kdy nahrazují na míru vyrobené polystyrenové desky se spádovým klínem. [8]

Z těchto receptur byly pro dané zkoušky vybrány RF500 a RF900.

POROFLOW RF500

- CEM II/42,5 R 280 kg
- Písek 0/4 mm 140 kg
- Voda 110 kg
- Pěnotvorný koncentrát na bázi proteinů N/A kg

POROFLOW RF900

- CEM II/42,5 R 380 kg
- Písek 0/4 mm 430 kg
- Voda 150 kg
- Pěnotvorný koncentrát na bázi proteinů N/A kg

2. Pevnost pěnobetonových těles v tlaku

Pro stanovování pevností pěnobetonových těles (krychlí) bylo vycházeno především z normy [35], jelikož je autoklávovaný pórobeton nejvíce podobný pěnobetonu a jeho vlastnostem při zkoušení pevností v tlaku.

V normě [35] se odebírají krychle z prefabrikovaných dílců o délce hrany 100 mm pomocí pily pro vyřezávání. V případě pěnobetonu byly krychle odformovány o hraně 150 mm.

Ve školním zkušebním lisu se zkoušely vždy 2 krychle od každé zkoušené receptury. Pro doplnění statistického vzorku byly použity výsledky pevnostních zkoušek ze zkušebního lisu ve společnosti Cemex.

2.1. Zařízení k měření potřebných veličin

Potřebné veličiny ke stanovení pevnosti v tlaku:

- Délky hran zatěžovací plochy
- Síla, při které došlo k porušení pěnobetonového tělesa
- Váha těles

Délky hran zatěžovací plochy

Délky hran zatěžovací plochy zkušebních těles byly měřeny pomocí posuvného měřidla s přesností na 0,1 mm dle [35].

Síla, při které došlo k porušení pěnobetonového tělesa

Prvotní variantou bylo použití zkušebního lisu pro pevnosti v tlaku na krychlích a válcích. Avšak tento lis má nejnižší zaznamenanatelnou sílu porušení 150 kN, při zatěžovací ploše o hraně 150 mm vychází minimální pevnost na 6,7 MPa. Pevnosti zkoušených receptur se pohybují v rozmezí přibližně 0,5 až 2 MPa. Není proto možné použít tento zkušební lis.

Bylo přistoupeno na druhou variantu, a to použití lisu, používaného pro zkoušky ohybu na betonových trámciích. Citlivost tohoto lisu vyhovuje nízkým pevnostem použitých receptur pěnobetonových krychlí.



Obr. 15: Zkušební lisy

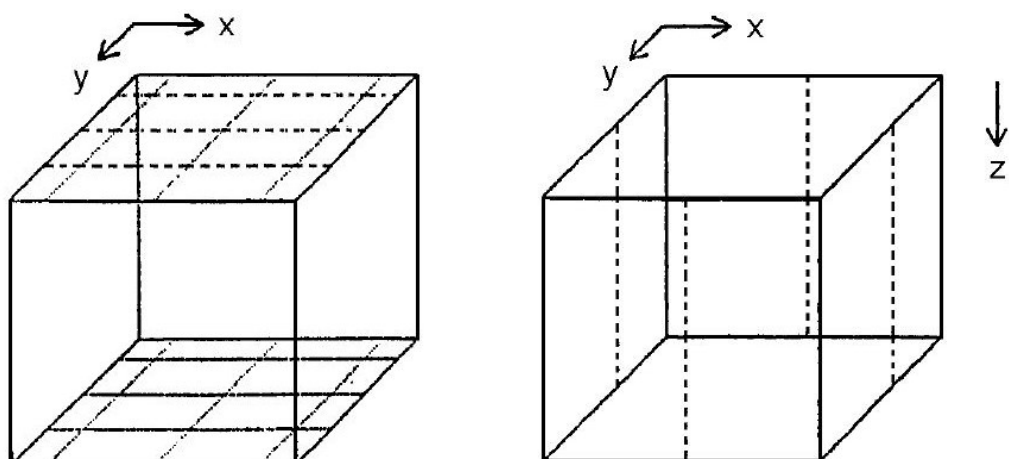
Váha těles

K vážení těles byla použita univerzitní laboratorní váha s rozsahem vážení do 30 kg (60 kg) a s rozlišením 10 g (20 g).

2.2. Průběh zkoušky pro stanovení dynamického modulu pružnosti

Tělesa byla před zkouškou kondicionována v prostředí o okolní teplotě $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $50 \pm 5 \%$.

Před zatěžováním byly změřeny hrany zatěžovací plochy a výšky jednotlivých těles viz obr. 15. Ve výsledku bylo naměřeno celkově 12 hran ve směru y a x, následně 4 výšky.



Obr. 16: Měření rozměrů [30]

Po změření rozměrů těles byl připraven lis, do kterého se postupně umísťovaly pěnobetonové krychle a následně se zatěžovaly do porušení. Zatěžování probíhalo rychlostí 0,15 MPa/s dle přístupu v normě [35] a [34].

Po zatěžovací zkoušce byla porušená tělesa zvážena a umístěna do sušičky, kde se tělesa sušila při teplotě 105 °C do ustálené hmotnosti. Ustálená hmotnost nastává, pokud se hmotnost během 24 h sušení nezmění o 0,2 %. Ustálené hmotnosti vysušených těles byly zaznamenány.



Obr. 17: Sušení porušení těles

2.3. Výpočet dynamického modulu pružnosti

Pevnost tlaku na krychlích se vypočítá pomocí vzorce dle [35]:

$$f_{civ} = \frac{F_i}{A_{ci}} \quad (1)$$

kde f_{civ} pevnost v tlaku, v MPa

A_{ci} vypočítaná zatěžovací plocha ze změřených rozměrů, v mm²

F_i největší síla při porušení, v N

Objemová hmotnost těles se vypočítá dle normy [37]:

$$\rho = \frac{m_{di}}{V_i} \quad (2)$$

kde ρ objemová hmotnost pěnobetonu, v kg/m^3

m_{di} hmotnost vysušeného tělesa, v kg

V_i vypočítaný objem ze změřených rozměrů, v m^3

Zbytková vlhkost tělesa vztažená na hmotnost se vypočítá dle normy [38]:

$$\mu_m = \frac{m_{hum} - m_{dry}}{m_{dry}} \quad (3)$$

kde μ_m vlhkost, v %

m_{hum} hmotnost tělesa ve vlhkém stavu, v kg

m_{dry} hmotnost tělesa v suchém stavu, v kg

2.4. Vyhodnocení výsledků součinitelů tepelné vodivosti

Receptura CF300

V následujících dvou tabulkách jsou uvedeny vstupní veličiny (zatěžovací plocha a síla při porušení tělesa) pro výpočet krychelných pevností dle vzorce (1). Dále je uvedena vlhkost a objemová hmotnost vysušených těles vypočtená dle (2) a (3).

Vzhledem k nízké objemové hmotnosti této receptury je samotná zkouška obtížná s velkými odchylkami. Rozměry odformovaných těles se od nominálních rozměrů znatelně lišily.

Těleso 1				
Plocha [mm ²]	Síla porušení [N]	Pevnost [MPa]	Vlhkost [%]	Obj. hm. vys. tělesa [kg/m ³]
22153,1	7471	0,34	9	270

Tab. 2: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 1. krychle receptury CF300

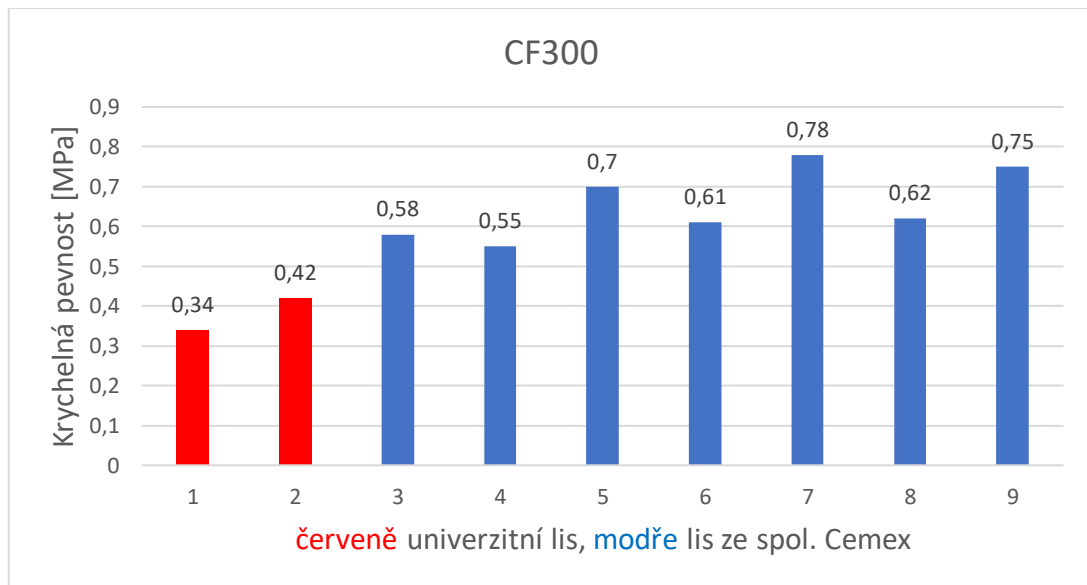
Těleso 1				
Plocha [mm ²]	Síla porušení [N]	Pevnost [MPa]	Vlhkost [%]	Obj. hm. vys. tělesa [kg/m ³]
21882,0	9087	0,42	9	270

Tab. 3: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 2. krychle receptury CF300

V tabulce 4 jsou uvedeny pevnosti na krychlím ze zkušební lisu ve společnosti Cemex. Zbytková vlhkost těles se pohybovala okolo 12–18 %.

Pevnosti na krychlích (Cemex) [MPa]						
0,58	0,55	0,70	0,61	0,78	0,62	0,75

Tab. 4: Pevnosti na krychlích ze zkušební lisu ve společnosti Cemex, CF300



Graf 4: Hodnoty pevností (červeně univerzitní lis, modře lis ze spol. Cemex), CF300

Z výsledných hodnot pevností si lze povšimnout, že na univerzitním lisu byla změřena nižší pevnost nežli na zkušebním lisu ve společnosti Cemex. Průměrná hodnota krychelné pevnosti receptury CF300 vychází **0,59 MPa**.

Minimální pevnost v tlaku receptury CF300, deklarovaná společností Cemex je 0,5 MPa. Z výsledků ze zkušebních lisů si můžeme povšimnout, že výsledky z univerzitního lisu nevyhovují. Tento výsledek je pravděpodobně zapříčiněn špatným odformováním daných krychlí pro zkoušku na univerzitním zkušebním lisu.



Obr. 18: Porušená krychle po pevnostní zkoušce, CF300



Obr. 19: Špatně odformovaná tělesa, CF300

Receptura CF500

V následujících dvou tabulkách jsou uvedeny vstupní veličiny (zatěžovací plocha a síla při porušení tělesa) pro výpočet krychelných pevností dle vzorce (1). Dále je uvedena vlhkost a objemová hmotnost vysušených těles vypočtená dle (2) a (3).

Těleso 1				
Plocha [mm ²]	Síla porušení [N]	Pevnost [MPa]	Vlhkost [%]	Obj. hm. vys. tělesa [kg/m ³]
22648,0	26286	1,16	7	500

Tab. 5: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 1. krychle receptury CF500

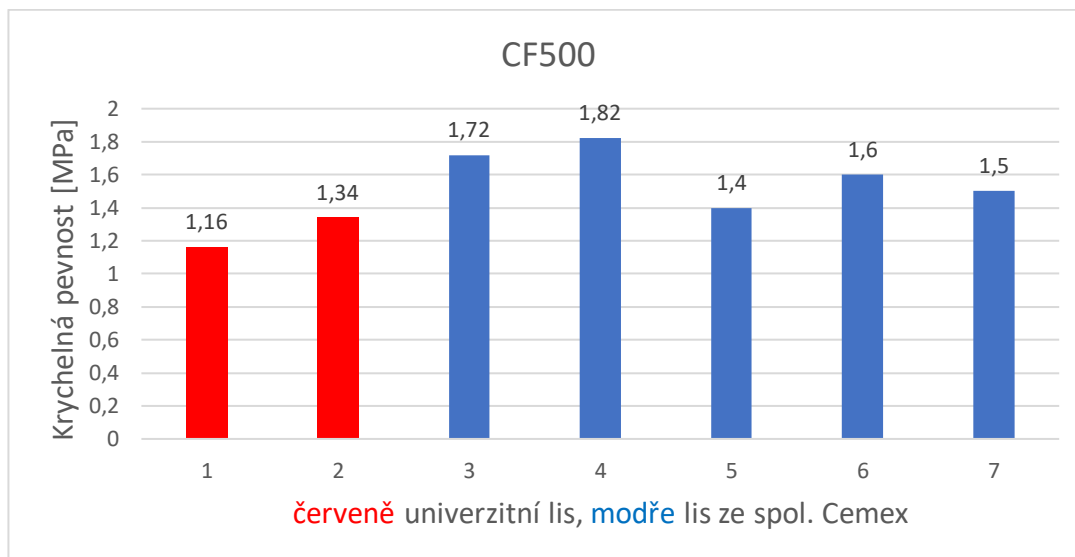
Těleso 1				
Plocha [mm ²]	Síla porušení [N]	Pevnost [MPa]	Vlhkost [%]	Obj. hm. vys. tělesa [kg/m ³]
22541,5	30145	1,34	7	480

Tab. 6: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 2. krychle receptury CF500

V tabulce 7 jsou uvedeny pevnosti na krychlím ze zkušebního lisu ve společnosti Cemex. Zbytková vlhkost těles se pohybovala okolo 12–15 %.

Pevnosti na krychlích (Cemex) [MPa]				
1,72	1,82	1,40	1,60	1,50

Tab. 7: Pevnosti na krychlích ze zkušebního lisu ve společnosti Cemex, CF500



Graf 5: Hodnoty pevností, CF500

Z výsledných hodnot pevností si lze povšimnout, že na univerzitním lisu byla opět změřena nižší pevnost nežli na zkušebním lisu ve společnosti Cemex. V tomto případě však jsou rozdíly u jednotlivých lisů zanedbatelné. Průměrná hodnota krychelné pevnosti receptury CF500 vychází **1,51 MPa**.

Minimální pevnost v tlaku receptury CF500, deklarovaná společností Cemex je 1 MPa. Všechny zkoušené krychle odpovídají minimálním deklarovaným pevnostem.



Obr. 20: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, CF500



Obr. 21: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, CF500

Receptura RF500

V následujících dvou tabulkách jsou uvedeny vstupní veličiny (zatěžovací plocha a síla při porušení tělesa) pro výpočet krychelných pevností dle vzorce (1). Dále je uvedena vlhkost a objemová hmotnost vysušených těles vypočtená dle (2) a (3).

Těleso 1				
Plocha [mm ²]	Síla porušení [N]	Pevnost [MPa]	Vlhkost [%]	Obj. hm. vys. tělesa [kg/m ³]
22505,2	24523	1,09	6	450

Tab. 8: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 1. krychle receptury RF500

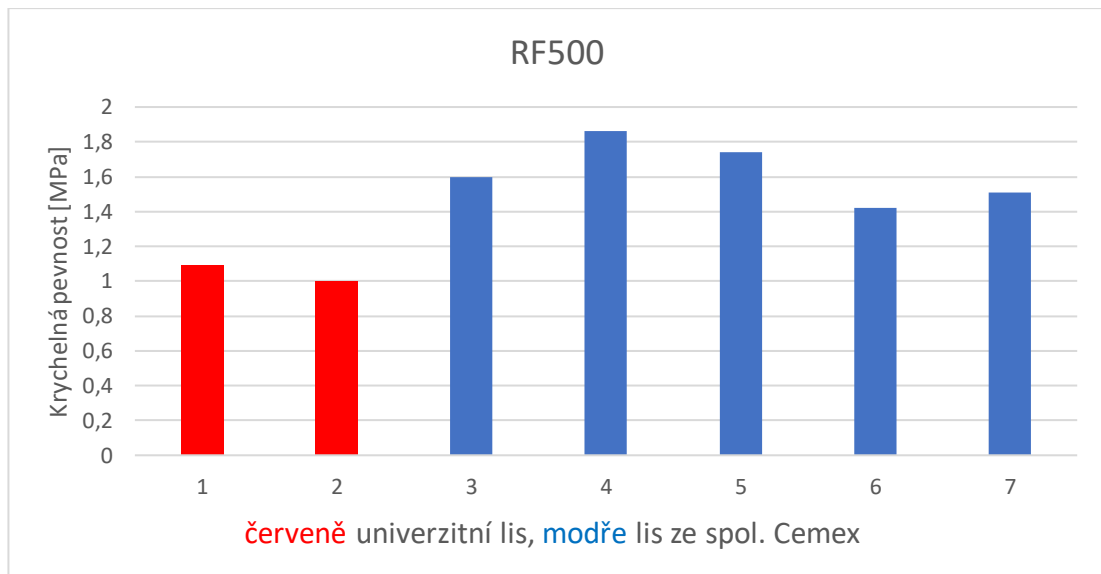
Těleso 1				
Plocha [mm ²]	Síla porušení [N]	Pevnost [MPa]	Vlhkost [%]	Obj. hm. vys. tělesa [kg/m ³]
22547,8	22451	1,00	7	450

Tab. 9: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 2. krychle receptury RF500

V tabulce 10 jsou uvedeny pevnosti na krychlím ze zkušebního lisu ve společnosti Cemex. Zbytková vlhkost těles se pohybovala okolo 10–12 %.

Pevnosti na krychlích (Cemex) [MPa]				
1,60	1,86	1,74	1,42	1,51

Tab. 10: Pevnosti na krychlích ze zkušebního lisu ve společnosti Cemex, CF500



Graf 6: Hodnoty pevností, RF500

Z výsledných hodnot pevností si lze povšimnout, že na univerzitním lisu byla změřena zdatelně nižší pevnost nežli na zkušebním lisu ve společnosti Cemex, a to na obou krychlích. Průměrná krychelná pevnost ze všech hodnot receptury RF500 vychází **1,46 MPa**. Průměrná hodnota z univerzitního lisu 1,05 MPa a z lisu ze společnosti Cemex 1,63 MPa.

Minimální pevnost v tlaku receptury RF500, deklarovaná společností Cemex je 0,5 MPa. Všechny zkoušené krychle odpovídají minimálním deklarovaným pevnostem.



Obr. 22: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF500



Obr. 23: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF500



Obr. 24: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF500

Receptura RF900

V následujících dvou tabulkách jsou uvedeny vstupní veličiny (zatěžovací plocha a síla při porušení tělesa) pro výpočet krychelných pevností dle vzorce (1). Dále je uvedena vlhkost a objemová hmotnost vysušených těles vypočtená dle (2) a (3).

Těleso 1					
Plocha [mm ²]	Síla [N]	porušení	Pevnost [MPa]	Vlhkost [%]	Obj. hm. vys. tělesa [kg/m ³]
22716,1	36397		1,60	6	845

Tab. 11: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 1. krychle receptury RF900

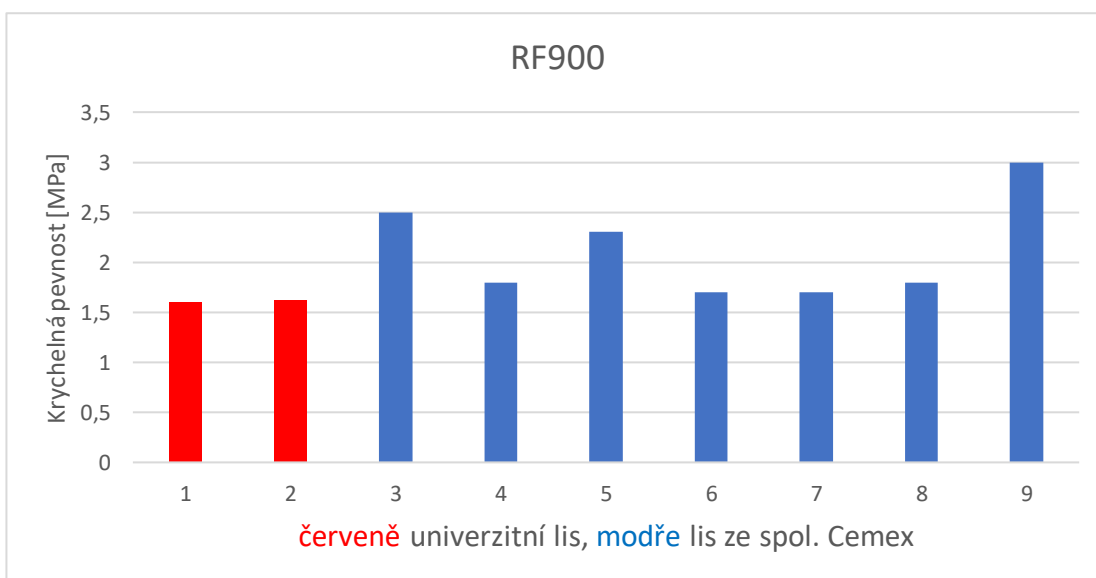
Těleso 1				
Plocha [mm ²]	Síla porušení [N]	Pevnost [MPa]	Vlhkost [%]	Obj. hm. vys. tělesa [kg/m ³]
22491,0	36391	1,62	5	855

Tab. 12: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 2. krychle receptury RF900

V tabulce 13 jsou uvedeny pevnosti na krychlím ze zkušebního lisu ve společnosti Cemex. Zbytková vlhkost těles se pohybovala okolo 9–12 %.

Pevnosti na krychlích (Cemex) [MPa]						
2,50	1,80	2,30	1,70	1,70	1,80	3,00

Tab. 13: Pevnosti na krychlích ze zkušebního lisu ve společnosti Cemex, RF900



Graf 7: Hodnoty pevností, RF900

Výsledné hodnoty pevnosti obou lisů se nijak výrazně neliší. Průměrná krychelná pevnost ze všech hodnot receptury RF900 vychází **2,00 MPa**.

Minimální pevnost v tlaku receptury RF500, deklarovaná společností Cemex je 1,5 MPa. Všechny zkoušené krychle odpovídají minimálním deklarovaným pevnostem.



Obr. 25: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF900



Obr. 26: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF900



Obr. 27: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF900



Obr. 28: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, RF900

Receptura CF500+plast

V následujících dvou tabulkách jsou uvedeny vstupní veličiny (zatěžovací plocha a síla při porušení tělesa) pro výpočet krychelných pevností dle vzorce (1). Dále je uvedena vlhkost a objemová hmotnost vysušených těles vypočtená dle (2) a (3).

Těleso 1				
Plocha [mm ²]	Síla porušení [N]	Pevnost [MPa]	Vlhkost [%]	Obj. hm. vys. tělesa [kg/m ³]
22339,2	34228	1,53	5	475

Tab. 14: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 1. krychle receptury CF500

Těleso 1				
Plocha [mm ²]	Síla porušení [N]	Pevnost [MPa]	Vlhkost [%]	Obj. hm. vys. tělesa [kg/m ³]
22540,3	30351	1,35	6	470

Tab. 15: Vypočítaná pevnost, vlhkost a objemová hmotnost vysušeného tělesa, 2. krychle receptury CF500

U této receptury byla tělesa zkoušena pouze na univerzitním lisu v počtu dvou krychlí. Průměrná krychelná pevnost ze všech hodnot receptury CF500+plast vychází **1,44Pa**.

Jelikož se jedná o recepturu, kterou společnost Cemex ve své nabídce nenabízí a jedná se pouze o experimentální použití plastifikátoru pro jednu z receptur, není pro tuto recepturu deklarovaná minimální pevnost. Výsledný průměrná pevnost receptury CF500 a CF500+plast se neliší. Plastifikátor nemá na tuto recepturu žádný vliv na pevnost v tlaku.



Obr. 29: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, CF500+plast



Obr. 30: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, CF500+plast



Obr. 31: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, CF500+plast



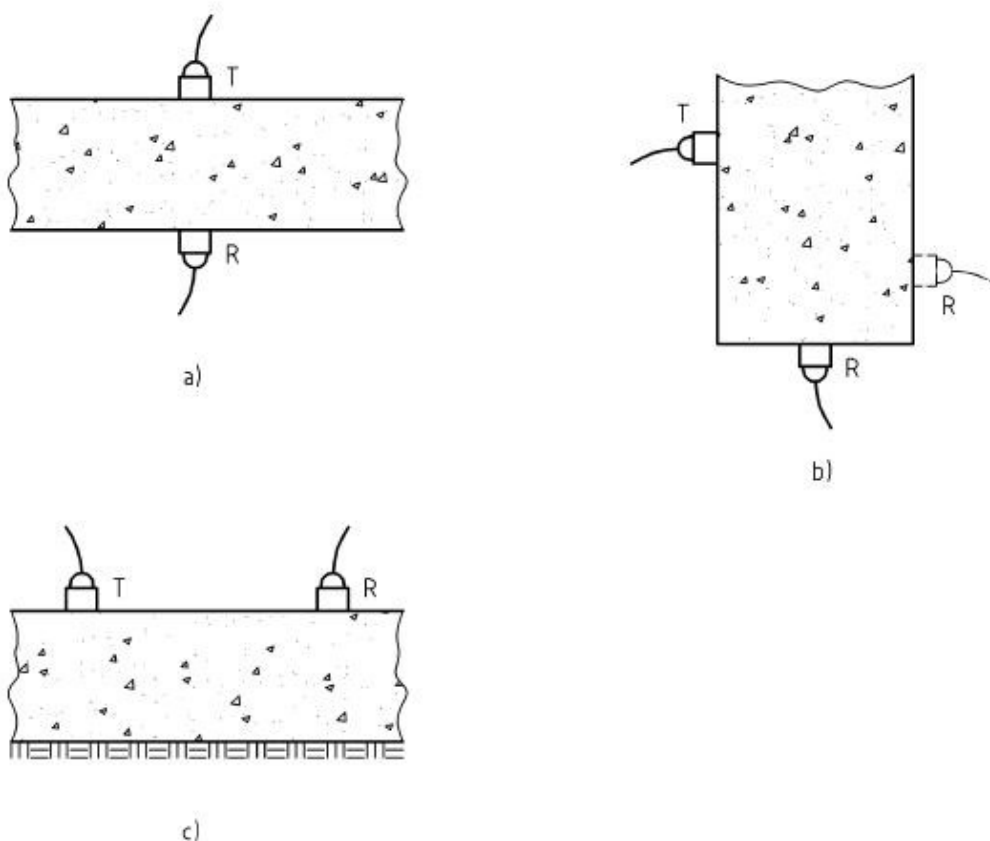
Obr. 32: Porušené krychle po pevnostní zkoušce, CF500+plast

3. Dynamický modul pružnosti pěnobetonu

Měření je závislé na uspořádání budiče a snímače. Rozeznáváme tři základní uspořádání [33]:

- a) Přímé uspořádání, budič a snímač jsou umístěny proti sobě na protilehlých stranách tělesa
- b) Polopřímé uspořádání, budič a snímač jsou umístěny na protilehlých stranách, ale nejsou přímo proti sobě, nebo jsou umístěny na sousedních stranách
- c) Nepřímé uspořádání, budič a snímač jsou umístěny na jedné straně

Jelikož měření na pěnobetonových deskách není nijak omezeno, bude použito přímé uspořádání. Při použití ostatních uspořádání se zmenší citlivost měření a vznikají chyby měření, proto je přímá metoda nejvhodnější.



Obr. 33: a) přímá metoda, b) polopřímá metoda, c) nepřímá metoda [33]

3.1 Zařízení k měření potřebných veličin

Potřebné veličiny ke stanovení dynamického modulu:

- Délka měřicí základny a rozměry tělesa
- Čas průchodu ultrazvukového impulzu
- Teplota betonu

Délka měřicí základny

Délka měřicí základny pro přímou metodu je určena jako nejkratší vzdálenost dotykových ploch budiče a snímače. Měření základny probíhalo pomocí posuvného měřidla.

Čas průchodu ultrazvukového impulzu

K měření času průchodu impulzu bylo použito zařízení PULSONIC Ultrasonic Pulse Analyser 58–E4900. Přístroj odpovídá standardům normy [31]. Přístroj umožňuje nastavení zesílení signálu (0, 6, 14, 20, 26, 34, 40 dB). Budič a snímač byly použity o frekvenci 50kHz. Kvůli pórům nebylo možné použít kapalnou akustickou vazbu. Na doporučení byla zvolena akustická vazba ve formě plastické hmoty.



Obr. 34: PULSONIC Ultrasonic Pulse Analyser 58–E4900

Teplota betonu

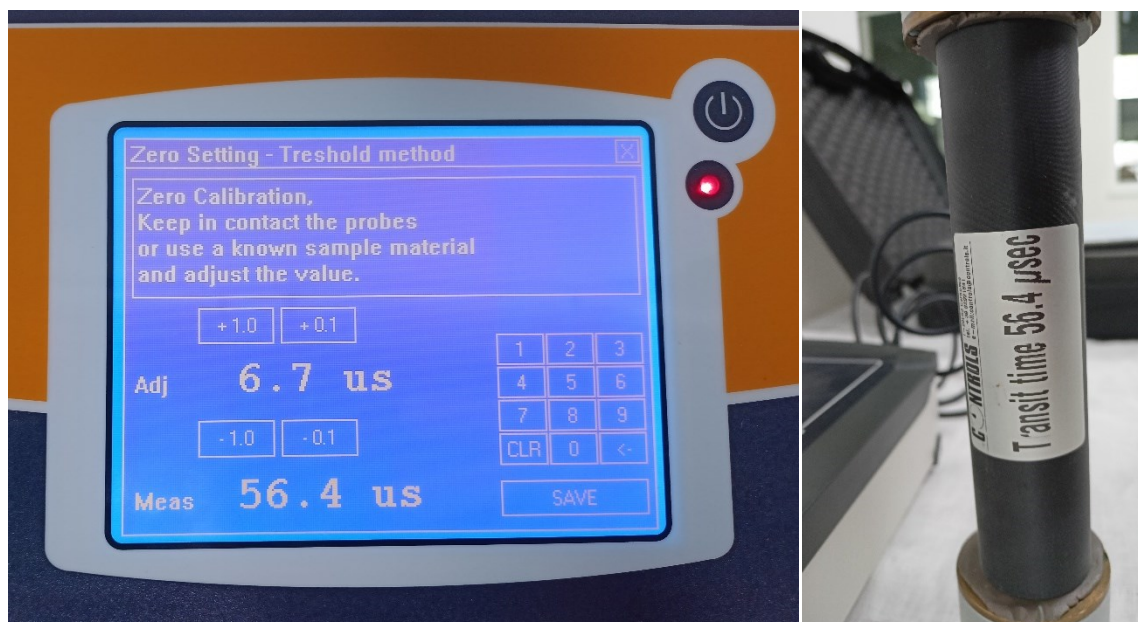
Teplota pěnobetonových těles byla měřena bezkontaktním infračerveným teploměrem Voltcraft IR 120–50D (více viz kap.2.3.1.3).

3.2 Průběh zkoušky pro stanovení dynamického modulu pružnosti

Normy [31] a [33] neurčují požadavek pro stav vysušení tělesa. Zkouška pro stanovení dynamického modulu pružnosti probíhala na volně vyschlých tělesech (zkouška v laboratorním stavu). Tělesa se před zkouškou uchovávala v prostředí s teplotou okolního vzduchu 20 ± 2 °C a relativní vlhkostí 50 ± 5 %.

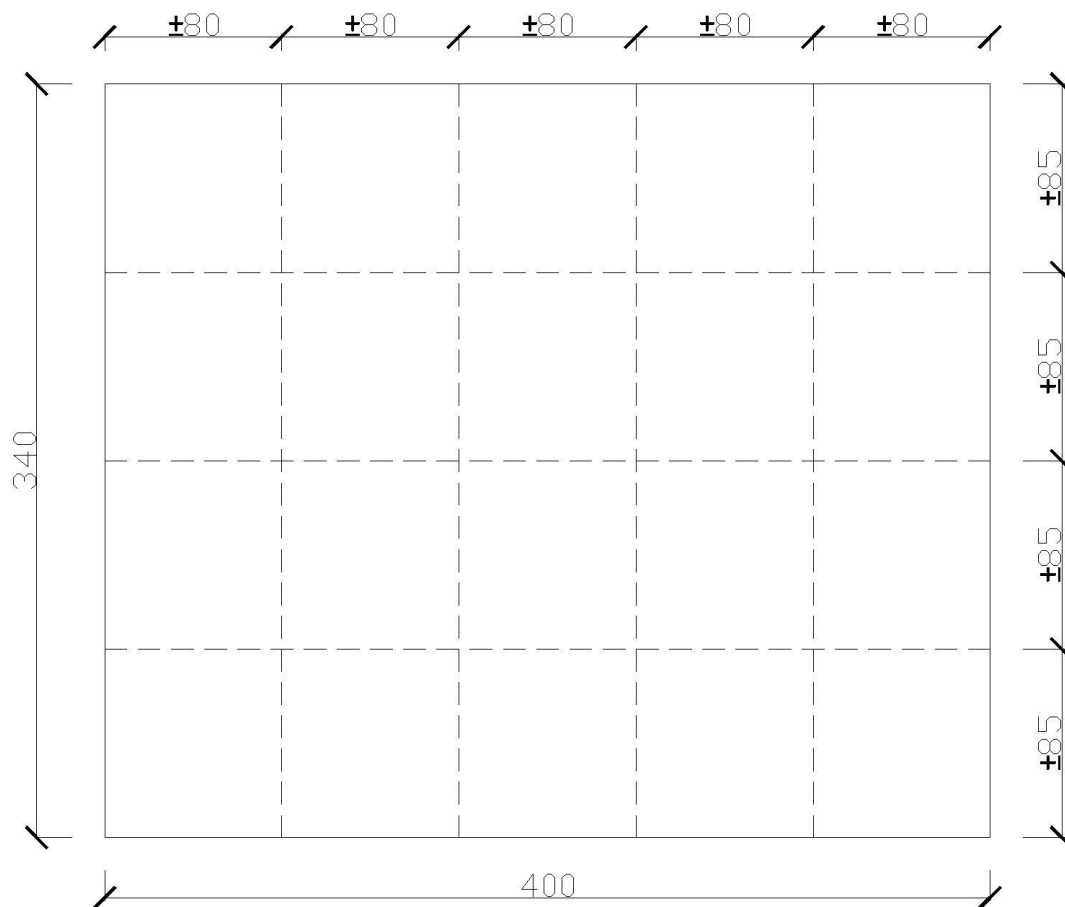
Před měřením byla zkontrolována teplota pěnobetonových vzorků. Norma [33] stanovuje podmínku měření, kdy pro měření průchodu ultrazvukového impulzu je zapotřebí teplota tělesa v rozmezí 10 až 30 °C. Pokud by teploty tělesa byly mimo rozmezí, musí se použít opravný součinitel. Avšak opravný součinitel se získává experimentálně pro použitý přístroj a daná beton.

Po spuštění samotného ultrazvukového přístroje bylo nutné zkontrolovat kalibraci. Kalibrace probíhala dle návodu výrobce pomocí přiloženého etalonu. Čas průchodu impulzu skrze etalon by měl být 56,4 μ s.



Obr. 35: Kalibrace ultrazvukového přístroje

Po kalibraci mohlo přijít na řadu samotné měření. Měření probíhalo na dvojici desek o nominálních rozměrech 340x400x100 mm, použity byly 4 receptury (CF300, CF500, RF500, RF900). Základny byly zvoleny v délkách 340 a 400 mm. Na základnách 340 mm byly zvoleny 4 měření. Na základnách 400 mm byly zvoleny 3 měření viz obrázek 36. Na každé desce tedy bylo dohromady 7 měření a pro jednu recepturu pěnobetonu bylo ve výsledku 14 měření. Zaznamenával se čas průchodu impulzu v [μ s] a délka odpovídající základny.



Obr. 36: Měřicí základny

Na konci měření byla tělesa zvážena a byly změřeny rozměry těles pro výpočet objemové hmotnosti volně vyschlých těles.

3.3 Výpočet dynamického modulu pružnosti

Pro výpočet dynamického modulu pružnosti je nejprve potřeba vypočítat rychlost šíření impulzu, který je dán vzorcem dle normy [33]:

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (1)$$

- kde v_L rychlost impulzu, v km/s
 L délka měřicí základny, v mm
 T čas průchodu impulzu pěnobetonovým tělesem

Pro samotný výpočet dynamického modulu pružnosti se použije vzorec dle normy [33] se zohledněním na rozměrnost prostředí:

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

- kde E_{cu} hodnota dynamického modulu, v MPa
 ρ objemová hmotnost betonu v kg/m³
 v_L rychlost šíření impulzu (viz vzorec (1)), v km/s
 k součinitel rozměrnosti prostředí

Součinitel rozměrnosti prostředí se vypočítá dle normy [33] podle následujícího vzorce:

$$k_2 = \sqrt{\frac{1}{1 - \nu_{cu}}}; k_3 = \sqrt{\frac{1 - \nu_{cu}}{(1 + \nu_{cu}) * (1 - 2 * \nu_{cu})}} \quad (3)$$

- kde k_3 hodnota součinitele pro trojrozměrné prostředí
 k_2 hodnota součinitele pro dvojrozměrné prostředí
 ν_{cu} Poissonův koeficient

Vlnová délka, potřebná pro zjištění rozměrnosti prostředí, se vypočítá podle vzorce:

$$\lambda = \frac{v_L}{f} \quad (4)$$

kde λ vlnová délka, v m

v_L rychlost šíření impulsu (viz vzorec (1)), v km/s

f pracovní kmitočet budiče, v kHz

3.4 Vyhodnocení výsledků součinitelů tepelné vodivosti

Receptura CF300

V následujících tabulkách jsou vypsány naměřené hodnoty na obou deskách (délky základny a čas průchodu impulsu). Z těchto hodnot byly vypočítány rychlosti šíření dle vzorců (1) a (4).

	Délka základny L [mm]	Čas průchodu impulzu T [μ s]	Rychlost šíření impulzu v_L [m/s]	Vlnová délka λ [mm]
I	390,0	609,8	639,554	12,8
II	389,8	606,6	642,598	12,9
III	389,95	656,6	593,893	11,9
IV	324,8	572,6	567,327	11,3
V	324,9	546,3	594,728	11,9
VI	325,1	456,4	712,314	14,2
VII	325,0	543,3	598,196	12,0

Tab. 16: Vypočtené rychlosti šíření impulsu a vlnové délky, 1. deska receptury CF300

	Délka základny L [mm]	Čas průchodu impulzu T [μ s]	Rychlost šíření impulzu v_L [m/s]	Vlnová délka λ [mm]
I	389,4	603,3	645,450	12,9
II	389,7	602,2	647,127	12,9
III	389,6	591,4	658,776	13,2
IV	325,2	614,0	529,642	10,6
V	324,8	536,3	605,631	12,1
VI	324,9	505,2	643,112	12,9
VII	325,0	549,6	591,339	11,8

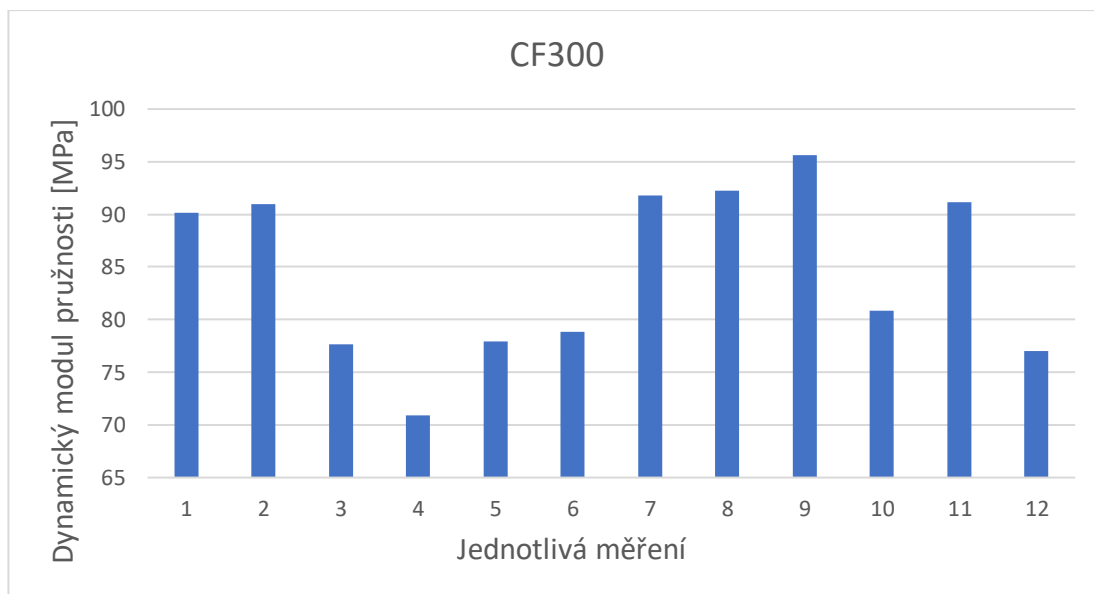
Tab. 17: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 2. deska receptury CF300

Po výpočtu vlnové délky bylo přistoupeno k určení rozměrnosti tělesa. Trojrozměrné prostředí je pro desku charakteristické, když tloušťka desky je větší než $0,2\lambda$. V tomto případě je průměrná tloušťka 1. desky 83,0 mm a 2. desky 83,5 mm. Pro všechny vypočítané vlnové délky platí, že tloušťka je větší než $0,2\lambda$, obě desky jsou trojrozměrné.

V následující tabulce jsou zaznamenány vypočtené hodnoty dynamických modulů pružnosti obou desek.

	Dynamický modul pružnosti 1. desky [MPa]	Dynamický modul pružnosti 2. desky [MPa]
I	90,1	91,8
II	91,0	92,2
III	77,7	95,6
IV	70,9	61,8
V	77,9	80,8
VI	111,8	91,1
VII	78,8	77,0

Tab. 18: Vypočítané dynamické moduly pružnosti, CF300



Graf 8: Výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti po vyřazení nevyhovujících hodnot, CF300

Z výsledných hodnot byly vyřazeny hodnoty 61,8 a 111,8 MPa, jelikož se výrazně lišili od ostatních hodnot. Ze statistického vzorku byla vypočítána průměrná hodnota dynamického modulu pružnosti **84,6 MPa** a směrodatná odchylka 7,8 MPa. Ze statistického vzorku byl na závěr spočítán medián, který vyšel 85,5 MPa, pro ověření výsledné hodnoty.

Receptura CF500

V následujících tabulkách jsou vypsány naměřené hodnoty na obou deskách. Z těchto hodnot byly vypočítány rychlosti šíření dle vzorců (1) a (4).

	Délka základny L [mm]	Čas průchodu impulzu T [μs]	Rychlost šíření impulzu v_L [m/s]	Vlnová délka λ [mm]
I	389,3	494,4	787,4	15,7
II	389,0	481	808,7	16,2
III	389,2	454,5	856,3	17,1
IV	326,7	333,1	980,8	19,6
V	326,3	353,4	923,3	18,5
VI	326,5	349,0	935,5	18,7
VII	326,4	356,5	915,6	18,3

Tab. 19: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 1. deska receptury CF500

	Délka základny L [mm]	Čas průchodu impulzu T [μ s]	Rychlost šíření impulzu v_L [m/s]	Vlnová délka λ [mm]
I	389,1	440,3	883,7	17,7
II	389,6	441,5	882,4	17,6
III	389,4	507,5	767,3	15,3
IV	326,7	377,7	865,0	17,3
V	326,9	358,6	911,6	18,2
VI	326,8	351,7	929,2	18,6
VII	326,6	353,7	923,4	18,5

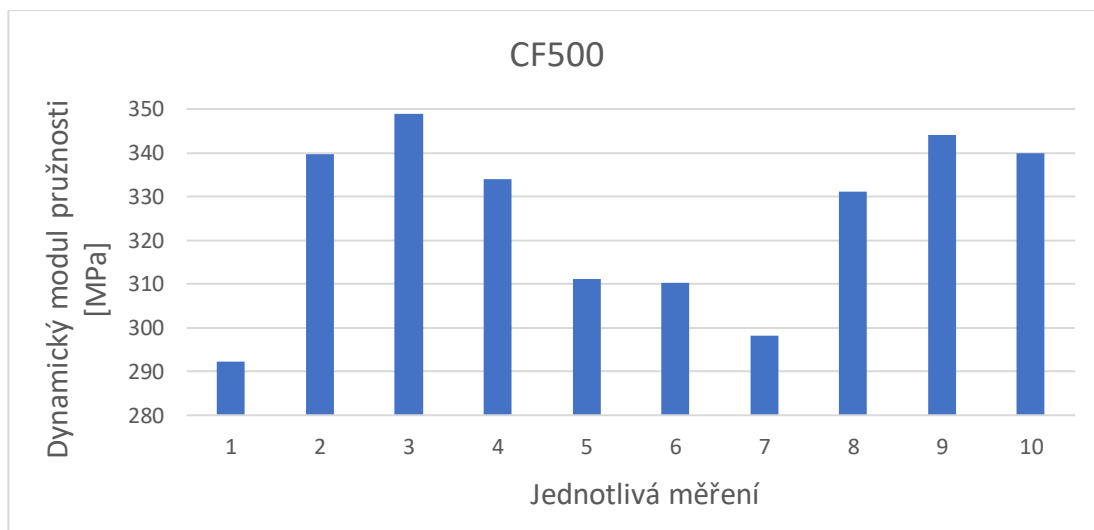
Tab. 20: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 2. deska receptury CF500

Z vlnové délky byla zjištěna rozměrnost prostředí, viz receptura CF300. V případě receptury CF500 je průměrná tloušťka 1. desky 96,4 mm a 2. desky 96,2 mm. Pro všechny vypočítané vlnové délky platí, že tloušťka je větší než $0,2\lambda$, obě desky jsou trojrozměrné.

V následující tabulce jsou zaznamenány vypočtené hodnoty dynamických modulů pružnosti obou desek.

	Dynamický modul pružnosti 1. desky [MPa]	Dynamický modul pružnosti 2. desky [MPa]
I	247,1	311,2
II	260,7	310,3
III	292,2	234,6
IV	383,4	298,2
V	339,8	331,2
VI	348,8	344,1
VII	334,1	339,8

Tab. 21: Vypočítané dynamické moduly pružnosti, CF500



Graf 9: Výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti po vyřazení nevyhovujících hodnot, CF500

Z výsledných hodnot byly vyřazeny hodnoty 247,1, 260,7, 383,4 a 234,6 MPa, jelikož se výrazně lišili od ostatních hodnot. Ze statistického vzorku byla vypočítána průměrná hodnota dynamického modulu pružnosti **325,0 MPa** a směrodatná odchylka 19,2 MPa. Vzhledem k vyšší směrodatné odchylce a množství vyřazených hodnot byl vypočítán medián, který vyšel 332,6 MPa. Medián se výrazně neliší od průměru.

Receptura RF500

V následujících tabulkách jsou vypsány naměřené hodnoty na obou deskách. Z těchto hodnot byly vypočítány rychlosti šíření dle vzorců (1) a (4).

	Délka základny L [mm]	Čas průchodu impulzu T [μs]	Rychlost šíření impulzu v_L [m/s]	Vlnová délka λ [mm]
I	389,7	505,5	770,9	15,4
II	389,5	506,7	768,7	15,4
III	389,6	517,7	752,6	15,1
IV	326,3	391,1	834,3	16,7
V	326,7	388	842,0	16,8
VI	326,4	398,7	818,7	16,4
VII	326,6	394,5	827,9	16,6

Tab. 22: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 1. deska receptury RF500

	Délka základny L [mm]	Čas průchodu impulzu T [μ s]	Rychlost šíření impulzu v_L [m/s]	Vlnová délka λ [mm]
I	389,0	494,8	788,1	15,8
II	389,2	489,9	794,4	15,9
III	389,6	506,4	769,4	15,4
IV	326,7	366,9	890,3	17,8
V	326,2	378,1	862,6	17,3
VI	326,6	374,6	871,9	17,4
VII	326,2	377,7	863,6	17,3

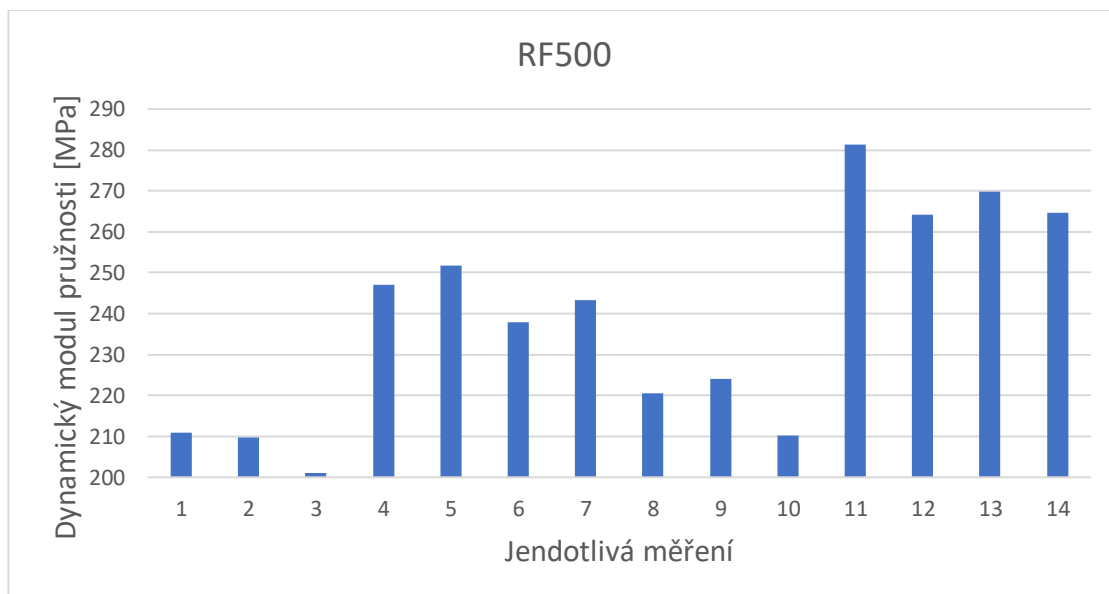
Tab. 23: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 2. deska receptury RF500

Z vlnové délky byla zjištěna rozměrnost prostředí, viz receptura CF300. V případě receptury RF500 je průměrná tloušťka 1. desky 94,3 mm a 2. desky 94,6 mm. Pro všechny vypočítané vlnové délky platí, že tloušťka je větší než $0,2\lambda$, obě desky jsou trojrozměrné.

V následující tabulce jsou zaznamenány vypočtené hodnoty dynamických modulů pružnosti obou desek.

	Dynamický modul pružnosti 1. desky [MPa]	Dynamický modul pružnosti 2. desky [MPa]
I	211,0	220,5
II	209,7	224,0
III	201,0	210,1
IV	247,1	281,3
V	251,6	264,1
VI	237,9	269,8
VII	243,3	264,7

Tab. 24: Vypočítané dynamické moduly pružnosti, RF500



Graf 10: Výsledné hodnoty dynamických modulů, RF500

Z výsledných hodnot je patrné, že rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou je vysoký. Avšak ze statistického vzorku nelze vyřadit žádnou hodnotu, jelikož nízkých a vysokých hodnot je více. Ze statistického vzorku byla vypočítána průměrná hodnota dynamického modulu pružnosti **238,3 MPa** a směrodatná odchylka 25,0 MPa. Kvůli zmíněnému znatelnému rozptylu hodnot byl vypočítán i medián 240,6 MPa. Průměrná hodnota se od mediánu téměř neliší, výsledný průměr bude považován za platný výsledek, avšak zatížený větší mírou nejistoty.

Receptura RF900

V následujících tabulkách jsou vypsány naměřené hodnoty na obou deskách. Z těchto hodnot byly vypočítány rychlosti šíření dle vzorců (1) a (4).

	Délka základny L [mm]	Čas průchodu impulzu T [μ s]	Rychlost šíření impulzu v_L [m/s]	Vlnová délka λ [mm]
I	391,0	236,6	1652,6	33,1
II	391,1	235,5	1660,7	33,2
III	389,9	342,2	1139,4	22,8
IV	325,7	200,5	1624,4	32,5
V	326,0	203,7	1600,4	32,0
VI	326,1	199,7	1632,9	32,7
VII	325,7	197,3	1650,8	33,0

Tab. 25: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 1. deska receptury RF900

	Délka základny L [mm]	Čas průchodu impulzu T [μ s]	Rychlost šíření impulzu v_L [m/s]	Vlnová délka λ [mm]
I	389,9	235,8	1653,5	33,1
II	389,9	234,5	1662,7	33,3
III	390,1	255,5	1526,8	30,5
IV	325,8	200,6	1624,1	32,5
V	325,9	195,5	1667,0	33,3
VI	325,8	193,1	1687,2	33,7
VII	326,1	201,5	1618,4	32,4

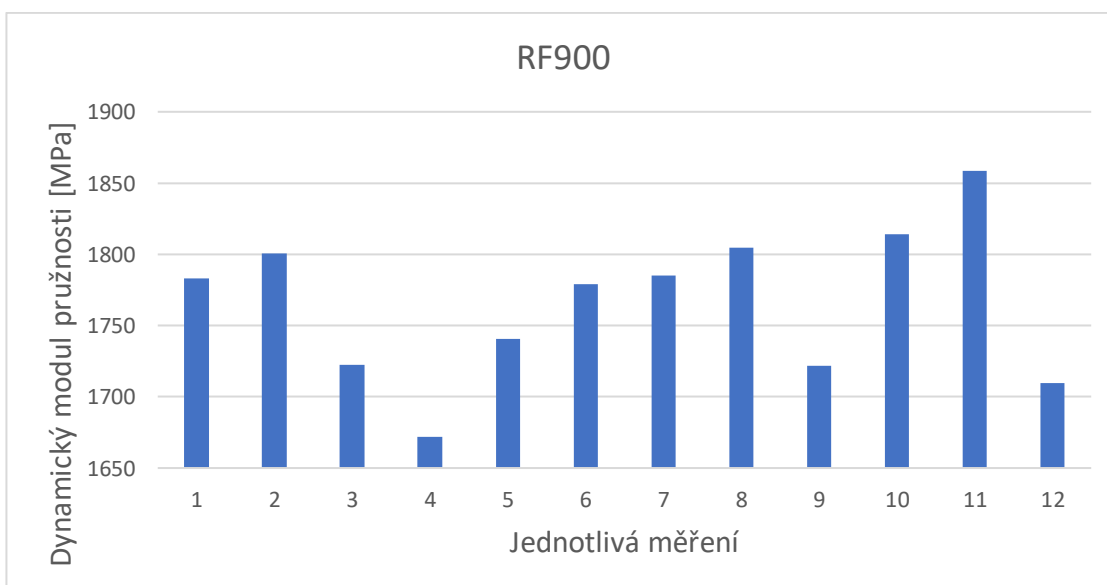
Tab. 26: Vypočtené rychlosti šíření impulzu a vlnové délky, 2. deska receptury RF900

Z vlnové délky byla zjištěna rozměrnost prostředí, viz receptura CF300. V případě receptury RF900 je průměrná tloušťka 1. desky 95,4 mm a 2. desky 95,7 mm. Pro všechny vypočítané vlnové délky platí, že tloušťka je větší než $0,2\lambda$, obě desky jsou trojrozměrné.

V následující tabulce jsou zaznamenány vypočtené hodnoty dynamických modulů pružnosti obou desek.

	Dynamický modul pružnosti 1. desky [MPa]	Dynamický modul pružnosti 2. desky [MPa]
I	1782,8	1784,8
II	1800,4	1804,7
III	847,5	1521,8
IV	1722,6	1721,9
V	1672,0	1814,1
VI	1740,7	1858,3
VII	1778,9	1709,7

Tab. 27: Vypočítané dynamické moduly pružnosti, RF900



Graf 11: Výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti po vyřazení nevyhovujících hodnot, RF900

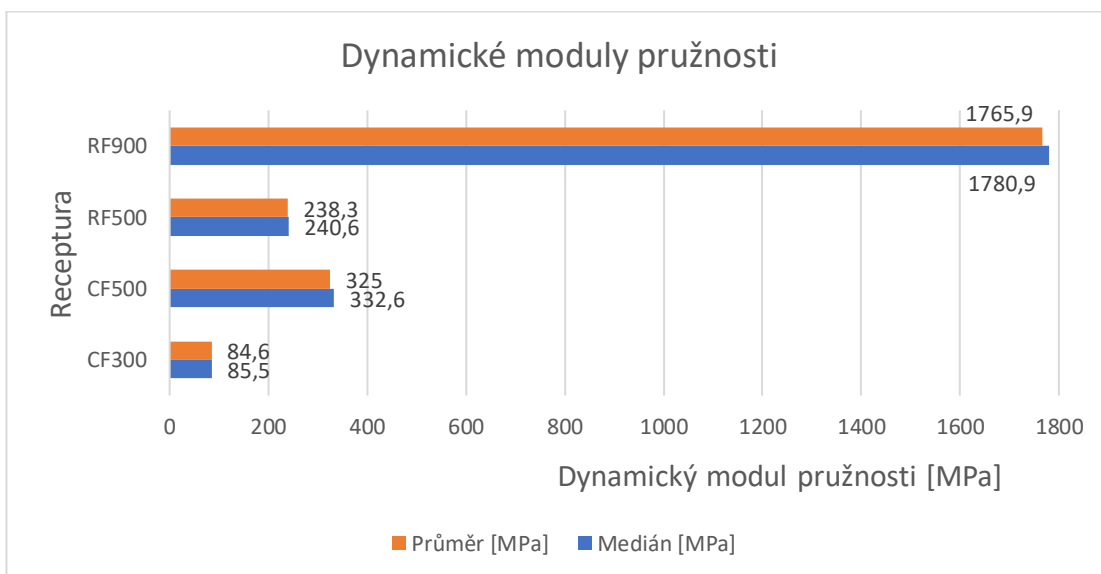
Z výsledných hodnot byly vyřazeny 2 hodnoty 847,5 a 1521,8, jelikož se výrazně lišili od ostatních hodnot. Ze statistického vzorku byla vypočítána průměrná hodnota dynamického modulu pružnosti **1765,9 MPa** a směrodatná odchylka 52,9 MPa. Kvůli vyšší směrodatné odchylce oproti ostatním recepturám byl vypočítán medián, který vyšel 1780,9 MPa. Oproti ostatním recepturám se průměr liší od mediánu nejvíce, avšak procentuální rozdíl hodnot není vysoký. Výsledný průměr je považován za platný výsledek.

V závěrečné tabulce 28 jsou shrnuty výsledky dynamických modulů pružnosti jednotlivých receptur. Ke každé receptuře jsou v tabulce uvedeny průměrné hodnoty, mediány a směrodatné odchylky.

	CF300	CF500	RF500	RF900
Směr. odch. [MPa]	7,8	19,2	25,0	52,9
Medián [MPa]	85,5	332,6	240,6	1780,9
Průměr [MPa]	84,6	325,0	238,3	1765,9
Rozdíl	1,06 %	2,34 %	0,96 %	0,85 %

Tab. 28: Výsledné hodnoty jednotlivých receptur

V grafu 12 jsou uvedeny jednotlivé receptury a jejich dynamické moduly pružnosti jako průměry a mediány.



Graf 12: Výsledné hodnoty dynamických modulů pružnosti

4. Součinitel tepelné vodivosti pěnobetonu

4.1 Výroba měřicího zařízení

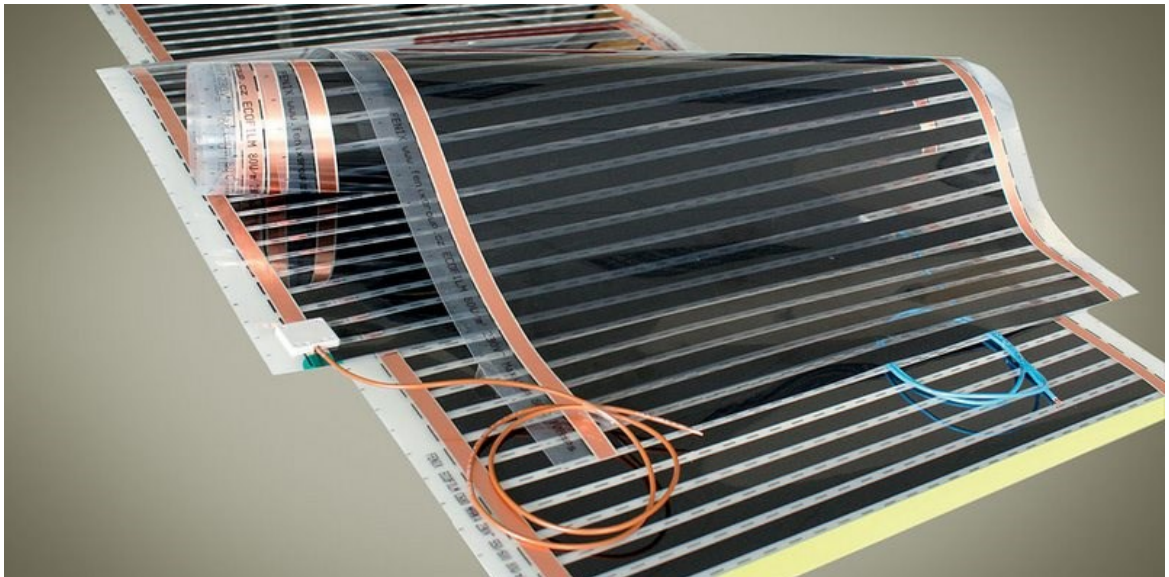
Na základě normy [28] bylo potřeba vyrobit měřicí zařízení pro dosažení ustáleného tepelného toku a následného měření daných veličin v určených intervalech. Pro tento experiment byla vybrána dvojjzorková metoda, která má oproti jednovzorkové metodě jisté výhody (viz kap. 1.7.3) pro měření s pěnobetonovými deskami.

4.1.1 Měrná tepelná deska

Základem zařízení je měrná tepelná deska, pomocí které se bude dosahovat zmíněného ustáleného tepelného stavu. Při výběru vhodné měrné desky bylo třeba si uvědomit kritéria, která jsou pro měření důležitá. Nejdůležitějším kritériem bylo zvolení dostatečně výkonné topné desky. Mohla by nastat situace, že by se teplo z měrné desky nedostalo až na chladný povrch pěnobetonové desky a nebylo by možné pokračovat v měření. Je také zapotřebí, aby bylo možné desku upravit či sestrojít o stejných rozměrech (plochách), jako jsou samotné pěnobetonové desky, 340x400 mm. V úvahu přicházeli tři varianty této měrné desky.

Varianty měrné tepelné desky

První variantou zamýšlenou variantou bylo využití **topné fólie**, která se používá pro podlahové topení. Výhodou byla variabilní velikost, tedy by bylo snadné fólii upravit pro rozměry desek. Avšak nevýhodou je menší výkon, který se u těchto fólií pohybuje v rozmezí od 40 do 80 W/m², což při přepočtení na plochu betonových desek vychází na nejvyšší výkon 10,88 W. Nevýhodou je nízká limitní teplota, které fólie může dosáhnout.



Obr. 37: Topná fólie [23]

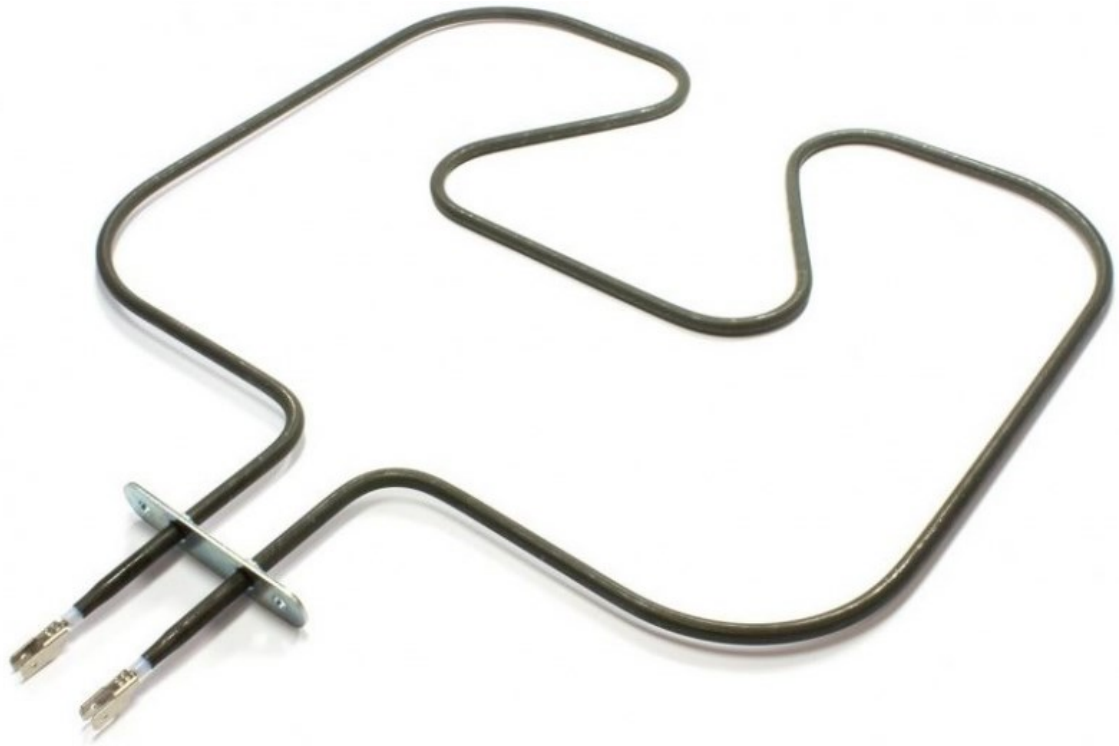
Ve druhé variantě je uvažováno **topné těleso**, využívané ve sporácích, vařičích, či troubách. Tělesa mají velké příkony, je tedy málo pravděpodobné, že by se pěnobetonové desky neprohřály. Nevýhodou je nemožnost přizpůsobení rozměrů tělesa. Rozměry jsou už předem dány výrobcem, avšak na trhu lze nalézt nepřeberné množství těchto těles o různých rozměrech. Jedná se o nevýhodu, kterou lze relativně snadno vyřešit.

Poslední uvažovanou variantou byla zahřívání pomocí **nuceného vodního oběhu**. Díky vodě lze snadno udržovat konstantní teploty a určit si přesné rozměry měrné desky. Velkou nevýhodou je složitost celého oběhu a s tím související cena.

Z nedostatečných tepelně-výkonných důvodů nebyla první varianta zvolena, nemuselo by dojít k prohřátí betonových desek. Třetí varianta nebyla zvolena z důvodu náročnosti sestavení nuceného vodního oběhu. Pro zahřívání betonových desek byla zvolena druhá varianta z důvodu dostatečného výkonu, ceně a možnosti zvolení vhodných rozměrů.

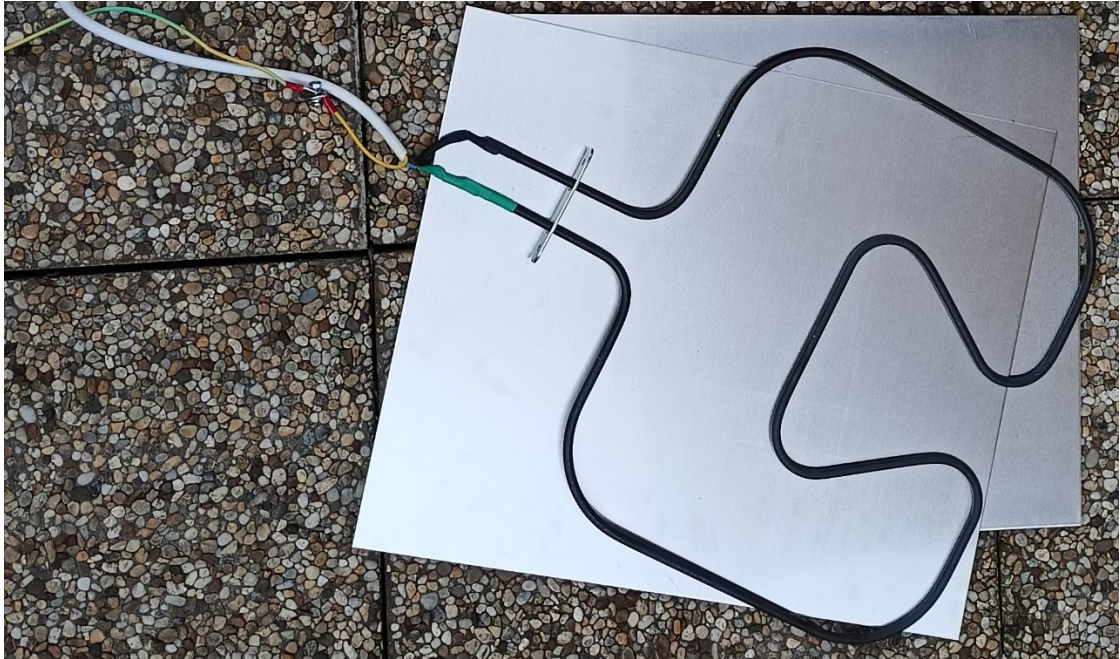
Výroba měrné tepelné desky

Po zvolení vhodné varianty přišlo na řadu konkrétní řešení měrné tepelné desky. V prvé řadě bylo nutné zvolit topné těleso, výběr probíhal dle rozměrů samotných těles. Rozměry byly zvoleny menší, než je pěnobetonová deska. Učinilo se tak na základě vlastností samotného tělesa, jelikož se jedná o topné těleso do trouby, které se dokáže během krátkého časového úseku ohřát na vysoké teploty. Mohlo by dojít k narušení tepelné izolace zařízení kvůli vysokým teplotám. Výsledné rozhodnutí připadlo pro topné těleso do trouby (Zanussi, Electrolux) o příkonu 1000 W a rozměrech 350x280 mm.



Obr. 38: Topné těleso [24]

Použití topného tělesa do trouby přináší další dva problémy. Jeden z problémů byl již zmíněn, a to možné vysoké teploty tohoto tělesa, které dokážou degradovat jak tepelnou izolaci, tak i samotné pěnobetonové desky. Topné těleso nelze použít v kontaktu s betonovými deskami. Druhý problém nastal vzhledem ke konstrukci topného tělesa, které není provedeno pro plošné zahřívání. Mohlo by docházet k nerovnoměrnému zahřívání. Oba problémy vyřeší přidání dvou tepelně vodivých plechů. Z tepelně vodivých materiálů připadaly v úvahu měď a hliník. Měď má lepší tepelně vodivostní charakteristiky oproti hliníku. Součinitel tepelné vodivosti mědi činí přibližně $390 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a hliníku $230 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Avšak měděné plechy jsou zřetelně dražší nežli ty hliníkové. Nakonec byly zvoleny dva hliníkové plechy o rozměrech $400 \times 340 \times 2 \text{ mm}$.



Obr. 39: Nařezané hliníkové plechy s topným tělesem

Jelikož samotné topné těleso nedisponuje žádnou regulací, bylo třeba vymyslet řešení pro udržení stálé teploty hliníkových plechů, které budou následně ohřívat betonové desky. Efektivním a jednoduchým řešením je přidání termostatu do elektrického obvodu. Pro tento účel byl použit zásuvkový termostat KT3100. Teplotní čidlo termostatu bylo připevněno k jedné z hliníkových desek. Samotný termostat ovládal připojení topného tělesa k elektrickému zdroji.

Hliníkové plechy a topné těleso byly spojeny šroubovými spoji pomocí tenkých hliníkových plíšků se závity.

Nyní je měrná tepelná deska připravena k použití. Umožňuje rovnoměrný přenos tepla v dostatečné míře na betonové desky včetně regulace teploty měrné desky.

4.1.2 Tepelná izolace

Samotné měření musí probíhat bez jakýchkoli tepelných ztrát. Všechno teplo vydané měrnou tepelnou deskou musí projít celým betonovým tělesem, aniž by byla tepelná energie ztracena. To znamená, že bylo nutné tepelně zaizolovat nejen těleso, ale i boční plochy pěnobetonových desek.

Tepelná izolace byla realizována pomocí desek z extrudovaného polystyrenu. Extrudovaný polystyren (XPS) disponuje lepšími tepelně izolačními vlastnostmi nežli expandovaný polystyren (EPS), kdy vybrané desky z XPS mají součinitel tepelné

vodivosti $0,033 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Výhodou XPS oproti EPS je také lepší zpracovatelnost, která napomůže při řezání desek na požadované rozměry.

Zakoupené desky z XPS o tloušťce 20 mm byly nařezány na požadované rozměry. Rozměry byly dány dle rozměrů betonových desek a měrné tepelné desky, kde bylo třeba, aby polystyrenové desky doléhaly po obvodu.

Na tyto desky byla zřízena pojistná izolace opět z XPS přilepených pomocí jednosložkové nízkoexpanzní polyuretanové pěny. Samotná pěna disponuje velmi dobrými tepelně izolačními vlastnostmi, součinitel tepelné vodivosti této pěny je $0,035 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Pojistná izolace byla umístěna také mezi boky pěnobetonových desek a XPS, jelikož by nemusely vždy k sobě doléhat a mohlo by docházet k nepříznivým tepelným únikům. Pro tento účel byla zvolena varianta z pěnového polyetylen (XPE), který vyniká svojí tvárností a tepelně izolačními vlastnostmi se součinitelem tepelné vodivosti $0,035 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.



Obr. 40: Pěnový polyetylen (XPE), Polyuretanová pěna, izolační páska

V místech, kde by mohlo dojít k narušení extrudovaného polystyrenu vlivem vysokých teplot od topného tělesa, byl umístěn stínící hliníkový plech. Jedná se plech používající se v automobilovém průmyslu k odstínění tepla od výfukového systému v motorovém prostoru.

Výsledkem jsou dvě vrstvy XPS o celkové tloušťce 40 mm a mezivrstva z polyuretanové pěny o tloušťce přibližně 5 mm včetně tepelné ochrany před tepelnou degradací vlivem topného tělesa. Souvrství by mělo spolehlivě odizolovat boky betonových desek a měrné desky před úniky tepla do okolí.



Obr. 41: Výsledné zařízení osazené pěnobetonovými deskami

4.1.3 Zařízení k měření potřebných veličin

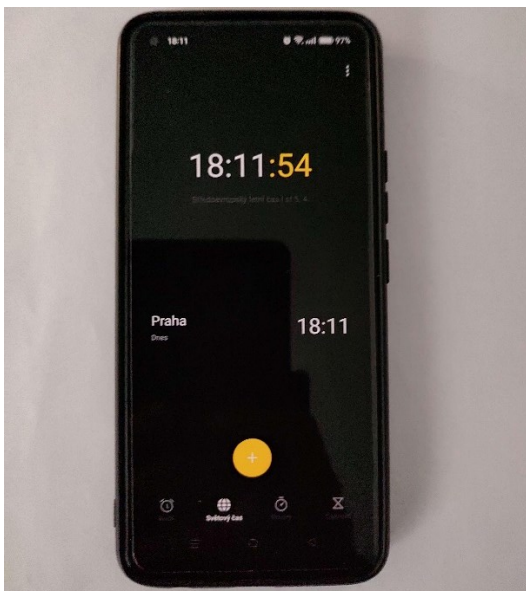
Potřebné veličiny ke stanovení součinitele tepelné vodivosti:

- Délka intervalu mezi jednotlivými měřeními
- Elektrický příkon topného tělesa (měrné tepelné desky)
- Čas, po který bylo topné těleso zapnuto v jednotlivém intervalu
- Teplota teplého povrchu, který se nachází uvnitř zařízení u tepelného tělesa
- Teplota chladného povrchu, který je vystaven okolnímu prostředí

Délka intervalu mezi jednotlivými měřeními

Délku intervalu lze měřit dvěma způsoby. Jedním z nich je měření tohoto intervalu pomocí stopek, kdy dostaneme výsledný čas bez nutnosti dalších přepočtů. Avšak vzhledem k delším intervalům je vhodnější zvolit jiný způsob.

Pro měření délky intervalů byla zvolena metoda, kdy byly zaznamenávány časy počátků jednotlivých intervalů pomocí aplikace v mobilním telefonu, čas se zaznamenával ve formátu HH:MM:SS. Odchyłka tohoto zaznamenávání je ± 1 s. Výsledná délka intervalu se spočítala jako rozdíl dvou po sobě jdoucích časů.



Obr. 42: Mobilní aplikace pro odečítání času

Elektrický příkon topného tělesa (měrné tepelné desky)

Elektrický příkon byl měřen pomocí zásuvkového digitálního měřiče elektrické energie DT26, do kterého bylo zapojeno samotné topné těleso včetně termostatu. Po zapojení samotného termostatu nebyl registrován žádný příkon. Není třeba uvažovat redukci výsledného příkonu v důsledku zapojení termostatu, jelikož má zanedbatelný příkon.



Obr. 43: Wattmetr DT26

Čas zapnutého topného tělesa

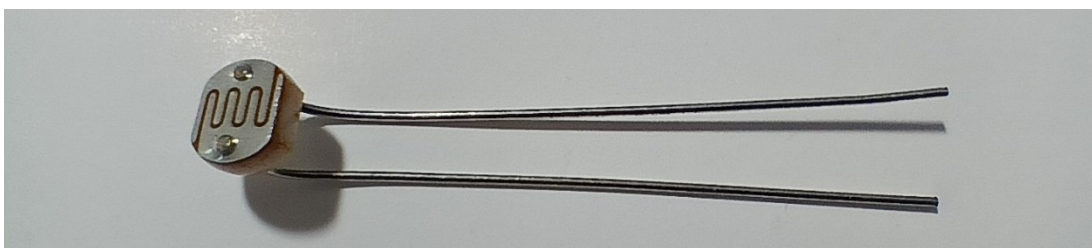
Stejně jako u měření délky intervalu, lze v této metodě využít možnost stopek. Ale jelikož se termostat zapne jen po krátký časový úsek, je odchylka ± 1 s velmi vysoká a mohla by negativně ovlivnit výsledek. Bylo nutné vymyslet jiné řešení.

Bylo by možné sestrojít speciální termostat s touto funkcí na zakázku, avšak výroba takového zařízení by byla časově a finančně náročná.

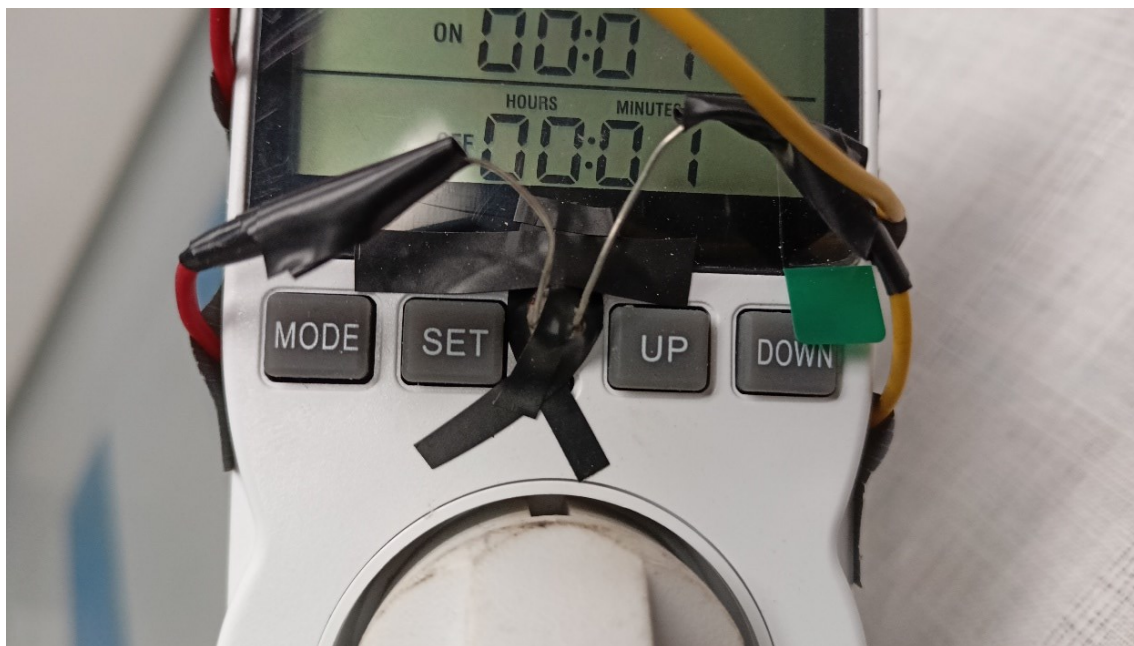
Na použitém termostatu KT3100 se při sepnutí pro nastavené teplotní meze rozsvítí modrá světelná dioda. Dioda zhasne, pokud jsou teplotní podmínky splněny (teplota hliníkových plechů je vyšší než požadovaná mez). Této funkce bylo použito pro sestrojení stopek.

Základem stopek je deskový kontrolér Arduino UNO, do kterého lze nahrát svůj program. Kontrolér disponuje 14 digitálními a 6 analogovými piny. Paměť kontroléru je 32 kB, což není mnoho, ale pro sestrojení stopek se jedná o ideální řešení.

Nejprve bylo třeba najít elektronickou součástku (snímač), která by uměla rozlišit, zda dioda na termostatu svítí, či nikoliv. Snímačů existuje více, ale asi nejjednodušší je fotorezistor. Jedná se o elektronickou součástku, která mění svůj odpor v závislosti na intenzitě světla, které na ni dopadá. Fotorezistor byl nalepen na termostat, aby překryl modrou diodu. Následně byl zastíněn pomocí elektrikářské pásky, aby nedocházelo k ovlivňování odporu fotorezistoru okolním světlem.



Obr. 44: Použitý fotorezistor

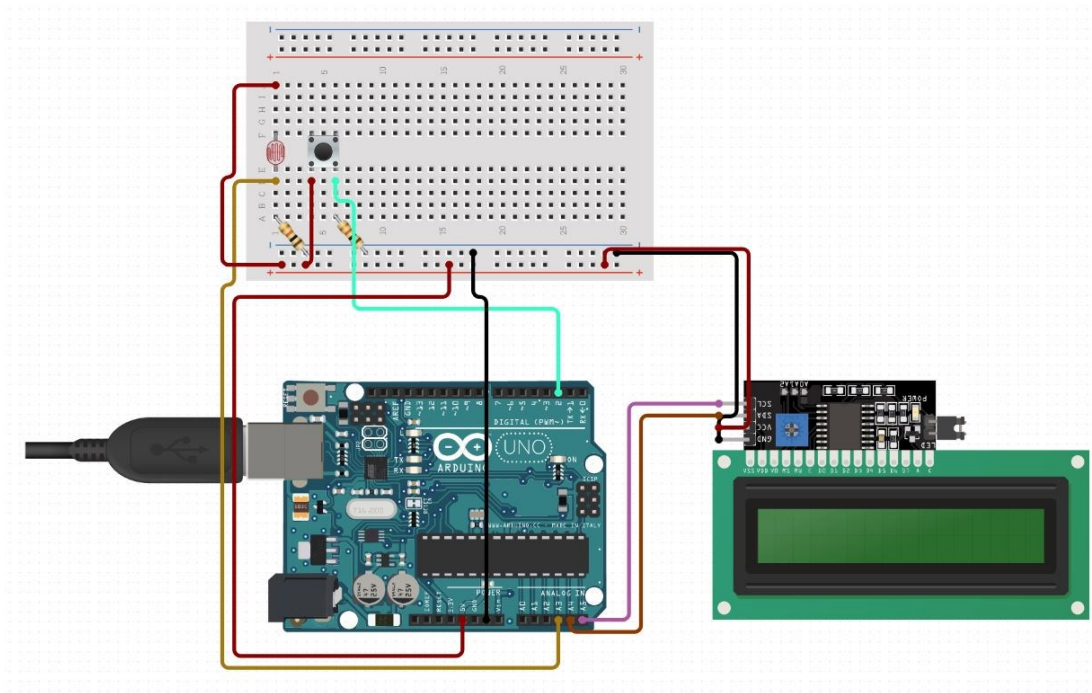


Obr. 45: Přilepený fotorezistor na termostatu KT3100

Pomocí Arduino UNO byl sestaven základní obvod a následně vytvořen program pro měření času, když odpor dosáhl určité hodnoty.

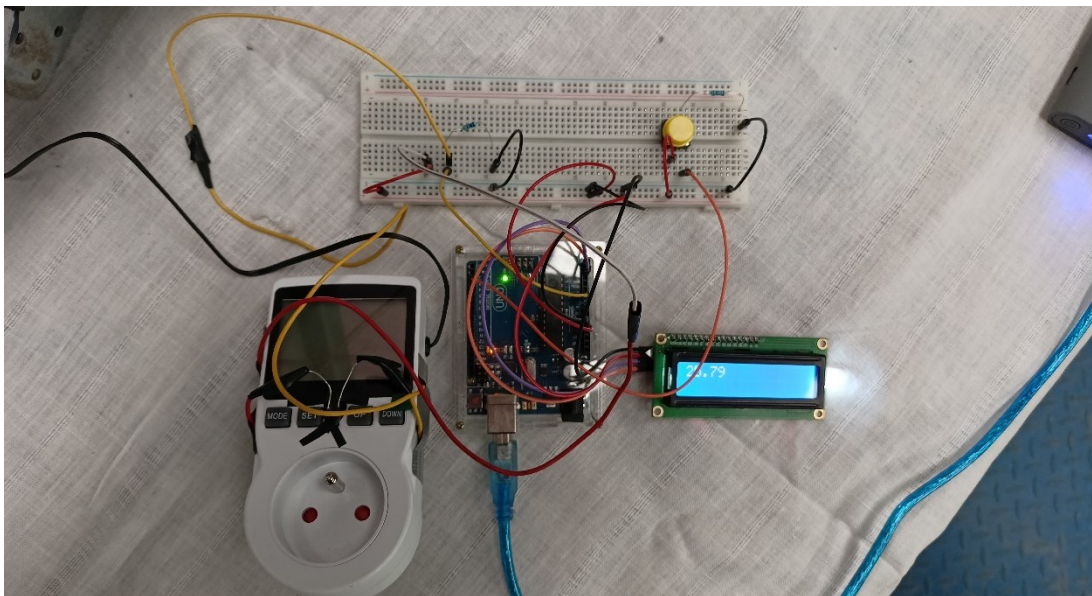
Po vytvoření programu bylo potřeba daný čas zobrazit. K tomuto účelu byl připojen LCD displej s možností zobrazení až 16 znaků na 2 řádcích. Displej bylo nutné opět naprogramovat, aby byl schopen zobrazit požadovaný čas.

Nakonec bylo přidáno tlačítko, které resetuje daný čas pro měření v různém počtu intervalu. Bez resetování by bylo nutné jednotlivé časy od sebe odečítat.



Obr. 46: Schéma zapojení komponentů pro stopky [22]

Propojení jednotlivých komponentů bylo provedeno pomocí tenkých vodičů na nepájitvém poli. Mikrokontroler byl při měření napájen pomocí powerbanky o kapacitě 10000 mAh.



Obr. 47: Sestavené a naprogramované stopky s fotorezistorem

Teplota teplého povrchu

Teplota teplého povrchu byla měřena pomocí zmíněného termostatu KT3100, který disponuje displejem, na kterém je tato teplota zobrazována. Pomocí této teploty je řízen i celý termostat a následně funkce topného tělesa. (více viz kap. 2.3.1.1)

Teplota chladného povrchu

Měření teploty chladného povrchu bylo prováděno pomocí bezkontaktního infračerveného teploměru Voltcraft IR 120–50D. Bezkontaktní měření přináší velkou výhodu, kdy nijak neovlivňuje teplotu na chladných stranách betonových desek. Nevýhodou je odchylka teploměru ± 1 °C.



Obr. 48: Infračervený bezkontaktní teploměr

Pro jedno měření byl použit i kontaktní teploměr včetně dataloggeru. Výhodou je malá odchylka a přesnost měření. Nevýhoda pro toto měření je obtížné upevnění teplotních sond na plochu betonové desky. Pro správné měření a přesné výsledky nelze nijak narušovat plochu ochlazované desky. Jedna z možností je tedy připevnit sondu přímo na povrch, avšak tím se může narušit tepelná výměna chladné betonové desky s okolím a vznikají tak nejistoty měření. Nejistota měření také vzniká kvůli současnému ochlazování sondy okolím. Druhou variantou je vložení sondy do připraveného otvoru v desce. Opět zde vznikají nejistoty jako

v první variantě. Navíc zde vzniká další nejistota, a to v problému stanovit v jaké hloubce se teplota měří, jelikož do výpočtu vstupuje i tloušťka desky.



Obr. 49: Teplotní čidla s dataloggerem

Ačkoliv jsou teplotní sondy v kombinaci s dataloggerem přesnější nežli použitý bezkontaktní teploměr, nebyly použity pro všechna měření z důvodů uvedených výše.

4.2 Průběh zkoušky pro stanovení součinitele tepelné vodivosti

Zkouška pro stanovení součinitele tepelné vodivosti probíhala v laboratorním stavu. Tělesa se před zkouškou uchovávají v laboratorním prostředí s teplotou vzduchu $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkostí $50 \pm 5 \text{ } \%$. [27]

Před samotným měřením byla jednotlivá pěnobetonová tělesa zvážena změřena. Rozměry (tloušťka, výška a šířka) byly měřeny pomocí posuvného měřidla a následně zapsány. Tělesa dvojvzorkové metody musí splňovat dle [27] následující podmínky:

- a) Objemová hmotnost zkušebních těles se nesmí lišit o více než $\pm 5 \text{ } \%$
- b) Průměrná tloušťka těles se nesmí lišit o více než $\pm 2 \text{ } \%$
- c) Dvojice těles musí být odebrána z jedné vzorkové jednotky

Pokud nejsou body a) a b) splněny, musí se tělesa upravit až do splnění daných podmínek sbroušením jednotlivých hran.

Po změření a ověření rozměrů a hmotností byly pěnobetonové desky umístěny do zkušebního zařízení a pečlivě tepelně zaizolovány pomocí pěnového polyetylenu, aby se odstranily, nebo alespoň minimalizovaly tepelné mosty. Lepší těsnosti mezi XPS deskami, pěnovým polyetylenem a betonovými deskami bylo dosaženo použitím upínacích popruhů a gumového upínacího popruhu.

Samotnému měření předcházela ohřev betonových desek pomocí měrné tepelné desky až po dosažení ustáleného tepelného stavu. Už při tomto ohřevu bylo nutné měřit samotné veličiny (kap. 2.3.1.3), aby bylo možné ustálený tepelný stav rozpoznat. Tento stav nastává, pokud se v jednotlivých intervalech součinitel tepelné vodivosti neliší o více než $\pm 2\%$ a pokud tyto hodnoty nevykazují rostoucí či klesající tendenci. V tomto kroku byla pomocí bezkontaktních teploměrů kontrolována i rovnoměrnost zahřívání čelních ploch pěnobetonových desek.

Jakmile bylo dosaženo ustáleného tepelného stavu byly zaznamenávány dané veličiny v jednotlivých intervalech. Norma [27] určuje délku a počet odečtů intervalu do tří kategorií:

- a) 1,5 hodiny v případě etalonážního měření, kdy v průběhu měřicího intervalu musí být provedeno nejméně 12 odečtů
- b) 1 hodina v případě průkazní, úřední, rozhodčí zkoušky součinitele tepelné vodivosti, kdy v průběhu měřicího intervalu musí být provedeno nejméně 6 odečtů
- c) 0,5 hodiny pro ostatní druhy zkoušek, úřední, rozhodčí zkoušky součinitele tepelné vodivosti, kdy v průběhu měřicího intervalu musí být provedeno nejméně 6 odečtů

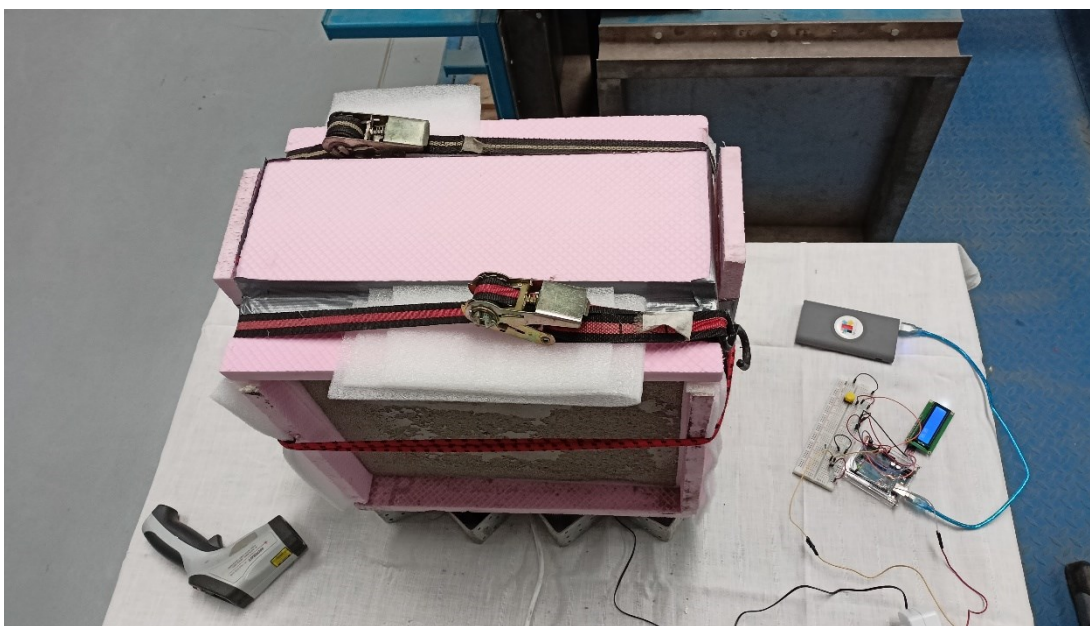
Jelikož v případě vyrobeného zkušebního zařízení délka jednotlivých intervalů, dána časovým rozestupem sepnutí termostatu, je závislá na požitých pěnobetonových deskách, bylo zvoleno jiné řešení. Čím menší součinitel tepelné vodivosti má betonová deska, tím jsou intervaly delší. Jelikož po dosažení ustáleného stavu jsou tyto intervaly téměř stejné, bylo přistoupeno na podmínku, kdy pro každé měření bylo zaznamenáno minimálně 6 odečtů, jako v kategoriích b) a c).

Po celou dobu zkoušky byly zaznamenávány teploty vzduchu z teploměru umístěného v laboratoři. Teploty by během samotného měření, po dosažení ustáleného tepelného stavu, neměly kolísat o více než $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Po ukončení zkoušky byla tělesa ihned odebrána ze zkušebního zařízení a následně proběhlo zvážení a změření těles stejně, jako na začátku zkoušky. Tímto se ověřilo, zda nedošlo k objemovým změnám vlivem ohřívání a případného částečného vysušení.



Obr. 50: Průběh zkoušky, přední a zadní strana zařízení



Obr. 51: Průběh zkoušky, pohled shora

4.3 Výpočet součinitele tepelné vodivosti

Výpočet součinitele tepelné vodivosti pro dvojvzorkovou metodu vychází z výpočtu pro jednovzorkovou metodu bez použití vyrovnávacích separačních vložek dle normy [28]:

$$\lambda = \frac{Q_d * d_m}{A_d * (T_{hd} - T_{cd})} \quad (1)$$

kde Q_d výpočtová hodnota tepelného toku (elektrický příkon měrné tepelné desky),
ve W

d_m průměrná tloušťka zkušebního tělesa (desky), v m

A_d účinná plocha, v m²

T_{hd} teplota teplého povrchu, ve °C

T_{cd} teplota chladného povrchu, ve °C

Pro výpočet součinitelů tepelných vodivostí vyjdeme z předpokladu symetrického měření, kdy se tepelný tok od měrné tepelné desky distribuuje na obě pěnobetonové desky rovnoměrně a rozměry obou pěnobetonových desek se neliší o více jak ± 2 %. Díky tomuto předpokladu můžeme výpočtovou hodnotu tepelného toku rozdělit na dvě shodné hodnoty pro každou z betonových desek.

$$2 * \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 = \frac{Q_d * d_1}{2 * A_{d1} * (T_{hd1} - T_{cd1})} + \frac{Q_d * d_2}{2 * A_{d2} * (T_{hd2} - T_{cd2})} \quad (2)$$

kde Q_d výpočtová hodnota tepelného toku (elektrický příkon měrné tepelné desky),
ve W

$d_{1(2)}$ průměrná tloušťka zkušebního tělesa (desky), v m

$A_{d1(2)}$ účinná plocha, v m²

$T_{hd1(2)}$ teplota teplého povrchu, ve °C

$T_{cd1(2)}$ teplota chladného povrchu, ve °C

Receptura CF300

V tabulce 29 jsou vypsány jednotlivé rozměry pěnobetonových desek receptury CF300. Rozměry jsou menší než požadovaná mez 2 % (viz podmínky kap. 2.3.2).

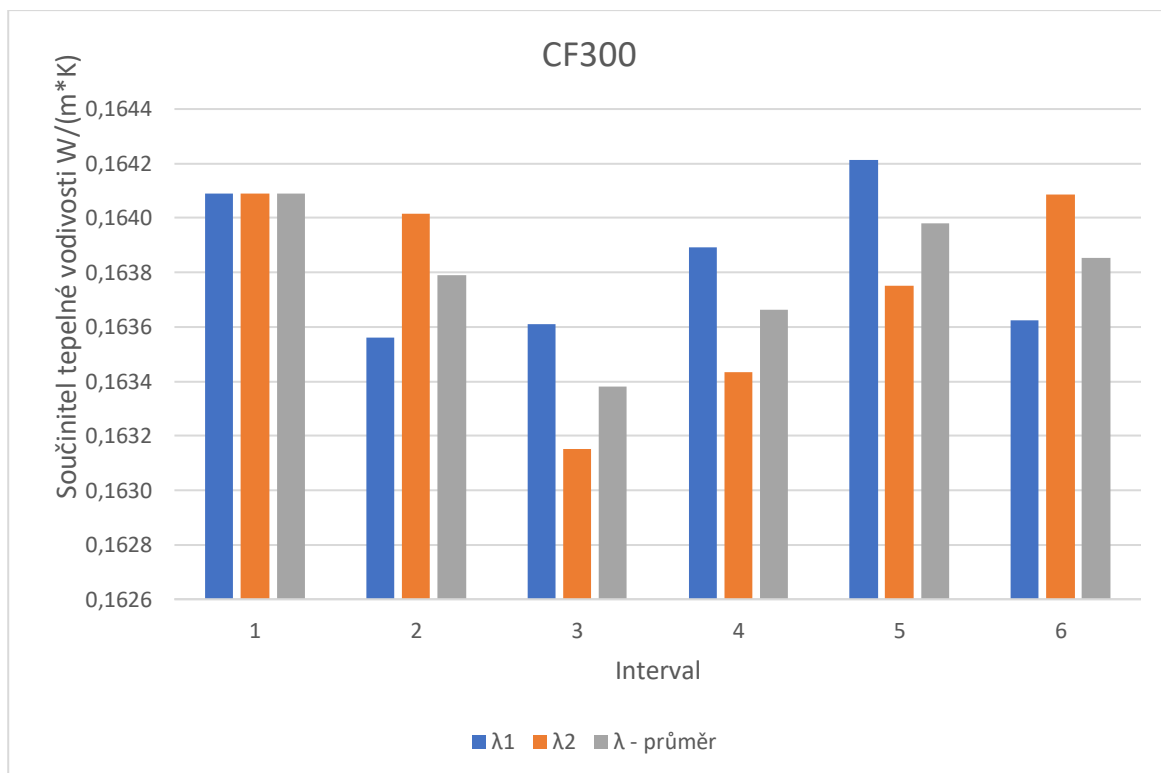
Rozměr	1. deska	2. deska	Rozdíl
Tloušťka	83,038 mm	83,460 m	0,512 %
Výška	324,850 mm	324,150 mm	0,216 %
Šířka	389,975 mm	389,650 mm	0,083 %

Tab. 29: Rozměry desek, receptura CF300

Z vyhodnocení vyšlo 6 platných intervalů použitých pro výpočet. Hodnoty nenaznačují klesající ani stoupající tendenci. Jednotlivé intervaly se neliší o více než 2 % (viz podmínky kap. 2.3.2).

Součinitel tepelné vodivosti [W/(m*K)]	1. deska	2. deska	Průměr	Rozdíl
Interval 1	0,1641	0,1641	0,1641	–
Interval 2	0,1636	0,1640	0,1638	0,183 %
Interval 3	0,1636	0,1632	0,1634	0,245 %
Interval 4	0,1639	0,1634	0,1637	0,184 %
Interval 5	0,1642	0,1638	0,1640	0,183 %
Interval 6	0,1636	0,1641	0,1639	0,061 %
–	–	Průměr	0,1638	–
–	Směrodatná odchylka		0,0003	–

Tab. 30: Součinitel tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, CF300



Graf 13: Součinitel tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, CF300

Receptura CF500

V tabulce 31 jsou vypsány jednotlivé rozměry pěnobetonových desek receptury CF500. Rozměry jsou menší než požadovaná mez 2 %.

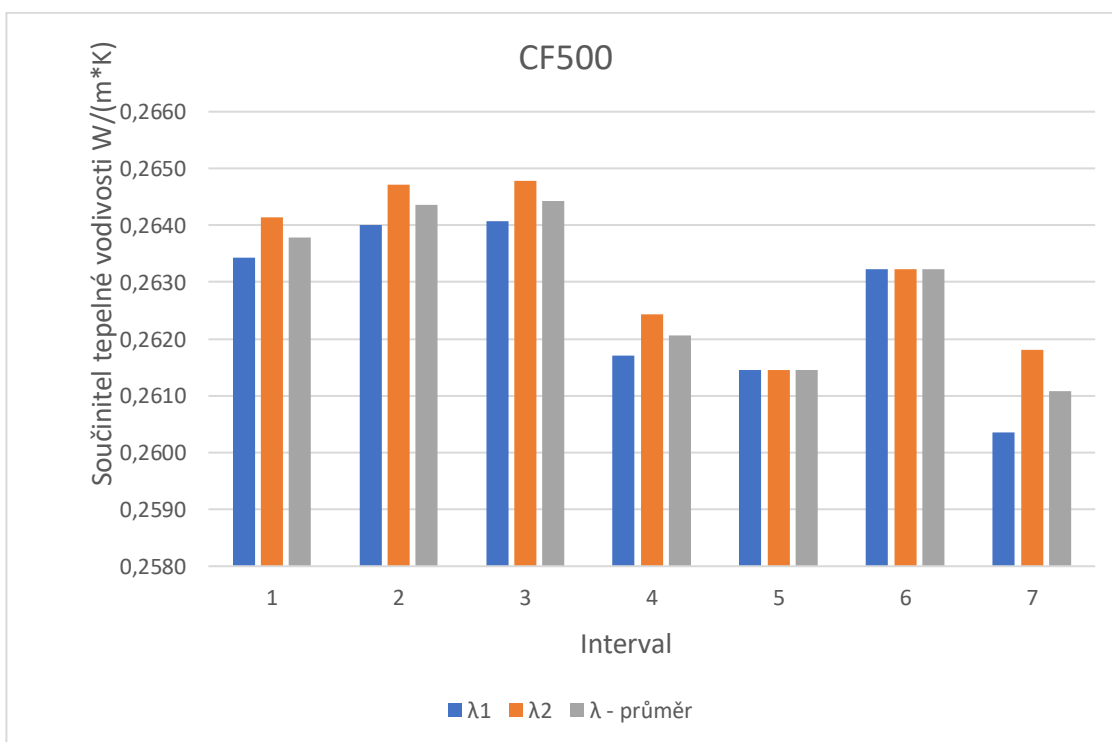
Rozměr	1. deska	2. deska	Rozdíl
Tloušťka	96,388 mm	96,240 mm	0,154 %
Výška	326,500 mm	326,800 mm	0,092 %
Šířka	389,150 mm	389,350 mm	0,051 %

Tab. 31: Rozměry desek, receptura CF500

Z vyhodnocení vyšlo 7 platných intervalů použitých pro výpočet. Hodnoty nenaznačují klesající ani stoupající tendenci. Jednotlivé intervaly se neliší o více než 2 %.

Součinitel tepelné vodivosti [W/(m*K)]	1. deska	2. deska	Průměr	Rozdíl
Interval 1	0,2634	0,2641	0,2638	–
Interval 2	0,2640	0,2647	0,2644	0,218 %
Interval 3	0,2641	0,2648	0,2644	0,025 %
Interval 4	0,2617	0,2624	0,2621	0,900 %
Interval 5	0,2615	0,2615	0,2615	0,233 %
Interval 6	0,2632	0,2632	0,2632	0,678 %
Interval 7	0,2604	0,2618	0,2611	0,823 %
–	–	Průměr	0,2623	–
–	Směrodatná odchylka		0,0014	–

Tab. 32: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, CF500



Graf 14: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, CF500

Receptura RF500

V tabulce 33 jsou vypsány jednotlivé rozměry pěnobetonových desek receptury RF500. Rozměry jsou menší než požadovaná mez 2 %.

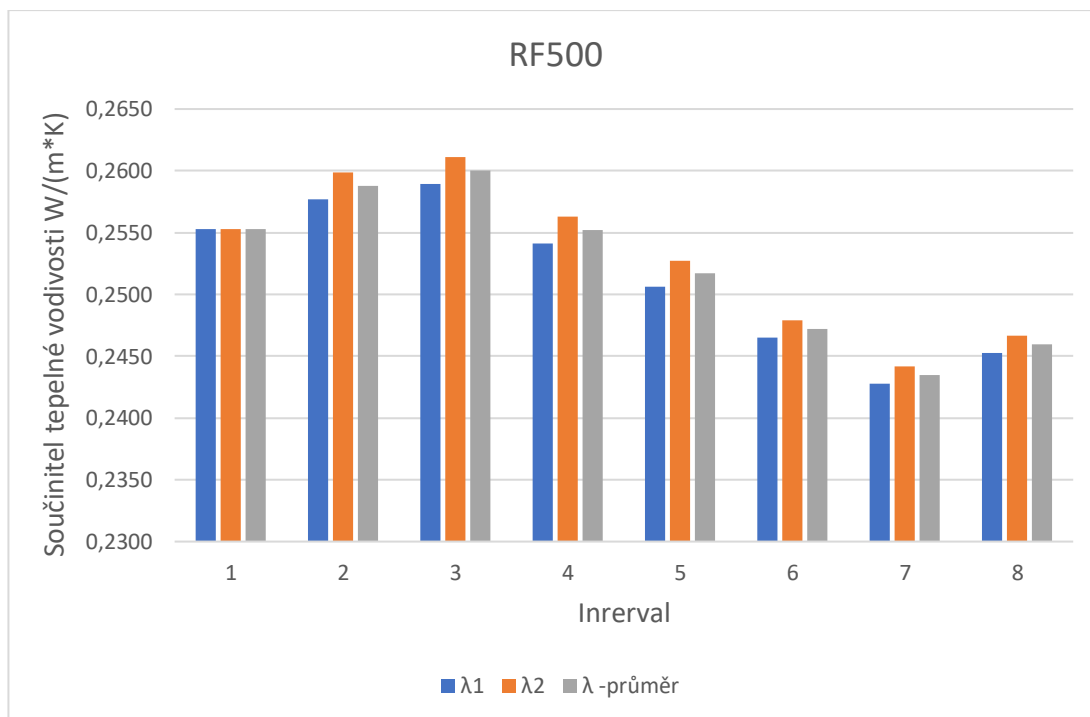
Rozměr	1. deska	2. deska	Rozdíl
Tloušťka	94,275 mm	94,55 mm	0,292 %
Výška	326,500 mm	326,400 mm	0,031 %
Šířka	389,600 mm	389,575 mm	0,001 %

Tab. 33: Rozměry desek, receptura RF500

Z vyhodnocení vyšlo 8 platných intervalů použitých pro výpočet. Hodnoty nenaznačují klesající ani stoupající tendenci. Jednotlivé intervaly se neliší o více než 2 %.

Součinitel tepelné vodivosti [W/(m*K)]	1. deska	2. deska	Průměr	Rozdíl
Interval 1	0,2553	0,2553	0,2553	–
Interval 2	0,2577	0,2599	0,2588	1,384 %
Interval 3	0,2589	0,2611	0,2600	0,468 %
Interval 4	0,2541	0,2563	0,2552	1,880 %
Interval 5	0,2506	0,2528	0,2517	1,394 %
Interval 6	0,2465	0,2479	0,2472	1,816 %
Interval 7	0,2428	0,2442	0,2435	1,530 %
Interval 8	0,2452	0,2466	0,2459	1,008 %
–	–	Průměr	0,2522	–
–	Směrodatná odchylka		0,0061	–

Tab. 34: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, RF500



Graf 15: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, RF500

Receptura RF900

V tabulce 35 jsou vypsány jednotlivé rozměry pěnobetonových desek receptury RF900. Rozměry jsou menší než požadovaná mez 2 %.

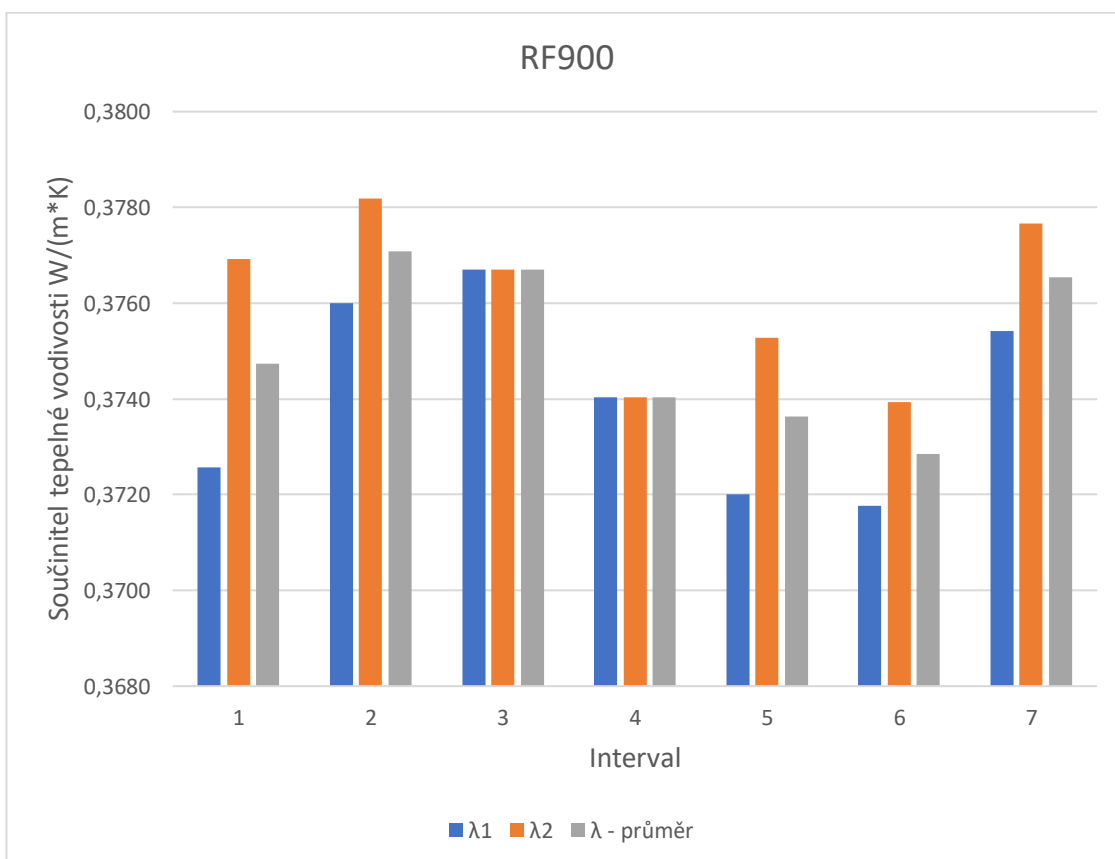
Rozměr	1. deska	2. deska	Rozdíl
Tloušťka	95,375 mm	95,650 mm	0,288 %
Výška	325,850 mm	325,950 mm	0,031 %
Šířka	391,000 mm	391,000 mm	0,000 %

Tab. 35: Rozměry desek, receptura RF900

Z vyhodnocení vyšlo 7 platných intervalů použitých pro výpočet. Hodnoty nenaznačují klesající ani stoupající tendenci. Jednotlivé intervaly se neliší o více než 2 %. Při měření teplot se na 1. desce ukázalo, že pravý horní roh se zahřívá více než zbytek desky.

Součinitel tepelné vodivosti [W/(m*K)]	1. deska	2. deska	Průměr	Rozdíl
Interval 1	0,3726	0,3769	0,3747	–
Interval 2	0,3760	0,3782	0,3771	0,626 %
Interval 3	0,3767	0,3767	0,3767	0,101 %
Interval 4	0,3740	0,3740	0,3740	0,717 %
Interval 5	0,3720	0,3753	0,3736	0,103 %
Interval 6	0,3718	0,3739	0,3728	0,213 %
Interval 7	0,3754	0,3777	0,3765	0,992 %
–	–	Průměr	0,3751	–
–	Směrodatná odchylka		0,0017	–

Tab. 36: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, RF900



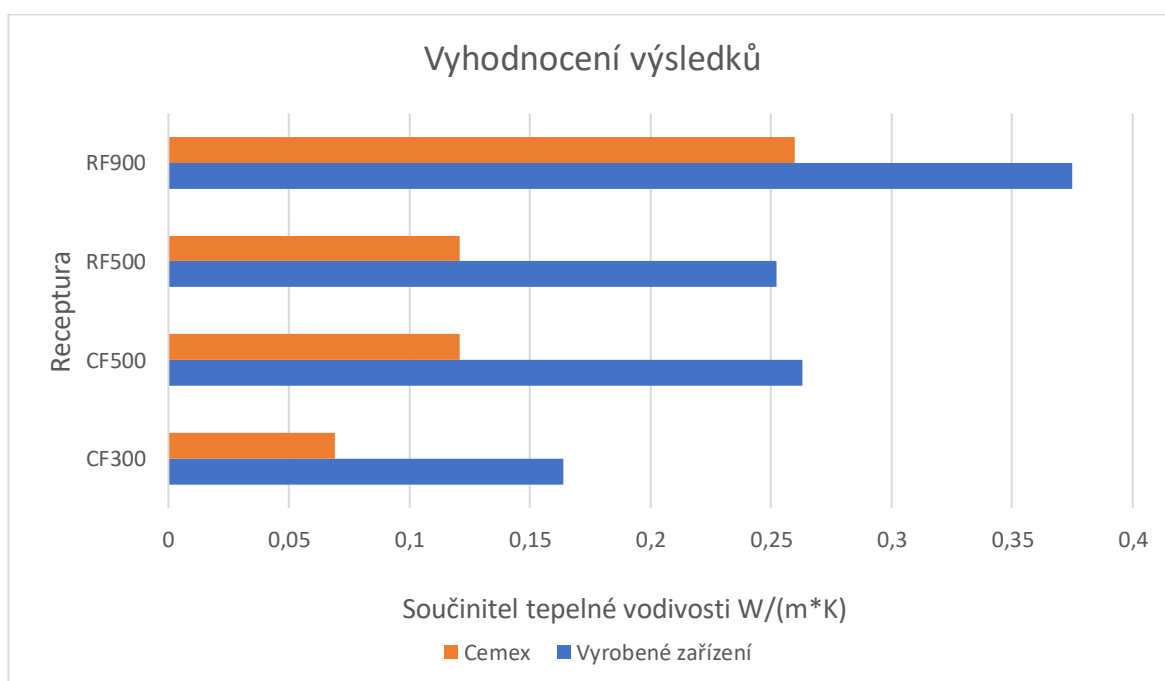
Graf 16: Součinitelé tepelné vodivosti v jednotlivých intervalech, RF900

4.4 Vyhodnocení výsledků součinitelů tepelné vodivosti

Vyhodnocení probíhalo porovnáním vypočítaných hodnot součinitelů tepelných vodivostí s hodnotami udávanými společností Cemex. Hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce a grafu.

Receptura	CF300	CF500	RF500	RF900
Autorem vyrobené zařízení	0,1638	0,2623	0,2522	0,3751
Data získaná ze společnosti Cemex	0,069	0,121	0,121	0,260
Rozdíl hodnot	0,0948	0,1413	0,1312	0,1151

Tab. 37: Porovnání výsledků



Graf 17: Porovnání výsledků

Výsledky naměřené na vyrobeném zařízení jsou vyšší než hodnoty udávané společností Cemex. Samotné rozdíly hodnot vychází podobně s průměrnou hodnotou 0,1206 W/(m*K). Tento rozdíl může být způsoben nepřesnostmi měřidel (teploměry a wattmetr). Avšak nejpravděpodobnější příčinou jsou tepelné úniky vzniklé nedokonalostmi vyrobeného zařízení. Nedokonalosti zařízení úzce souvisí s finanční stránkou, kdy samotné vyrobené zařízení vyšlo na 2500 Kč, kdy se ceny komerčních a kalibrovaných zařízení pohybují v řádech statisíců Kč. Pro větší statistický vzorek by se ukázalo, zda jsou tepelné úniky konstantní a tím by byl i konstantní rozdíl. Poté by se mohl stanovit opravný součinitel pro vyrobené zařízení na základě tohoto rozdílu.

ZÁVĚR BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ke zkoušení **pevnosti v tlaku** bylo vybráno 5 receptur, jedna z nich (CF500+plast) obsahovala navíc plastifikační přísadu. Jednalo se o receptury POROFLOW CF300, CF500, CF500+plast, RF500 a RF900.

Pevnost v tlaku byla zkoušena na krychlích o délce hrany 150 mm. Jelikož univerzitní zkušební lis určený pro krychelnou a válcovou pevnost nebylo možné z důvodu minimální pevnosti těles použít, bylo zvoleno jiné řešení v podobě zkušebního rámu na ohyb betonových trámů, ve kterém byla fyzicky stanovena pevnost zkušebních těles v tlaku.

Stanovené pevnosti v tlaku na krychlích byly doplněny o pevnosti ze zkušebního lisu společnosti CEMEX Czech Republic, s.r.o. pro doplnění statistického vzorku, kromě receptury CF500+plast. Výsledné hodnoty byly porovnány s deklarovanými hodnotami společnosti Cemex. Všechny naměřené hodnoty vyhověly kromě receptury CF300 z univerzitního lisu. Na základě dosud naměřených hodnot lze očekávat, že příčinou jsou chyby v rovinatosti a rozměrech krychlí pravděpodobně z důvodu absence kameniva v této receptuře. Přidání plastifikátoru do receptury CF500 nemělo žádný vliv na pevnost samotných krychlí. Na závěr byla vypočítána průměrná pevnost v tlaku na krychlích ke každé receptuře.

Dynamický modul pružnosti byl zkoušen na pěnobetonových deskách o rozměrech 400x340x100 mm. Zkoušeny byly 4 receptury, POROFLOW CF300, CF500, RF500 a RF900, z každé receptury byly vytvořeny 2 desky.

Pro stanovení dynamického modulu pružnosti bylo použito zařízení PULSONIC Ultrasonic Pulse Analyser 58–E4900 s přímým uspořádáním budiče a snímače.

Ke každé z desek bylo naměřeno 7 základů včetně času průchodu ultrazvukového impulzu, tedy ke každé receptuře bylo naměřeno 14 těchto časů a základů pro dostatečně velký statistický vzorek. Při vyhodnocení jednotlivých receptur bylo třeba vyřadit nevhodné hodnoty, které se výrazněji lišily od zbylých hodnot statistického vzorku. Vyřazené hodnoty mohly vzniknout nehomogenitou pěnobetonové struktury. Na závěr byl vypočítán průměrný dynamický modul pružnosti ke každé receptuře.

Na počátku experimentálního stanovení **součinitele tepelné vodivosti** bylo nutné zvolit vhodnou metodu stanovení součinitele tepelné vodivosti. Vhodná volba vyplývá z charakteru pěnobetonu a také z možnosti sestavení měřicího zařízení. Byla zvolena

dvojevzorková metoda chráněné tepelné desky. Vyrobené zařízení se skládá z měrné tepelné desky, tepelné izolace a zařízení pro měření potřebných veličin.

Autorem navržená realizace zařízení se skládá z měrné tepelné desky, která byla vyrobena ze dvou hliníkových plechů o rozměrech 400x340x2 mm a topného tělesa do trouby o příkonu 1000 W a rozměrech 350x280 mm. Topné těleso bylo zvoleno menší, než je plocha pěnobetonových desek nebo hliníkových plechů z důvodu ochrany tepelné izolace před žářem z topného tělesa.

Tepelná izolace byla realizována dvěma vrstvami extrudovaného polystyrénu spojených nízkoexpanzní polyuretanovou pěnou s dobrými tepelně izolačními vlastnostmi.

Měrná tepelná deska byla řízena zásuvkovým termostatem KT3100, pomocí tepelného snímače termostatu byla měřena teplota teplého povrchu. Příkon měrné tepelné desky byl měřen wattmetrem DT26, délka intervalu mezi sepnutím termostatu mobilní aplikací, teplota studeného povrchu bezkontaktním teploměrem. Čas zapnutého tělesa byl měřen pomocí stopek, sestavených a naprogramovaných pomocí deskového kontroléru Arduino UNO a připojeného fotorezistoru, celkový čas byl zobrazován na malém LCD displeji připojeném k Arduino UNO.

Ke každé receptuře bylo naměřeno alespoň 6 odečtů, ze kterých byly následně vypočítány příslušné součinitele tepelné vodivosti pro dostatečně velký statistický vzorek. Výsledný součinitel tepelné vodivosti receptury byl vypočítán jako průměr ze získaných jednotlivých součinitelů tepelných vodivostí.

Průměrné hodnoty byly porovnány s hodnotami uváděnými společnostmi Cemex. Byla zjištěna odchylka, která se zdá být konstantní. Pro ověření konstantnosti odchylky by bylo zapotřebí udělat velké množství měření mimo jiné i na jiných recepturách betonu. Pokud by se ukázalo, že jsou odchylky konstantní, bylo by možné vyvodit opravný součinitel výsledných hodnot pro autorem vyrobené zařízení. Samotná odchylka bude pravděpodobně vyplývat především z tepelných úniků skrze vyrobené zařízení, jelikož není dokonale vyrobené.

Další navazující práce by se mohla zabývat zdokonalením autorem vyrobeného zařízení. V prvé řadě by se vyměnila tepelná izolace celého zařízení a následně by se nahradila i izolace kolem pěnobetonových desek. Dalším zdokonalením by mohla být náhrada hliníkových plechů za tenčí měděné z důvodu menší tepelné setrvačnosti.

Posledním faktorem ovlivňující přesnost jsou zařízení pro měření veličin, které by bylo potřeba zdokonalit, či vyměnit za nové. Celkové zdokonalení by záleželo především na dostupných finančních prostředcích (grant).

Navazující práce by se také mohla zabývat přepočtem dynamického modulu pružnosti na statický modul pružnosti, nebo širším použitím dostupného ultrazvukového přístroje PULSONIC Ultrasonic Pulse Analyser 58–E4900. Pomocí tohoto ultrazvukového přístroje je možné stanovit okrem dynamického modulu pružnosti například pevnost betonu v tlaku a narušení betonu (změny struktury).

Další práce by se mohla věnovat návrhu samotných receptur. Například přidáním vláken do složení betonu a následné provedení zkoušky pevnosti v tlaku a experimentální zkoušky pevnosti v tahu ohybem a další.

ZDROJE

- [1] MEHTA, Kumar P. a Paulo J. M. MONTEIRO. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, c2014. ISBN 978-0-07-179787-0.
- [2] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Přeložil Vlastimil BÍLEK, přeložil Halina SZKLORZOVÁ. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [3] NOVÁK, Jaroslav a Jiří KOLÍSKO. *Speciální betony*. Praha: Svaz výrobců betonu ČR, 2001. ISBN 80-238-2678-6.
- [4] *EBETON: SVĚT BETONU* [online]. Svaz výrobců betonu ČR, c2021 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/>
- [5] RAHMAN, Fasi Ur. *Fly Ash – Properties, Types, Mechanism and Uses* [online]. In: . [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: The Constructor
- [6] *Petra: Microsilica* [online]. c2020 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.indiacenosphere.com/>
- [7] SUCHÁNEK, Vladimír, 2018. *Experimentální analýza speciálních betonů vystavených extrémním teplotním namáháním*. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí práce Jiří Pokorný.
- [8] *CEMEX* [online]. c2022 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://www.cemex.cz/>
- [9] MINDESS, Sidney. *Developments in the formulation and reinforcement of concrete*. Second edition. Duxford, United Kingdom is an imprint of Elsevier: Woodhead Publishing, [2019]. Woodhead Publishing series in civil and structural engineering. ISBN 9780128189283.
- [10] SAMUI, Pijush, Dookie KIM, Negesh IYER a Sandeep CHAUDHARY, ed. *New Materials in Civil Engineering* [online]. Butterworth-Heinemann, 2020 [cit. 2023-02-21]. ISBN 9780128190753. Dostupné z: Elsevier

[11] *Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): Performance and environmental aspects* [online]. 2022. [cit. 2023-02-22]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622025124>

[12] COLANGELO, Francesco, Raffaele CIOFFI a Ilenia FARINA, ed. *View on ScienceDirect Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management: Recycled and Artificial Aggregate, Innovative Eco-friendly Binders, and Life Cycle Assessment* [online]. Woodhead Publishing, c2021 [cit. 2023-02-23]. ISBN 9780128230138. Dostupné z: Elsevier

[13] *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* [online]. 2019. IAEME Publication [cit. 2023-02-24]. ISSN 0976-6316. Dostupné z: <http://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=10&Issue=6>

[14] Foam generator sumo: Production of lightweight concrete. *Ha-Be: Making good concrete better* [online]. 7. 1. 2022 [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://www.ha-be.com/ha-be/multimedia/videos.htm>

[15] WBA foam concrete house: The most modern way of building foam-concrete houses at the highest standards and competitive prices. *WBA: Worldwide Business Activities* [online]. c2014 [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: <http://wba.li/index-e.php>

[16] J. LICARI, James a Laura A. HUGHES. *Handbook of Polymer Coatings for Electronics: Chemistry, Technology and Applications* [online]. William Andrew, c1990 [cit. 2023-03-03]. ISBN 9780815517689.

[17] QIU, Lin a Yanghui FENG, ed. *Micro and Nano Thermal Transport: Characterization, Measurement, and Mechanism* [online]. Academic Press, c2022 [cit. 2023-03-03]. ISBN 9780128236239. Dostupné z: ELSEVIER

[18] BRAUN, Simon, D. J. EWINS a Singiresu S. RAO. *Encyclopedia of vibration*. San Diego: Academic Press, c2002. ISBN 978-0-12-227085-7.

[19] CARVALHO, C. H. R. a L. A. C. MOTTA. *Study about concrete with recycled expanded polystyrene* [online]. 13 December 2019 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: SCIELO doi: S1983-41952019000600010

[20] *The Concrete Society: Established in 1966* [online]. 2005 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.concrete.org.uk/>

- [21] *Schneppa glass: Recycled Crushed Glass* [online]. 2005 [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <http://www.schnepparecycledcrushedglass.com.au/>
- [22] *Circuito.io* [online]. [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://www.circuito.io/>
- [23] Topná folie ES 80. In: *Infraky: specialista na ifrazářiče* [online]. Dostupné z: <https://www.infraky.cz/infraky-cz-topna-folie-es80-1-1-5m-117w-1>
- [24] Topné těleso do trouby. In: *Elektra dvořák: náhradní díly* [online]. Dostupné z: <https://www.elektra-dvorak.cz/detail.php?id=9555>
- [25] ČSN EN 206+A2. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 2021.
- [26] ČSN EN 197-1 ED.2. *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2012.
- [27] ČSN 72 7012-1. *Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 1: Společná ustanovení*. 1994.
- [28] ČSN 72 7012-2. *Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 2: Metoda chráněné teplé desky*. 1994.
- [29] ČSN EN 196-3. *Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. 1994.
- [30] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2017.
- [31] ČSN EN 12504-4. *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. 2021.
- [32] ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. 2012.
- [33] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. 2011.
- [34] ČSN EN 1354. *Stanovení pevnosti v tlaku mezerovitěho betonu z pórovitého kameniva*. 2016.
- [35] ČSN EN 679. *Stanovení pevnosti v tlaku autoklávovaného pórobetonu*. 2011.

[36] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy.* 2021.

[37] ČSN EN 678. *Stanovení objemové hmotnosti v suchém stavu autoklávovaného pórobetonu.* 1995.

[38] ČSN EN 1353. *Stanovení vlhkosti autoklávovaného pórobetonu.* 1998.

[39] ČSN EN 12504-4. *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.* 2021.

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

[41] ČSN EN 12620+A1. *Kamenivo do betonu.* 2008.