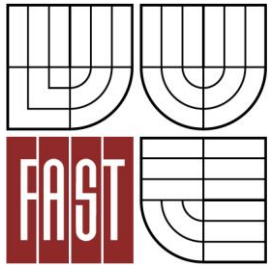




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

TECHNOLOGIE VÝROBY CEMENTOVÝCH PĚNOBETONŮ A JEJICH VLASTNOSTI

PRODUCTION TECHNOLOGY OF CEMENT FOAM CONCRETE AND THEIR PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Karel Mikulica

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | B3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Bakalářský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3607R020 Stavebně materiálové inženýrství |
| Pracoviště | Ústav technologie stavebních hmot a dílců |

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|---|---|
| Student | Karel Mikulica |
| Název | Technologie výroby cementových pěnobetonů a jejich vlastnosti |
| Vedoucí bakalářské práce | prof. Ing. Rudolf Hela, CSc. |
| Datum zadání bakalářské práce | 30. 11. 2012 |
| Datum odevzdání bakalářské práce | 24. 5. 2013 |

V Brně dne 30. 11. 2012

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- tuzemské a zahraniční odborné časopisy
- sborníky z tuzemských a zahraničních odborných konferencí
- internetové stránky, např. <http://webofknowledge.com> nebo <http://wokinfo.com>

Zásady pro vypracování

Oblast velmi lehkých betonů vyráběných z jemnozrnných cementových malt jejich napěněním se využívá již cca 30 let. Tyto pěnobetony se nejčastěji využívají pro zajištění tepelné či zvukové izolace podlahových konstrukcí. Výhodou je rychlá pokládka velmi tekutých, v podstatě samonivelačních hmot. Problémem je zachování rovnoměrné objemové hmotnosti a tím i pevnosti a hlavně stability nalité vrstvy během tuhnutí. Toto výrazně ovlivňuje kolísání dávkování pěnotvorné přísady, její kvalita, koncentrace, vodní součinitel či teploty při jejich aplikaci a způsob míchání a dopravy. Cílem Vaší práce bude zpracovat přehled používaných technologií míchání a výroby pěnobetonů včetně dopravních systémů. Dále ověřit vlastnosti pěnotvorných přísad dostupných v ČR. Sestavit vzorové receptury pěnobetonů pro objemové hmotnosti od 150 do 800kg/m³.

V praktické části pak ověřit navržené receptury, ze kterých budou připraveny zkušební vzorky, na kterých bude stanoveno:

- pevnosti v tlaku ve stáří 7 a 28 dnů
- objemové hmotnosti
- stabilita v čase do 12 hodin od zamíchání
- informativní hodnoty součinitele teplotní vodivosti

Rozsah práce je minimálně 40 stran.

Předepsané přílohy

.....

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o technologiích výroby cementových pěnobetonů a volbě vhodných surovin pro dosažení požadovaných vlastností pěnobetonu. Experimentální část bakalářské práce je věnována porovnání fyzikálních vlastností pěnotvorných přísad a pěnobetonů z nich vyrobených.

Klíčová slova

Pěnobeton, lehký beton, pěnotvorná přísada, cement, pórovitost, objemová hmotnost, pevnost v tlaku

Abstract

This bachelor's thesis deals with the technologies of production of the cement foam concrete and about the choice of suitable materials for achieving the desired properties of the foam concrete. The experimental part of the bachelor's thesis is devoted to the comparison the physical properties of the foaming agents and the foam concrete produced of them.

Keywords

Foamed concrete, lightweight concrete, foaming agent, cement, porosity, bulk density, compressive strength

Bibliografická citace VŠKP

MIKULICA, Karel. *Technologie výroby cementových pěnobetonů a jejich vlastnosti*. Brno, 2013. 67 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2013

.....
Karel Mikulica

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této bakalářské práce.

V Brně dne 22. 5. 2013

Karel Mikulica

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod..... | 10 |
| Cíle práce..... | 12 |
| 1. Lehké betony..... | 13 |
| 2. Složení pěnobetonu..... | 17 |
| 2.1 Cement..... | 17 |
| 2.1.1 Výroba cementu..... | 18 |
| 2.1.2 Cement – normalizované značení..... | 19 |
| 2.1.3 Mechanické a fyzikální požadavky na cement..... | 21 |
| 2.2 Pěnotvorné přísady..... | 21 |
| 2.2.1 Sircontec FN1..... | 22 |
| 2.2.2 Sika SB 2..... | 22 |
| 2.2.3 Sika Lightcrete L 500..... | 23 |
| 2.2.4 Sika LPS-V..... | 23 |
| 2.2.5 Cemex CX Isofoam 935..... | 24 |
| 2.2.6 Mapeplast LA..... | 24 |
| 2.2.7 Schaumbildner 97..... | 25 |
| 2.2.8 Kemacon LPA..... | 25 |
| 2.2.9 Foam GA 285..... | 26 |
| 2.2.10 Darex AE S 45..... | 26 |
| 2.3 Záměsová voda..... | 27 |
| 2.4 Plniva a příměsi..... | 28 |
| 3. Technologie výroby pěnobetonu..... | 29 |
| 3.1 Výroba pěnobetonu v mobilním zařízení..... | 30 |
| 3.2 Výroba pěnobetonu ve stabilním výrobním zařízení..... | 33 |
| 4. Receptury na výrobu pěnobetonu..... | 36 |
| 5. Použité laboratorní zkoušky..... | 39 |
| 5.1 Pevnost v tlaku..... | 39 |
| 5.2 Objemová hmotnost ρ_v | 40 |

| | |
|---|-----------|
| 5.3 Součinitel tepelné vodivosti λ | 40 |
| 6. Vlastnosti pěnotvorných přísad..... | 43 |
| 6.1 Vydatnost pěny..... | 44 |
| 6.2 Číslo napěnění..... | 44 |
| 6.3 Poločas odloučivosti pěny..... | 44 |
| 6.4 Praktické ověření vlastností technické pěny..... | 44 |
| 7. Vzorové receptury pěnobetonů a jejich vlastnosti..... | 50 |
| 7.1 Navržené receptury s nízkou dávkou cementu..... | 50 |
| 7.2 Receptury SIRCONTEC PBG 35 a 40..... | 52 |
| 7.3 Receptury společnosti CEMEX | 53 |
| 7.4 Receptura pro ULW SCC..... | 54 |
| 7.5 Stabilita v čase do 12 hodin od zamíchání..... | 58 |
| Závěr..... | 61 |
| Seznam zdrojů..... | 63 |
| Seznam tabulek..... | 66 |

Úvod

V současné době probíhá velice rychlý rozvoj v oblasti stavebních materiálů, přesto beton zůstává stavivem, které má ve stavebnictví jedno z nejširších uplatnění. Složení betonu může být značně různorodé v závislosti na použitém plnivu, přísadách nebo příměsích. Funkci pojiva však vždy plní cement. V závislosti na vlastnostech konstrukcí je možné upravovat složení betonu tak, aby splňoval jednotlivé požadavky, např. pevnost, hutnost, odolnost vůči vlivům. Jedním z požadavků může být také nízká objemová hmotnost, kterou splňují lehké betony s objemovou hmotností do 2 000 kg/m³. Nejstarší dochovanou stavbou z lehkého betonu je vylehčená kopule římského Pantheonu postaveného v letech 120 – 125 n. l. Snížení objemové hmotnosti betonu lze dosáhnout různými způsoby. Podle způsobu snížení objemové hmotnosti lze lehké betony rozdělit na mezerovité betony, betony s lehkým kamenivem a betony s vylehčenou maltovinou. Mezi betony s vylehčenou maltovinou patří i pěnobeton.

Slovo beton (převzaté z francouzského béton = hrubá malta, pocházející z latinského betunium = kamenná malta, anglicky Concrete concretere) se stalo synonymem i pro ostatní stavební kompozity (např. asfaltobeton, plastbeton, pórobeton aj.).

Technologie betonu je vědní a technická disciplína, která se zabývá složením, výrobou a vlastnostmi betonu s cílem dosažení potřebných vlastností s minimální energetickou náročností (úsporou cementu) a minimálním zatížením životního prostředí. Postupně se přechází od empirického poznání a pozorování k obecné formulaci problémů jazykem matematiky, zvyšuje se stupeň matematizace oboru. [3]

Pěnobetony jsou velmi lehké betony vyráběné z jemnozrnných cementových malt jejich napěněním pomocí pěnotvorné přísady. Pěnobeton se v širším poli působnosti využívá až posledních cca 30 let. Jeho historie je však daleko starší. Již v roce 1923 byl vyvinut a patentován v Rusku jako izolační materiál. Původní pěnidlo bylo vyráběno z dnes již neznámé rostliny rostoucí ve střední Asii. V roce 1954 byl pěnobeton odborné veřejnosti představen ve stavebním věstníku. Z důvodu nestejných vlastností původních pěnotvorných přísad však nedošlo ihned k jeho

začlenění mezi ostatní stavební materiály a to až do doby průmyslové výroby pěnotvorného koncentrátu o identických vlastnostech. V současnosti se pěnobeton používá především jako izolační a vyrovnávací vrstva ve vodorovných konstrukcích podlah a střech a jako materiál k vyplňování dutin.

Cíle práce

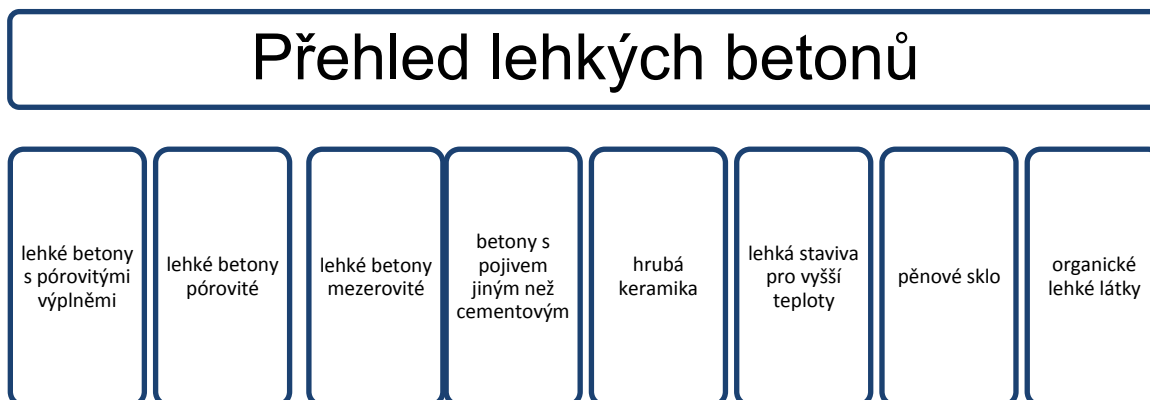
Hlavním cílem této bakalářské práce je zpracování přehledu používaných technologií míchání a výroby cementových pěnobetonů, a to včetně způsobů dopravy pěnobetonů na místo ukládky. V teoretické části budou zpracovány informace o surovinách pro výrobu pěnobetonu, zejména pak o jednotlivých pěnotvorných přísadách dostupných v České republice.

Dalším cílem práce je na základě dostupných informací sestavit vzorové receptury pěnobetonů. Vzorové receptury budou sestaveny pro objemové hmotnosti od 150 do 800 kg/m³. V praktické části budou na základě navržených receptur připraveny zkušební vzorky. U těchto vzorků budou stanoveny pevnosti tlaku ve stáří 7 a 28 dnů, objemové hmotnosti, stabilita v čase do 12 hodin od zamíchání a informativní hodnoty součinitele teplotní vodivosti. Na základě výsledků těchto zkoušek budou tyto zkušební vzorky vyhodnoceny a porovnány.

1. Lehké betony

Beton je stavivo, jehož základními složkami jsou cement, voda a kamenivo. Dále mohou být obsaženy různé příměsi, přísady nebo výztuže. Betony s objemovou hmotností do 2 000 kg/m³ označujeme jako lehké betony. Lehčené betonové směsi jsou používány již od starověku, kdy se do vápenných pojiv zamíchávala lehká přírodní kameniva v podobě lávových tufů, tufitů a křemeliny. Tyto betony bývaly zpočátku využívány spíše jako izolační a výplňové hmoty. V posledních cca 45 letech jsou však tyto betony používány i jako konstrukční. Díky vylehčení póry či lehkým pórovitým kamenivem dosahují maximální objemové hmotnosti 2 000 kg/m³ při dosahování pevnosti v tlaku až 60 MPa. Při navrhování nosných konstrukcí tak lze použít daleko subtilnější konstrukční prvky a tím snížit objem materiálu v konstrukci, čímž dojde nejen ke snížení stálého zatížení konstrukce, ale mnohdy i ke snížení celkové ceny konstrukce. Další výhodou je i ekologický aspekt, jelikož většina dnes vyráběného lehkého kameniva je vyrobena z průmyslových odpadů, které se tím pádem nemusí jen ukládat na skládkách, ale jsou dále systematicky využívány.

Obr. 1 Přehled lehkých betonů



Zdroj: [1]

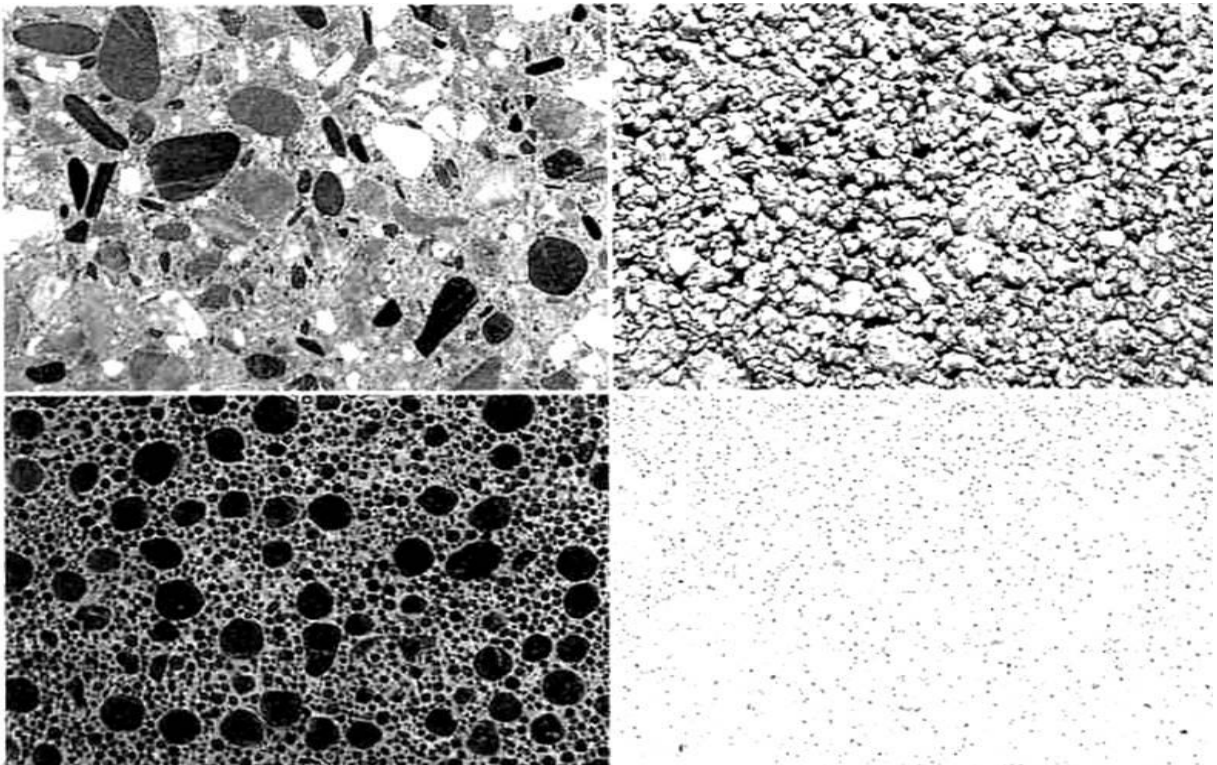
Základním stavebním kamenem lehkých betonů a pěnobetonů je nízká objemová hmotnost. Snížení objemové hmotnosti betonu lze docílit několika způsoby:

- Použitím pórovitého kameniva pro mezerovitý nebo hutný lehký beton.

- Provzdušněním s použitím provzdušňovací přísady, za účelem zvýšení mrazuvzdornosti betonu a současně se sníží objemová hmotnost betonu jen asi o 4 až 6 %.
- Vytvořením pěny pomocí pěnotvorné přísady a zamícháním s ostatními složkami betonu vznikne pěnobeton. [4]

Podle způsobu snížení objemové hmotnosti dělíme lehké betony na mezerovité betony, betony s vylehčenou maltovinou a betony s lehkým kamenivem.

Obr. 2 Pohled na řezy různými lehkými betony



Zdroj: [5]

Mezerovitý beton se vyrábí z kameniva s omezením jemných frakcí. Struktura obsahuje velké množství mezer. Mezery mohou být vyplněny vzduchem nebo provzdušněnou maltou. Jako plnivo se používá hutné nebo lehké kamenivo. Dosažená pevnost je závislá na druhu kameniva, množství cementu a dalším zpracování. Pevnost se pohybuje okolo 1 – 10 Mpa a objemová hmotnost okolo

500 – 1 500 kg/m³. Smrštění je malé, odolnost vůči mrazu je velmi dobrá, protože je omezeno kapilární vztlínání (omezené množství kapilár). [7]

Betony, u kterých se snížení objemové hmotnosti provede použitím lehkého kameniva, se také nazývají lehké betony s pórovitými výplněmi. Může být použito anorganické kamenivo nebo organické plnivo. Jako organické plnivo lze použít piliny nebo slámu, ale také uměle vyrobené organické hmoty, např. polystyren. Polystyrenový beton je složený z drobného těžného kameniva, polystyrenových granulí, cementu a vody s přísádkem plastifikátoru. Objemová hmotnost a pevnost polystyrenového betonu závisí na podílu polystyrenových granulí. Lze dosáhnout hodnotu objemové hmotnosti 250 kg/m³. [7] Polystyrenbeton je možné použít jen jako výplňový, např. na izolační vrstvy střech. Jako anorganické kamenivo pro výrobu lehkého betonu lze použít buď přírodní tufy, lávu, pemzu nebo křemelinu, nebo uměle vyrobené – perlit, cihelný recyklát, vysokopecní strusku nebo v ČR nejčastěji používaný Liapor – lehké kamenivo z expandovaného jílu.

Lehké betony pórovité jsou betony s vylehčenou maltovinou. Základním faktorem při výrobě každého pórovitého betonu je, že do čerstvé záměsi malty vmícháme plynotvorný či pěnotvorný přípravek a podle požadovaných objemových a pevnostních charakteristik i jemné křemičité písky, které často ještě domíláme. Lehké pórovité betony se dělí podle velikosti pórů na makropority a mikropority. Makropority obsahují póry o velikosti v průměru 0,1 - 1,0 mm, tedy makroskopické póry, které je možno vidět pouhým okem. Vznikají při chemické reakci pěnotvorné či plynotvorné přísady se záměsovou vodou. Oproti tomu mikropority mají mikroskopické póry o průměru pouhých 0,001 mm, které už pouhým okem nevidíme. Tyto póry vznikají vypařením nadbytečné vody z jemnozrnné malty s obsahem vápna vylehčené submikroskopickými póry, tato technologie je bohužel závislá na použití nákladných autoklávů v procesu výroby.

Obr. 3 Přehled lehkých pórovitých betonů



Zdroj: [1]

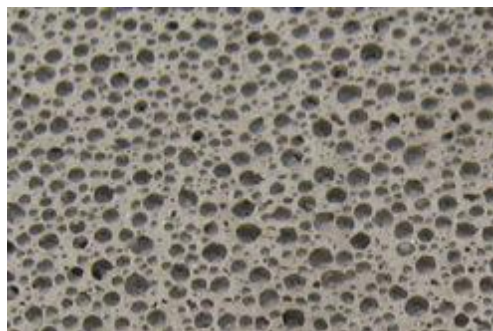
U pórobetonu se vylehčení maltoviny dosahuje vývojem plynu, který zanechává ve struktuře póry vhodných velikostí. Pórobeton se vyrábí ze směsi složené z křemičitého plniva, pojiva, vody, plynotvorné přísady a regulačních přísad. Jako křemičité plnivo se používá křemičitý popílek (z elektráren nebo tepláren) nebo křemičitý písek. Pojivo může být cement nebo jemně mleté vápno. Regulátorem tuhnutí je sádrovec nebo anhydrit. Plynotvorná přísada je hliníkový prášek nebo hliníková pasta, které zabezpečují nakypření hmoty ve formě. [7] Konečné vlastnosti získává pórobeton většinou autoklávováním, tj. v tlakové nádobě za působení vyššího tlaku a teploty okolo 190 °C. Z pórobetonu se vyrábí nejčastěji tvárnice (YTONG, Porfix, Hebel).

Do skupiny betonů s vylehčenou maltovinou patří také pěnobetony, které využívají pro snížení objemové hmotnosti pěnotvorné přísady. Do směsi plniva a pojiva se vmíchává organická pěna.

2. Složení pěnobetonu

Cementový pěnobeton stejně jako další řada výrobků, které ve svém názvu obsahují slovo beton je kompozitní stavební materiál skládající se z pojiva, nejčastěji kameniva a pojiva, které představuje hydraulické pojivo (většinou cement). Mimo to je v této látce obsaženo určité množství pórů. [3]

Pěnobetony jsou velmi lehké betony vyráběné z jemnozrnných cementových malt za pomoci pěnotvorné přísady. Pojivem je vždy cement, jako plnivo lze použít drobné a lehké kamenivo, struska nebo popílek. Objemová hmotnost pěnobetonu bývá zpravidla 400 – 1 800 kg/m³. Pěnobeton nachází uplatnění jako výplňový beton, tedy především jako izolační nebo výplňová vrstva v podlahách nebo na střeších, lze jej také využít k vyplňování dutin.



Obr. 4 Řez pěnobetonem

Zdroj: [23]

Hlavními složkami pěnobetonu jsou cement, záměsová voda, pěnotvorná přísada – pěnidlo a případně také plnivo – drobné kamenivo, popílek nebo struska. Následně budou popsány jednotlivé suroviny pro výrobu pěnobetonu.

2.1 Cement

Základním nositelem pevnosti u cementového pěnobetonu je cementová matrice vzniklá reakcí portlandského cementu s vodou. Cement je polydisperzní partikulární anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi. Obsahuje jemně rozemletý křemičitanový slínek a přísady (sádrovec). Dále může obsahovat purolánové látky, jako granulovanou vysokopeční strusku, popílek, vápencovou moučku, lávu. [4]

2.1.1 Výroba cementu

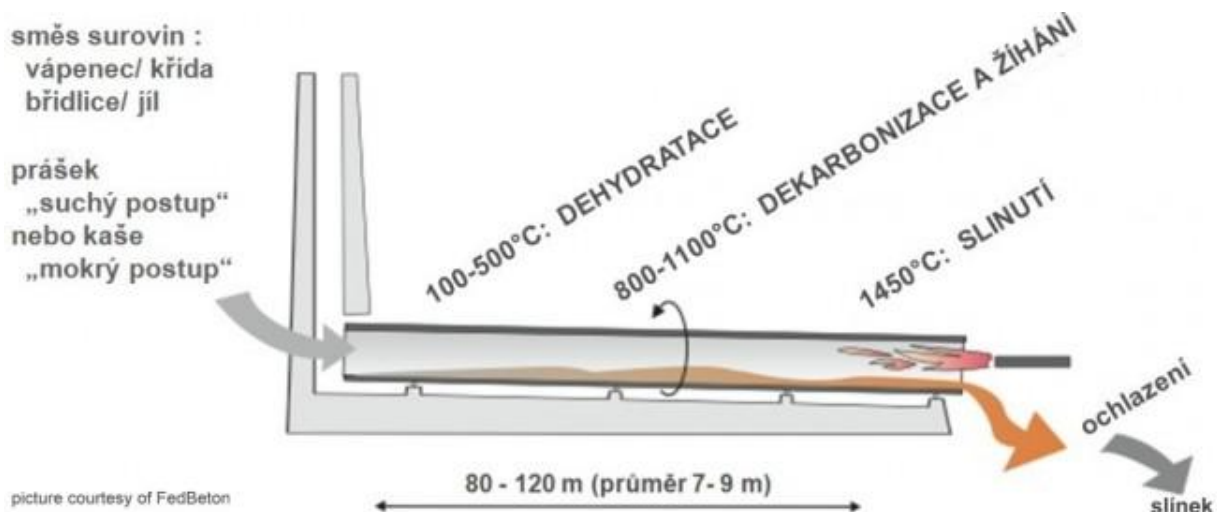
Portlandský cement je šedá práškovitá hmota z portlandského slínku, regulátoru tuhnutí ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (5 %)) a dalších látek (latentně hydraulických, pucolánů a inertních látek). Základními slinkovými minerály jsou alit, belit, trikalciumaluminát a celit. Z hlediska chemicko-mineralogického složení obsahuje portlandský slínek především oxid vápenatý (CaO) a pak hydraulické oxidy (SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3). Suroviny se většinou těží přímo z místního kamenolomu vápence. V případě nevhodného složení oxidů je třeba přidávat další složky - jíl, vápenec, železné rudy, bauxit a recyklovatelné materiály. Tato směs se pálí v rotační peci cca 100 m dlouhé. V ní teplota vzrůstá s její délkou až na přibližně 1 480 °C. Teplota je regulovaná a směs se tak spéká do hrudek. Nízká teplota způsobuje vytváření velkých spečených kusů a naopak vysoká teplota vytváří kusy taveniny nebo tekutého skla. V části pece s nízkou teplotou se CaCO_3 (vápenec) rozkládá na CaO (pálené vápno) a CO_2 (oxid uhličitý). V části pece s vysokou teplotou spolu reagují oxidy vápníku a křemíku a vytvářejí dikalcium a trikalcium silikáty (C_2S - belit, C_3S - alit). Vytváří se i menší množství trikalcium aluminátu (C_3A - celit) a tetrakalcium aluminoforit (C_4AF). Výsledkem je spečenina, hrudky - portlandský slínek (před dalším zpracováním může být skladována i několik let). Potřebná energie k výrobě polotovaru je přibližně 1700 J/g. [21] Slínek se po částečném vychladnutí drtí a poté se nechává vychladnout ve skladovacích slínkových silech. Ze skladovacích prostor se slínek průběžně odebírá a společně s přísadou 2 až 6 % sádrovce (přírodního sádrovce, sádrovcových střeptů z použitých sádrových forem, průmyslového odpadního sádrovce) se mele na definitivní jemnost, čímž vzniká jednosložkový (portlandský) cement.

Sádrovec slouží v cementu jako regulátor rychlosti tuhnutí. Ke stejnému účelu je možné použít i přírodní anhydrit, sádrovci se však většinou dává přednost. Požadavky na kvalitu sádrovce i anhydritu předepisuje ČSN 72 1206.

Kromě sádrovce se mohou (v množství nepřesahujícím 1 % z hmotnosti cementu) přidávat i vedlejší přísady, např. intenzifikátory mletí nebo hydrofobní přísady. Výsledkem závěrečné mlecí operace je jemně práškový produkt s měrným

povrchem 225 až 400 m²/kg. Je dopravován do skladovacích cementových sil, ze kterých se pak podle potřeby dávkuje buď do přepravních aut, resp. vagónů, nebo na pytlovací linku. [9]

Obr. 5 Princip cementové pece

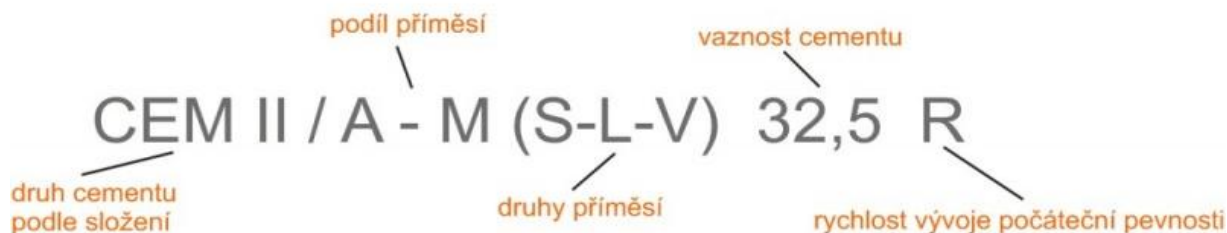


Zdroj: [24]

Výroba cementu je charakteristická vysokými teplotami a přítomností kyslíku. Při tvorbě slínkových minerálů se proto všechny zúčastněné prvky nacházejí v podobě oxidů. To umožňuje považovat oxidy za základní stavební kameny cementového slínku. [9]

2.1.2 Cement - normalizované označení

Obr. 6 Cement - normalizované značení



Cementy a jejich značení popisuje ČSN EN 197-1. Cementy se dělí z několika hledisek:

podle složení:

- CEM I - portlandský cement
- CEM II - portlandský cement směsný
- CEM III - vysokopecní cement
- CEM IV - pucolánový cement
- CEM V - směsný cement

podle množství příměsí:

- A - 6 až 20 %
- B - 21 až 35 %

podle konkrétních druhů příměsí:

- K - slínek
- S - vysokopecní struska
- D - křemičitý úlet
- P - přírodní pucolány
- V - křemičité popílky
- W - vápenaté popílky
- T - kalcinovaná břidlice
- LL, L - vápence

podle vaznosti (pevnosti):

číslo uvádí v MPa pevnost / vaznost cementu po 28 dnech.

- 32,5
- 42,5
- 52,5

podle rychlosti vývoje počátečních pevností:

- N - normální
- R - rychlý

Zdroj: [24]

2.1.3 Mechanické a fyzikální požadavky na cement

Technická norma ENV 197-1 definuje požadavky na normalizovanou (28 dní) a počáteční (2 a 7 dnů) pevnost v tlaku, počátek tuhnutí a objemovou stálost. [4] Tato norma zavádí 3 pevnostní třídy (32,5; 42,5 a 52,5 dle pevnosti v tlaku v MPa po 28 dnech zrání) cementů, značící se značkou CEM. Dále rozděluje cementy na s normálním nárůstem počátečních pevností (bez označení) a na s rychlým nárůstem počátečních pevností (za číslem označující pevnost v tlaku po 28 dnech je připojeno písmeno R, R = rapid).

Tab. 1 Mechanické a fyzikální požadavky dle ČSN EN 197-1

| Pevnostní třída | Počáteční pevnost [MPa] | Normalizovaná pevnost [MPa] | Počátek tuhnutí v minutách | Objemová stálost [mm] |
|-----------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 32,5 | > 16 (7 dnů) | od 32,5 do 52,5 | > 60 | < 10 |
| 32,5R | > 10 (2 dny) | od 32,5 do 52,5 | > 60 | < 10 |
| 42,5 | > 10 (2 dny) | od 42,5 do 62,5 | > 60 | < 10 |
| 42,5R | > 20 (2 dny) | od 42,5 do 62,5 | > 60 | < 10 |
| 52,5 | > 20 (2 dny) | > 52,5 | > 45 | < 10 |
| 52,5R | > 30 (2 dny) | > 52,5 | > 45 | < 10 |

Zdroj: [11]

2.2 Pěnotvorné přísady

Pěnobetony využívají pro snížení objemové hmotnosti pěny. Napěňovací přísada se přidá do cementového mléka a řádně se zamíchá, nebo se použije generátor pro vytvoření pěny. Pěnu lze přidat i do čerstvého betonu na staveništi. Pěnobeton obsahuje okolo 300 - 350 kg/m³ cementu portlandského nebo portlandského směsného a 70 - 90 kg/m³ pěny. Pěna je tvořena látkami ze zmýdelnatělých pryskyřic, olejů, tuků nebo hydrolyzátů bílkovin. [7] Dále jsou popsány jednotlivé pěnotvorné přísady dostupné na trzích v České republice.

2.2.1 Sircontec FN1

Pěnotvorný koncentrát Sircontec FN1 ,který do ČR dodává společnost Sircontec ze Slovenska prostřednictvím firmy TONSTAV-SERVICE, je tmavohnědá tekutina se specifickým zápachem. Složením odpovídá hydrolyzovanému proteinu stabilizovanému zinečnatou a železitou solí. Tento koncentrát není explozivní ani hořlavý a je biologicky odbouratelný. Jeho objemová hmotnost činí cca 1 124 kg/m³ a hodnota pH se pohybuje v rozmezí 6,5 až 7,5. Doporučené dávkování je 2 - 4,5 % v čisté vodě, přičemž doporučená objemová hmotnost vyrobené pěny by se měla pohybovat mezi 45 - 85 kg/m³. Použitá koncentrace má vliv na vlastnosti a objemovou hmotnost vyrobené pěny a tím i výrazný vliv na technologické vlastnosti vyrobeného pěnobetonu.

Při kombinaci pěnobetonu s plnivý, jako je třeba polystyrenová drť, je vhodné dodávat do záměsi superplastifikační a provzdušňující přísady, jako jsou např. Sircontec FS1 a FP1, které slouží k dosažení vyšších počátečních pevností a k vytvoření optimálních pórů v cementovém mléku. Tyto přísady se dávkuje samostatně v závislosti na dávce cementu. Tato směs je však známá spíše jako polystyrenbeton. [23]

2.2.2 Sika SB 2

Tato pěnotvorná přísada dodávaná firmou Sika je vhodná především pro výrobu velmi lehkých malt a lehkých betonů z normálního a lehkého kameniva (dle složení výchozí směsi lze vyrobit malty a betony s objemovou hmotností od 400 kg/m³ do 2000 kg/m³). Vzniklý objem pórů je zachován po celou dobu zpracovatelnosti díky stabilizačním přísadám. Objem betonu se nemění ani po jeho uložení (pokud se lehký beton při ukládání neovlivní čerpáním, hutněním nebo jiným způsobem). Existuje možnost s nastavením objemové hmotnosti směsi, díky dávkování 150 - 230 g / 100 l pěny. Tato pěnotvorná přísada je založena na organickém tenzidu, má bezbarvou až nažloutlou barvu. Objemová hmotnost činí 1 010 kg/m³.

U betonů s velmi nízkými objemovými hmotnostmi ($< 1000 \text{ kg/m}^3$) mohou nepříznivé vnější podmínky při výrobě vést ke ztrátě vzduchových pórů. Při výrobě lehkého betonu je třeba dbát na rovnoměrnou výchozí konzistenci, dostatečnou dobu míchání (min. 5 minut) a použití autodomíchávačů s dobrými míchačkami, jinak je lehký beton nerovnoměrný a může se zbortit. [18]

2.2.3 Sika Lightcrete L 500

Hnědá přísada v tekuté formě, založená na speciálních tenzidech a polymerech se silným provzdušněním. Příklad je perfektně rozpustná ve vodě a neškodí výztuži a kovovým částem. Může být přidána do již namíchané směsi nebo do domíchávače, je zvláště vhodná pro přípravu lehčených směsí s expandovaným polystyrénem (s objemovou hmotností menší než 900 kg/m^3) stejně tak jako pro přípravu omítacích nebo podkladových malt - přes velmi nízkou objemovou hmotnost dokáže udržet optimální přilnavost, zpracovatelnost a čerpatelnost. Spolu s cementovou maticí může vytvořit vysokou pórovitost (25 až 30 %).

Tato přísada produkovaná společností Sika je velmi jednoduše zpracovatelná, umožňuje použití ve všech běžných míchacích zařízeních nebo v domíchávačích určených pro přípravu lehčených cementových směsí. Pěnotvorný efekt probíhá již během míchání cementu a kameniva, proto není nutné žádné další vybavení, např. odstředivky, ale délka míchání je minimálně 5 minut. V případě použití jako napěňovač, se dávka pohybuje mezi 1 - $1,5 \text{ kg/m}^3$. [19]

2.2.4 Sika LPS-V

Tato přísada, opět ze sortimentu společnosti Sika, se používá speciálně pro provzdušňování silničních betonů, kde vytváří v zatvrdlém betonu vzduchové bublinky mikropórů, které přerušují sací účinek kapilárních pórů a snižují tím průnik vody do betonu. Mrznoucí voda se může v betonu bez následků rozpínat, čímž se zvyšuje odolnost vůči účinkům mrazu a rozmrazovacích solí.

Dávkování této červenohnědé tekutiny je 0,2 - 0,8 % na hmotnost cementu. Přidává se do záměsi buď společně s vodou, nebo se zamíchá až do betonové směsi. Nelze jej přidávat do suché směsi. Doba míchání by měla být minimálně 60 sekund. [20]

2.2.5 Cemex CX Isofoam 935

Tato pěnotvorná přísada je distribuována společností Cemex, ale není určena k volnému prodeji, pouze pro použití v závodech společnosti Cemex. Jedná se o čirou mírně nažloutlou tekutinu, která je určena k výrobě technické pěny za pomoci pěnogenerátoru pracujícího s atmosférickým vzduchem.

2.2.6 Mapeplast LA

Mapeplast LA je vodní roztok speciálních organických polymerů se silnou pěnivostí, který byl vyvinut ve firmě Mapei. Tato tekutá přísada hnědé barvy s pěnivým účinkem pro provzdušňování cementových směsí je určena zvláště pro výrobu snadno čerpatelné lehké malty a betonu. Její objemová hmotnost činí $1\,140 \pm 20 \text{ kg/m}^3$.

Pěnobeton vyrobený pomocí Mapeplastu La zcela zaplňuje otvory a umožňuje tak dokonalé utěsnění potrubních spojů. Dokonalým zaplňováním otvorů pěnovým betonem a maltou se zabraňuje prosakování vody, která se obvykle objeví, když se pro zaplňování používá sypká zemina nebo běžný beton. Zabraňuje usazování zásypového materiálu provozem. Směs dokonale přilne ke stěně otvoru a je stejně pevná jako okolní podklad. Během údržby nebo výměny trubek jej lze velice snadno odstranit např. lopatou.

Pěnicí účinek lze ovlivňovat dávkováním přísady a to buď hmotnostně, nebo objemově. Dávkování podle hmotnosti je 0,9 až $1,4 \text{ kg/m}^3$ směsi. Při objemovém dávkování se dávka pohybuje mezi 0,8 až $1,2 \text{ l/m}^3$ směsi. Při dávkování vyšším než $1,2 \text{ l/m}^3$ se nadměrně zvyšuje doba tvrdnutí. [16]

2.2.7 Schaumbildner 97

Tuto modrou, na tenzidech založenou homogenní tekutou přísadu vyrábí společnost Ha-Be. Slouží k přípravě pěny, z níž je možné míchat lehčený pórobeton s hustotou 400 až 2 000 kg/m³. V případě hustoty nižší než 800 kg/m³ je zapotřebí přidat lehké kamenivo. Lehčený beton vyrobený z této přísady je možné použít jako tepelnou izolaci, izolační vrstvu, vyrovnávací vrstvu a také k zasypávání vedení, potrubí a šachet. Pěnu je možné bez problémů přidávat do čerstvého betonu. Toto lze provádět v betonárce nebo v domíchávači na staveništi. Z 1 l přísady se vytvoří cca 450 - 600 l pěny. Příklad přísady Schaumbildner 97 má objemovou hmotnost 1 010 ± 20 kg/m³ při hodnotě pH 9,5 ± 1. [17]

2.2.8 Kemacon LPA

Provzdušňovací přísada - aerant pro výrobu betonů odolných mrazu a solím používaných v zimě k posypu komunikací. Zlepšuje zpracovatelnost, snižuje spotřebu záměsově vody a zvyšuje odolnost betonu vůči agresivním látkám. Používá se též pro zlepšování zpracovatelnosti malt a betonů a jako pěnidlo. Během míchání se v betonu utvoří malé vzduchové póry, které výrazně snižují nasákavost kapilár ve vyztuženém betonu a současně vytvářejí prostor pro expanzi zmrzlé vody. V čerstvém betonu způsobují vzduchové kuličky lepší zpracovatelnost.

Tato čirá světle modrá tekutina vyráběná společností Kema, má objemovou hmotnost 1 010 ± 20 kg/m³. Dávkuje se dle požadovaného obsahu vzduchových pórů nejčastěji v rozmezí 0,05 až 0,4 % hmotnosti cementu, maximálně však 0,8 % hmotnosti cementu. Příklad přísady se dodává do betonové směsi společně se záměsovou vodou. Obsah pórů v betonové směsi závisí mj. na teplotě, obsahu jemné frakce, použití dalších dodatků v betonové směsi a době míchání. Proto se při betonáži doporučuje dodatečná kontrola obsahu pórů. [15]

2.2.9 Foam GA 285

Foam GA 285 je syntetická pěnotvorná přísada od společnosti Basf, která se hodí pro výrobu lehkého betonu a běžné nebo lehké čerstvé malty. Vytváří pěnu, díky níž v betonu vznikne celistvá, stabilní a jemná struktura vzduchových pórů, přičemž objem a struktura pórů se při správném použití v betonu nemění. Pomocí různého množství pěny lze vyrobit lehké betony objemových hmotností 400 – 1 600 kg/m³. Tyto betony se vyznačují nízkou objemovou hmotností, tepelnou a zvukovou izolací.

Tato světle žlutá čirá tekutina má objemovou hmotnost 1 120 kg/m³. Foam GA 285 tvoří směs anionických a neionických tensidů. Doporučené dávkování je 5 ml na 1 kg cementu. Příklad je určena pro výrobu pěny pomocí napěňovací pistole nebo pěnotvorného zařízení. Před realizací je nezbytné provést průkazní zkoušky.

Z 1,5 - 2,0 kg této pěnotvorné přísady smíchané s vodou v poměru 1 : 25 lze vyrobit cca 1 m³ pěny. Hmotnost pěny je 40 - 60 kg/m³. [14]

2.2.10 Darex AE S 45

Tento pěnotvorný koncentrát je dodávaný na náš trh společností Bauchemia T. B. Je určen k přípravě lehkých malt a betonů o velmi nízké objemové hustotě. Jedná se o syntetický koncentrát, který je v poměru 1 : 40 míchán s vodou v pěnotvorném generátoru. Tento roztok je následně napěňován stlačeným vzduchem, čímž vznikne technická pěna, která je následně dávkována do již namíchané malty. Takto namíchaný pěnobeton slouží k jako výplňový materiál kolem kanálových konstrukcí v podzemí a dále jako náhrada tepelné izolace v konstrukcích plochých střech a podlah.

Jedná se o světle žlutou kapalinu založenou na tenzidech. pH se pohybuje kolem hodnoty 9,5. Objemová hmotnost koncentráту je 1 010 ± 20 kg/m³. Z 1 kg koncentráту lze namíchat cca 600 l technické pěny při objemové hmotnosti 60 - 70 kg/m³. [13]

2.3 Záměsová voda

I když se voda nepovažuje za stavební materiál, je významnou součástí betonu i pěnobetonu. Voda je nutná k tomu, aby proběhl hydratační proces. Pro vlastní hydratační proces je třeba jen asi 19 až 23 % vody z hmotnosti cementu. Tato minimální dávka zajistí přeměnu slínekových minerálů z cementu v hydrokřemičitany a hydrohlinity. Množství vody přidávané k betonové směsi se vyjadřuje tzv. vodním součinitelem, což je poměr hmotnosti vody ku hmotnosti cementu a značí se:

$$w = u / c$$

Praktická hodnota vodního součinitele se pohybuje od 0,35 do 0,90. Přebytečná vypařená volná voda z tvrdnoucího betonu zanechává po sobě v betonu póry a dutinky, což má za následek snížení objemové hmotnosti, ale hlavně snižuje hutnost a tím pevnost. [1] U pěnobetonu je však snížení objemové hmotnosti a tím i hutnosti důležité. Zde se pohybuje hodnota vodního součinitele v rozmezí od 0,50 do 0,70 v závislosti na použití plastifikační přísady.

Požadavky na vodu, která je vhodná pro výrobu betonů, jsou stanoveny technickou normou 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. Tato norma je českou verzí evropské normy EN 1008:2002 a v květnu 2003 nahradila původní normu ČSN 73 2028 z 26. 9. 1962.

Obecně platí, že při výrobě betonu lze použít vodu, která je označena jako pitná, pokud to není voda minerální. Musí to být tedy voda čistá, bez chemických a organických příměsí. Vody ze studní, nádrží, řek a potoků je nutné před použitím prověřit. Na nevhodnost vody může upozornit již vizuální znečištění, kalnost, zápach. Základním požadavkem na záměsovou vodu je také hodnota pH, kterou jde jednoduše zjistit pomocí indikátorových papírků. Minimální přípustná hodnota pH je 4, silně zásadité vody jsou také nevhodné. Při chemickém rozboru je nutné zjistit množství síranů, chloridů a hořečnatých iontů, jejichž maximální přípustné hodnoty jsou uvedeny právě v normě ČSN EN 1008. V praxi je často vhodnější, než provádění chemických rozborů, přistavení cisterny s pitnou vodou přímo na místo. Pro výrobu

pěnobetonu není vhodná recyklovaná voda z již jednou použité záměsi. Recyklovaná voda obsahuje velmi jemné částice, které by ucpaly jemné póry ve struktuře pěnobetonu, které jsou při jeho výrobě žádoucí.

Požadavky jsou také kladeny na teplotu použité záměsové vody. Pro běžné použití se má teplota záměsové vody pohybovat v rozmezí 15 až 30 °C. V letním období při vysokých teplotách má být co nejnižší a v zimě naopak co nejteplejší. Neměla by klesnout pod 5 °C. [1]

2.4 Plniva a příměsi

Pěnobeton lze vyrobit zcela bez přítomnosti plniv. V případě použití anorganických plniv se nejčastěji jedná o hutné kamenivo frakce 0 – 4 mm nebo o pórovité kamenivo frakce 1 – 4 mm a 4 – 8 mm. Jako organické plnivo se používá polystyrenová drť. Použije-li se při výrobě pěnobetonu cement CEM I, je vhodné přidat popílek a mletou strusku jednak pro zlepšení vlastností pěnobetonu a také z ekonomického hlediska.

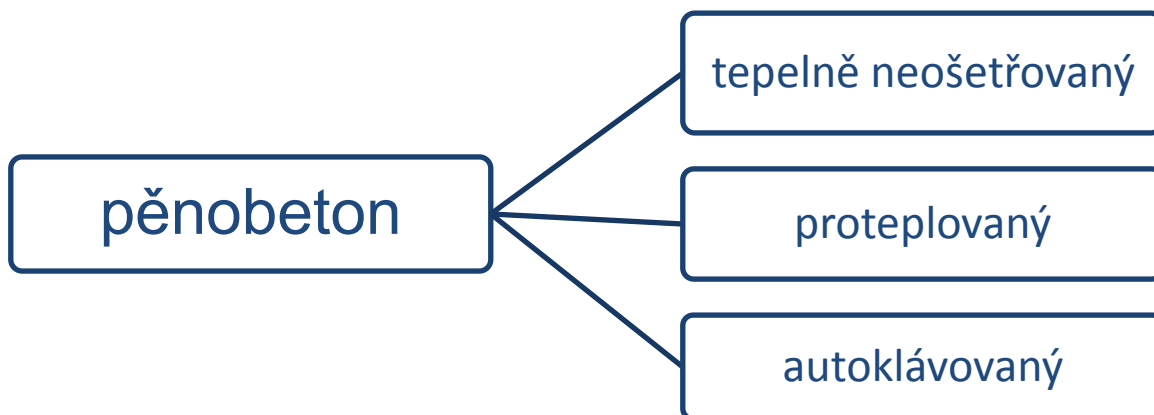
3. Technologie výroby pěnobetonu

Vytvořením pěny pomocí pěnotvorné přísady a zamícháním s ostatními složkami betonu vznikne pěnobeton. Používají se dva technologické postupy výroby pěnobetonu:

- pěnotvorná přísada se dávkuje přímo do míchačky s nuceným oběhem a tak se vytvoří až 20 % objemu pórů,
- pěna se vyrobí ve zvláštní míchačce a zamíchá se do čerstvého betonu až na staveništi, tak lze dosáhnout více než 20 % objemu pórů v betonu. [4]

Tepelně neošetřované (tvrdnoucí za normálních podmínek) pěnobetony se používají převážně tam, kde by proteplování či použití autoklávů bylo výrobně neekonomické či spíše zcela neproveditelné, týká se to převážně výrobků připravovaných přímo na staveništích. Proteplování a autoklávů můžeme využít u výroby prefabrikovaných dílců a tvárnic.

Obr. 7 Přehled pěnobetonů



Zdroj: [1]

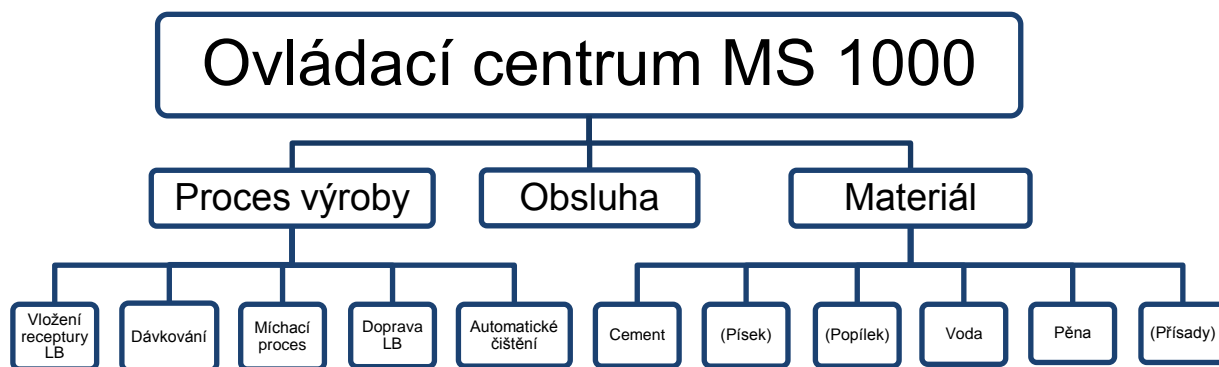
Pěnobeton lze tedy vyrábět buď přímo na staveništi v mobilním výrobním zařízení nebo ve speciální výrobě – stabilní betonárně.

3.1 Výroba pěnobetonu v mobilním výrobním zařízení

Za pomoci mobilní mísicí a zároveň čerpací stanice, jakou je např. Sircontec MS 1000, lze požadované množství o dané receptuře namíchat přímo na stavbě, přičemž maximální objem jedné záměsi je 1 m³. Toto míchací zařízení je připevněno k brzděnému dvouosému podvalníkovému podvozku a je možné ho volně převážet po komunikacích za dodávkovými či nákladními vozy. U těchto mísicích stanic existuje celá řada způsobů dopravy a dávkování cementu či rovnou předem připraveného čerstvého cementového mléka do míchací komory.

Po příjezdu na staveniště musí být mobilní míchací zařízení zabezpečeno proti posunu a zaaretováno ve vodorovné pozici, poté připojeno na vodovodní řadu a na elektrickou přípojku 380 V, s jističem třídy C min. 32,5 A. Výroba pěnobetonu na mobilním zařízení Sircontec MS 1000 spočívá v zadání receptury do paměti řídicího počítače. Následující schéma znázorňuje proces výroby pěnobetonu v mobilním výrobním zařízení Sircontec MS 1000 od vložení receptury, dávkování, míchací proces a dopravu až k automatickému čištění – propláchnutí stroje a hadic po ukončení výroby. Materiál zahrnuje cement, záměsovou vodu a pěnотvorný koncentrát. Lze přidávat dle potřeby i kamenivo frakce 0 – 4 mm nebo popílek, popřípadě přísady.

Obr. 8 Schéma betonárny Sircontec MS 1000



Zdroj: [23]

Obsluha stroje spustí program, stroj si sám začne dávkovat záměsovou vodu a obsluha během tohoto cyklu manuálně či pomocí šnekového dopravníku nadávkuje cement.

Obr. 9 Ruční dávkování cementu do výrobního zařízení Sircontec MS 1000



Následně obsluha přepne na další cyklus, ve kterém je do bubnu míchačky dávkována již vyrobená pěna, která je vyráběna pěnogenerátorem. Pěnogenerátor je připojen jedním vstupem na čerpadlo s vodou a druhým vstupem do nádoby s pěnotvorným koncentrátem, který je nasáván pomocí podtlaku proudící vody, se kterou je smícháván na požadovanou koncentraci. Tato směs je za pomoci stlačeného vzduchu napěněna. Vzniklá hustá technická pěna se pro větší přesnost dávkuje do bubnu míchačky časově. Počítač po skončení dávkování technické pěny a následném domíchání směsi zastaví lopatky v bubnu míchačky, změní směr otáčení lopatek a tím dojde k usměrňování směsi k výpustnímu ventilu, který je gumovou hadicí připojen ke šnekovému čerpadlu na boku výrobní plošiny. Tímto čerpadlem je poté směs tlačena skrze 50 mm gumové hadice. Horizontální

a vertikální vzdálenost, na kterou je možné pěnobeton čerpat, závisí především na konzistenci směsi, délce hadic a výkonu čerpadla.

Obr. 10 Mobilní výrobní zařízení Sircontec MS 1000



Zdroj: [23]

3.2 Výroba pěnobetonu ve stabilním výrobním zařízení

Stabilní výrobní zařízení je nejčastěji umístěno ve stacionární betonárně a výroba je založena na obdobném principu jako výroba v mobilním zařízení. Pro srovnání uvádím výrobu pěnobetonu na brněnské betonárně patřící společnosti CEMEX. Obsluha betonárny nastaví množství záměsové vody a navážku pojiva, případně plniva, příměsí a přísad, pokud není technická pěna vyráběna pěnogenerátorem. Dle nastavené receptury se jednotlivé složky naváží do stacionárního bubnu míchačky. Po smíchání vznikne jemnozrná malta, která se přes výpusť přesune do přistaveného autodomíchávače. Protože stacionární betonárny nedisponují míchacími bubny, které by dosahovaly objemu autodomíchávačů, bývá v míchačce, pokud to její velikost umožňuje, namíchána všechna cementová malta najednou. Aby autodomíchávač čekající na doplnění technické pěny nezdržoval zbylý provoz betonárky (může to trvat několik minut), bývá pěnogenerátor umístěn mimo prostor bubnu míchačky. V popisovaném případě je pěnogenerátor umístěn na rampě recyklačního zařízení.

Na betonárnách se používají dva základní typy pěnogenerátorů, které se rozdělují podle druhu vzduchu, kterým je pěna vytvářena – atmosférický či stlačený vzduch. Společnost Cemex disponuje pěnogenerátorovou tryskou dodanou společností Sika, která funguje na principu atmosférického vzduchu. Tato tryska je připojena na vodovodní řad a nádobu s pěnotvornou přísadou, která je vlivem proudící vody nasávána a smíchávána s proudící vodou. Stejným způsobem je o pár milimetrů dále přisáván vzduch, který vzniklý koncentrát napěňuje. Mezi hlavní výhody tohoto řešení patří absence jakékoliv elektroniky u pěnogenerátoru, ale nebezpečí hrozí v kolísání tlaku ve vodovodním řadu.

Autodomíchávač poté převezve zamíchanou směs cementové malty a technické pěny na místo určení. Dodávku na místo pokládky zajišťuje dopravníkový systém, nejčastěji v podobě mobilního šnekového čerpadla čerstvých betonových či anhydritových směsí, jako je např. Putzmeister SP 20DHF.

Obr. 11 Pěnogenerátor užívaný společností Cemex na betonárně v Brně



Obr. 12 Přečerpávání pěnobetonu z autodomíchávače na místo pokládky



Stabilní výrobní stanice nejčastěji využívají společnosti zabývající se výrobou tepelně izolačních tvarovek, kde je cementový pěnobeton využíván zcela jako nosná matrice výrobku či jako tepelně izolační výplň do již předem vyrobené skořepiny z vibrolisovaného betonu. Lze také použít jen část z této výrobní stanice, jde především o technologii výroby samotné pěny, kdy toto zařízení je jen pouhým doplňkem k běžné míchací soupravě v klasických výrobních betonových směsích.

Oproti tomu mobilní výrobní stanice používají nejčastěji podlahářské společnosti, které používají cementový pěnobeton jako náhradu či doplněk k deskovým tepelně izolačním materiálům na bázi polystyrenů a minerální vaty.

4. Receptury na výrobu pěnobetonu

Aby bylo vždy dosaženo stejné kvality pěnobetonu, musí být tak jako u výroby jakéhokoliv jiného betonu dodržen poměr dávkování jeho jednotlivých složek, tzv. receptura. Každá receptura by měla být ověřena nejprve experimentálně a pak teprve vyzkoušena v praxi za provozu.

V následující tabulce jsou uvedeny receptury pěnobetonu dle společnosti Sircontec s pěnотvorným koncentrátem FN1, a to pro objemové hmotnosti 350 – 800 kg/m³.

Tab. 2 Receptury dle společnosti Sircontec

| Modifikace CLC - Sircontec | | | PBG 35 | PBG 40 | PBG 45 | PBG 50 | PBG 60 | PBG 80 |
|---|----------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Objemová hmotnost (uměle vysušené) | [kg/m ³] | | 350 | 400 | 450 | 500 | 600 | 800 |
| Cement Portland CEM - 32,5 R | [kg] | | 275 | 300 | 340 | 380 | 300 | 315 |
| Písek | [kg] | | 0 | 0 | 0 | 0 | 220 | 410 |
| Příměs | [kg] | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Voda do záměsi | [kg] | | 137 | 150 | 161 | 172 | 116 | 118 |
| Množství pěny | [l] | | 775 | 754 | 730 | 706 | 706 | 629 |
| Voda v pění | [kg] | | 45 | 44 | 42 | 41 | 41 | 36 |
| Vlákno | FV1 | [kg] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Pěnотvorný koncentrát | FN1 | [kg] | 1,76 | 1,71 | 1,66 | 1,60 | 1,60 | 1,43 |
| superplastifikátor | FS1 | [l] | 0,9 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,2 | 1,6 |
| Poměr H ₂ O/CEM | | | 0,66 | 0,65 | 0,60 | 0,56 | 0,52 | 0,49 |
| Pevnost v tlaku R _c | [N/mm ²] | [MPa] | 0,45 | 0,7 | 1 | 1,2 | 1,5 | 3 |
| Součinitel tepelné vodivosti λ (průměr) | [W/m·K] | | 0,08 5 | 0,09 0 | 0,10 0 | 0,11 0 | 0,17 0 | 0,200 |

Zdroj: [23]

Receptury pěnobetonů o objemových hmotnostech ve vysušeném stavu v rozmezí 150 - 350 kg/m³ jsou vypočteny v tabulce č. 7. Jako napěňovací přísada je v těchto recepturách použita Sika SB 2. Je použit plastifikátor Chrysoplast 460 z důvodu snížení množství záměsové vody, a tím dochází ke snížení celkové objemové hmotnosti.

Tab. 3 Receptury dle teoretických výpočtů

| Návrh složení receptury na 1 m ³ | | | |
|---|---|-----------------------|-----------------------|
| Složka | Návrh složení dle objemové hmotnosti ve vysušeném stavu | | |
| | 150 kg/m ³ | 225 kg/m ³ | 270 kg/m ³ |
| CEM I 42,5 R Mokrý | 135 kg | 210 kg | 250 kg |
| voda | 54 kg | 95 kg | 125 kg |
| Chrysoplast 460 | 75 ml | 50 ml | - |
| pěna (SIKA SB2) | 70 kg (voda) | 66 kg (voda) | 62 kg (voda) |
| | 1,8 kg (pěnidlo) | 1,7 kg (pěnidlo) | 1,6 kg (pěnidlo) |

Výše uvedené receptury jsou spočítány čistě teoreticky, nebyly ověřeny v praxi. Pěnobetony o objemových hmotnostech nižších než 300 kg/m³ se prakticky téměř nepoužívají.

V tabulce č. 4 jsou uvedeny jednotlivé druhy cementu a jejich vhodnost či nevhodnost pro výrobu pěnobetonu (PBG) a polystyrenbetonu (PsB) dle společnosti Sircontec. Nejvíce je doporučován směsný portlandský cement CEM II/A z důvodu nižší ceny a nižšího vývoje hydratačního tepla.

Tab. 4 Cementy pro výrobu pěnobetonů (PBG) a polystyrenbetonů (PsB)

| | |
|------------|---|
| CEM I | V nevyhnutelných případech možné použití při teplotě podkladu 0 - 8 °C, dávku zvýšit o 10 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM II/A-S | Vhodný pro výrobu PBG a PsB za obvyklých podmínek |
| CEM II/B-S | Vhodný pro výrobu PBG a PsB za obvyklých podmínek |
| CEM II/A-D | Použitelný pro PBG a PsB za obvyklých podmínek, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti |
| CEM II/A-P | Použitelný pro PBG a PsB za obvyklých podmínek, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti |
| CEM II/B-P | Použitelný pro výrobu PsB při teplotě podkladu a atmosféry nad + 15 °C, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti, dávku zvýšit o 10 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM II/A-Q | Použitelný pro PBG a PsB za obvyklých podmínek, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti |
| CEM II/B-Q | Použitelný pro výrobu PsB při teplotě podkladu a atmosféry nad + 15 °C, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti, dávku zvýšit o 10 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM II/A-V | Použitelný pro PBG a PsB za obvyklých podmínek, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti |
| CEM II/B-V | Použitelný pro výrobu PsB při teplotě podkladu a atmosféry nad + 15 °C, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti, dávku zvýšit o 15 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM II/A-W | Použitelný pro PBG a PsB za obvyklých podmínek, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti |

| | |
|-------------|---|
| CEM II/B-W | Použitelný pro výrobu PsB při teplotě podkladu a atmosféry nad + 15 °C, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti, dávku zvýšit o 10 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM II/A-T | Použitelný pro PBG a PsB za obvyklých podmínek, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti |
| CEM II/B-T | Použitelný pro výrobu PsB při teplotě podkladu a atmosféry nad + 15 °C, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti, dávku zvýšit o 10 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM II/A-L | Použitelný pro PBG a PsB za obvyklých podmínek, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti |
| CEM II/B-T | Použitelný pro výrobu PsB při teplotě podkladu a atmosféry nad + 15 °C, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti, dávku zvýšit o 10 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM II/A-LL | Použitelný pro PBG a PsB za obvyklých podmínek, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti |
| CEM II/B-LL | Použitelný pro výrobu PsB při teplotě podkladu a atmosféry nad + 15 °C, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti, dávku zvýšit o 10 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM II/A-M | Použitelný pro PBG a PsB za obvyklých podmínek, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti |
| CEM II/B-M | Použitelný pro výrobu PsB při teplotě podkladu a atmosféry nad + 15 °C, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti, dávku zvýšit o 10 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM III/A | V krajním případě použitelný pro výrobu PsB při teplotě podkladu a atmosféry nad + 15 °C, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti, dávku zvýšit o 20 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM III/B | Nevhodný |
| CEM III/C | Nevhodný |
| CEM IV/A | V krajním případě použitelný pro výrobu PsB při teplotě podkladu a atmosféry nad + 15 °C, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti, dávku zvýšit o 10 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM IV/B | V krajním případě použitelný pro výrobu PsB při teplotě podkladu a atmosféry nad + 15 °C, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti, dávku zvýšit o 15 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM V/A | V krajním případě použitelný pro výrobu PsB při teplotě podkladu a atmosféry nad + 15 °C, možné zpomalení náběhu pochozí pevnosti, dávku zvýšit o 20 % oproti Výrobnímu postupu |
| CEM V/B | Nevhodný |

Zdroj: [23]

Pro výrobu PBG a PsB Sircontec se doporučuje přednostně používat cementy s koncovým označením R a minimální pevnostní třídou 32,5.

5. Použité laboratorní zkoušky

5.1 Pevnost v tlaku

U stavebních materiálů je pevnost v tlaku považována za jednu z nejdůležitějších mechanických vlastností. V závislosti na použití materiálu se zjišťuje pevnost v tlaku po 2, 7, 14 a 28 dnech, přičemž hodnota po 28 dnech je směrodatná při navrhování betonových konstrukcí.

Na dosažení optimálních pevností daného druhu pórobetonu má hlavní vliv druh použitých surovin, složení výrobní směsi, způsob zpracování, a obsah vlhkosti. [2] Pevnost v tlaku je nejdůležitější mechanickou vlastností pórobetonů. Závisí především na hodnotě pórovitosti, velikosti pórů, jejich rozdělení a na pevnosti stěn makropórů. Nejsnadněji je možno sledovat vliv těchto činitelů nepřímo jako závislost na objemové hmotnosti. Pevnost pórobetonů je dále závislá na obsahu jejich vlhkosti, na směru působení síly, ale také na tvaru a velikosti zkušebních těles. [2]

Pevnost v tlaku R_c je mezní napětí při největším zatížení F_c , které snese zkušební těleso při zkoušce tlakem, vztahované na plochu počátečního průřezu A_0 .

$$R_c = \frac{F_c}{A_0} \quad [Pa, MPA]$$

Na rozdíl od pevnosti v tahu, je nutno při vyšetřování tělesa uvážit některé okolnosti. U štíhlých tlačených prvků s velkým poměrem délky ku nejmenšímu příčnému rozměru a rovněž tak u tenkostěnných částí prvků, v nichž dochází k napětí v tlaku i při jiných způsobech namáhání, je únosnost prvku vyčerpána ztrátou stability a ne pevností v tlaku. Příslušné kritické napětí se podle dřívějších zvyklostí někdy nazývá vzpěrná pevnost. Z těchto důvodů se proto zkouší pevnost v tlaku na vzorcích o malé štíhlosti. Přitom dochází k ovlivnění čel vzorku tlačnými deskami zkušebního lisu, které brání volnému příčnému roztahování vzorku. Dochází ke značnému tření mezi vzorkem a deskou lisu a tím k příčnému sevření, a proto také je např. pevnost v tlaku zjišťována na krychlích, tzv. pevnost krychelná $R_{c\ cu}$ vyšší než na hranolech – pevnost hranolová $R_{c\ pr}$ nebo na válcích - pevnost válcová $R_{c\ cy}$. Poměr délky

ku příčnému rozměru bývá u hranolů minimálně 3 : 1, u válců pak 2 : 1. Mimo to je hodnota pevnosti v tlaku ovlivněna i velikostí zkušební vzorku tak, že u menších rozměrů vzorků je pevnost vyšší. Proto se udává i rozměr zkušební vzorku (v ČSN ISO 4012 pro zkušební pevnosti betonu v tlaku je předepsána základní krychle o hraně 150 mm). [1]

5.2 Objemová hmotnost ρ_v

Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] – zdánlivá hustota – poměr hmotnosti tělesa ku objemu tělesa (stanovený z vnějších rozměrů) neboli hmotnost objemové jednotky materiálu i s dutinami a póry. Vnější rozměry tělesa lze stanovit měřením (u pravidelných těles) nebo pomocí tzv. hydrostatického vážení (u těles s nepravidelnými tvary). Tento způsob využívá platnosti Archimédova zákona. [22] Z rozdílu hmotností tělesa nasyceného vodou váženého na vzduchu a pod vodou se stanoví hmotnost kapaliny, kterou těleso vytlačilo. Protože známe hustotu kapaliny, můžeme vypočítat její objem. Z Archimédova zákona vyplývá, že tento objem je stejný jako objem ponořeného tělesa. Objemovou hmotnost vypočteme jako poměr hmotnosti vysušeného tělesa a stanoveného objemu. [22]

Objemová hmotnost je veličina závislá na vlhkosti materiálu. U materiálů s malou pórovitostí jsou hodnoty hustoty a objemové hmotnosti téměř totožné. V případě materiálů s velkou pórovitostí (tedy i v případě pěnobetonu) je objemová hmotnost (v suchém stavu) vždy menší než hustota.

5.3 Součinitel tepelné vodivosti λ

V nynějším moderním světě, kde neustále slyšíme o zbytečném plýtvání energetickými zdroji a nerostnými surovinami, je každá snaha o zvýšení účinnosti a šetření energiemi brána velice pozitivně. U stavebních materiálů jsou jedním z nejdůležitějších ukazatelů, které poukazují na úsporu energie, jejich tepelně-izolační vlastnosti, které nejvíce vystihuje součinitel tepelné vodivosti λ . Součinitel tepelné

vodivosti λ vyjadřuje množství tepla, které projde za ustáleného teplotního stavu za časovou jednotku zkoušenou látkou jednotkovou plochou a jednotkové tloušťce při rozdílu povrchových teplot 1 K. [10]

Stanovení součinitele tepelné vodivosti lze provádět v praxi několika základními způsoby, které se od sebe liší jednak teplotním stavem zkušební vzorku během měření a dále způsobem stanovení a vyhodnocení součinitele tepelné vodivosti zkušební vzorku. Metody lze tedy obecně rozdělit na:

1. **Stacionární metody** (Metoda desky, Metoda chráněné teplé desky, Metoda měřidla tepelného toku, Metoda válce, Metoda koule)
2. **Nestacionární metody** (Metoda nestacionárního tepelného toku, Metody tepelných impulsů- Metoda horkého drátu (Hot Wire Method), Záblesková metoda (Laser Flash Method), Ostatní metody tepelných impulsů.

Stacionární metody stanovení hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] vycházejí ze vztahu:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{(\theta_1 - \theta_0) \cdot S \cdot \tau}$$

kde:

Q...množství prošlého tepla [J],

θ_0, θ_1 ...teplota horní, resp. spodní roviny desky [$^{\circ}\text{C}$],

d...tloušťka desky [m],

S...průřez [m^2],

τ ...čas [s]. [6]

Stacionární stav je základním, při kterém je v měřeném vzorku ustálený teplotní stav, který blíže vyplývá z Fourierovy rovnice:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = a \cdot \frac{d^2\theta}{dx^2} \quad \left| \frac{d\theta}{d\tau} = 0 \right.$$

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = 0$$

$$q = -\lambda \cdot \frac{d\theta}{dx}$$

Zdroj: [10]

Vzhledem k tomu, že stacionární stav není při běžných podmínkách prakticky dosažitelný, považuje se za stacionární takový stav, kdy změna teploty je za daný časový úsek menší než smluvně definovaná teplotní změna (dle ČSN 72 7010).

$$\frac{d\theta}{d\tau} \leq \Delta T_{max} \quad |\Delta\tau = konst.$$

U stacionárních metod je nezbytné zajistit ustálený tepelný tok procházející od teplejšího povrchu měřeného vzorku k chladnějšímu povrchu vzorku. Potom lze z rozdílu teplot, plochy vzorku a tloušťky vzorku vypočítat hodnotu součinitele tepelné vodivosti λ .

Z noremního přehledu stacionární metoda vychází z obecně platných zásad. Předně je to definice ustáleného tepelného stavu, pro který se požaduje, aby nedocházelo ve vztažné části vzorku k časové změně hustoty tepelného toku větší, než stanovují závazné požadavky pro zkušební normy. Vztažnou částí vzorku se dle této normy rozumí ta část vzorku, kterou protéká tepelný tok Φ [W], uvažovaný při vyhodnocení součinitele tepelné vodivosti λ . [6]

Na rozdíl od stacionárních metod je měření nestacionární metodou založeno na sledování dynamického vývoje teplot. Nestacionární metody však nepožadují ustálený teplotní stav, nýbrž se sleduje průběh šíření teplotní vlny měřeným vzorkem. Na základě různého způsobu sledování nestacionárního vývoje během měření potom existuje řada variant pro stanovení hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ . [6]

6. Vlastnosti pěnotvorných přísad

Tato část bakalářské práce je zaměřena na zkoušení vydatnosti a poločasu odlučnosti pěny u pěnotvorných přísad dostupných na českém trhu. Pro objektivnost byla všechna pěnidla odzkoušena za shodného poměru vody a pěnidla, 90 ml : 10 ml. Vznikl tedy 10% koncentrát. Všechny byly zamíchány stejným ručním mixérem s nástavcem uzpůsobeným pro vnášení vzduchu do směsi.

Obr. 13 Výroba technické pěny ručním mixérem



6.1 Vydátnost pěny

Tato zkouška je zaměřena na konečný objem technické pěny, který vznikne po cca dvouminutovém intenzivním míchání zkoušeného koncentrátu (100 ml). Současně se na vzniklé technické pěně změří objemová hmotnost.

6.2 Číslo napěnění

Toto bezrozměrné číslo značené jako N_f , vyjadřuje poměr objemu technické pěny vytvořené z daného objemu roztoku napěňovací přísady. Spočítá se dle vzorce:

$$N_f = V_f / V_l$$

kde:

N_f ...číslo napěnění [-]

V_f ...objem pěny [l]

V_l ...objem tekutiny potřebné k napěnění objemu pěny [l]

6.3 Poločas odloučivosti pěny

Jde o čas, za který se z namíchané technické pěny odloučí zpět na původní koncentrát právě polovina koncentrátu, v tomto případě 50 ml.

6.4 Praktické ověření vlastností technické pěny

Následují tabulky s provedenými měřeními na pěnotvorných přísadách Sircontec FN1, Sika SB2, Sika Lightcrete L 500, Sika LPS – V a Cemex CX Isofoam 935. Tato měření byla stanovena pro koncentrace 10 % a 2,5 %. S těmito roztoky byly provedeny výše popsané zkoušky.

Tab. 5 Vydatnost pěny a poločas odloučivosti pěny při 10% koncentraci

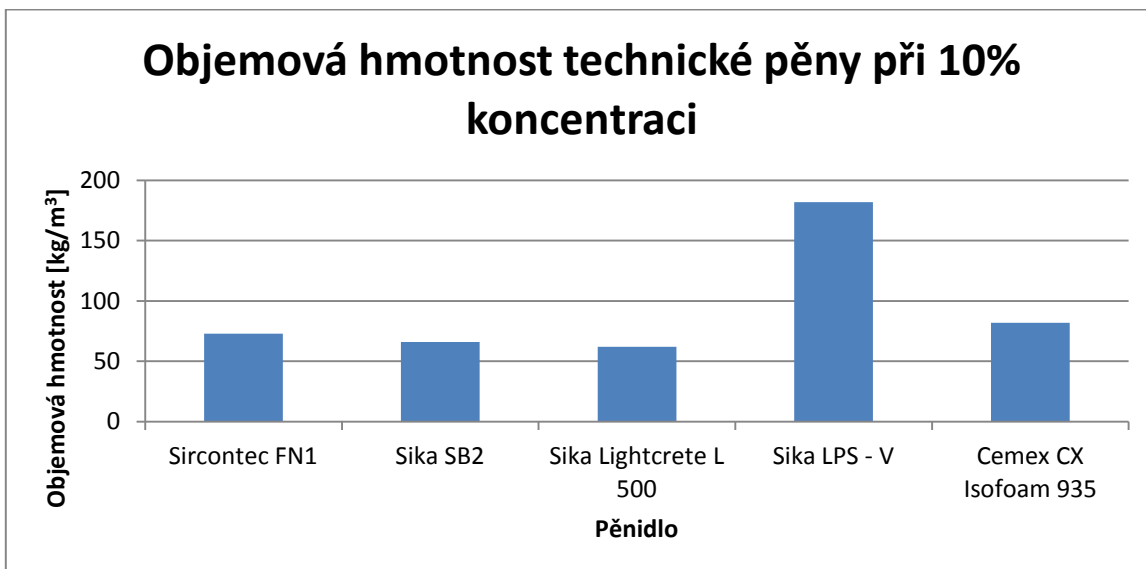
| Naměřené hodnoty pro stanovení vydatnosti a poločasu odloučivosti technické pěny vyrobené ručním šlehačem za podílu 10 ml pěnidla a 90 ml vody (10% koncentrace) | | | | |
|--|--------------------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Pěnidlo | Vydatnost pěny | | Poločas odloučivosti pěny | |
| | Objem namíchané pěny [l] | Hmotnost namíchané pěny [g] | Objem odloučeného koncentrátu [ml] | Doba při odečtu hodnot [min] |
| Sircontec FN1 | 1,34 | 98 | 24 | 60 |
| Sika SB2 | 1,50 | 99 | 43 | 36 |
| Sika Lightcrete L 500 | 1,65 | 102 | 82 | 50 |
| Sika LPS - V | 0,50 | 91 | 50 | 10 |
| Cemex CX Isofoam 935 | 1,20 | 99 | 18 | 70 |

Tab. 6 Objemová hmotnost, číslo napěnění a poločas odloučivosti při 10% koncentraci

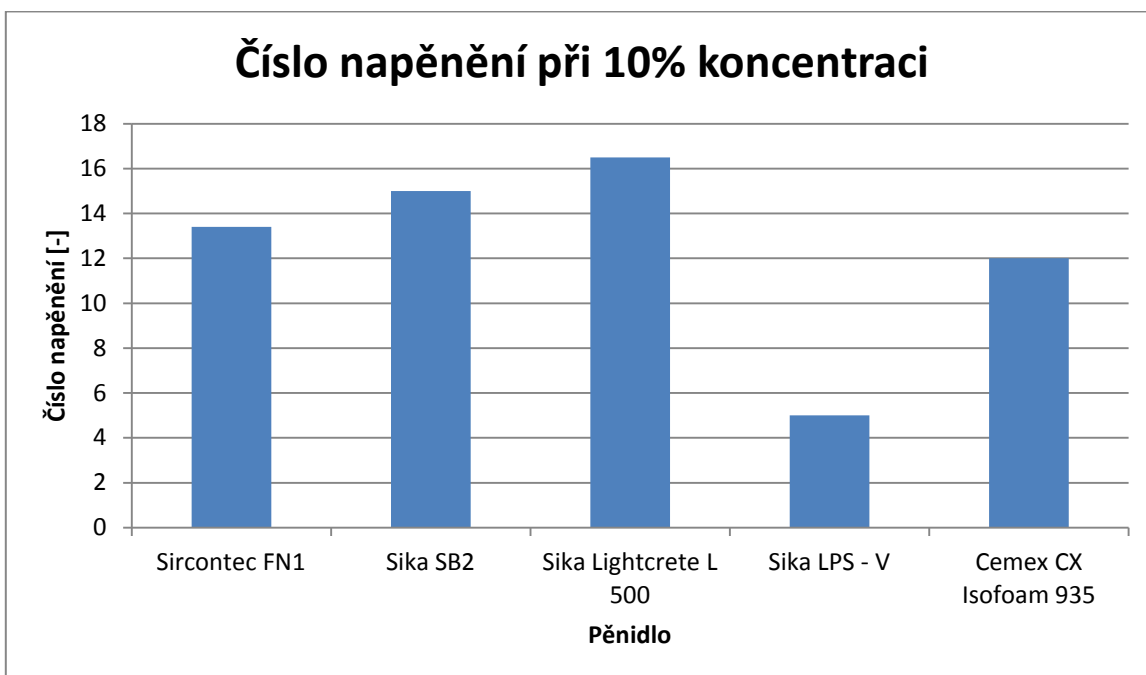
| Spočítané hodnoty objemové hmotnosti a poločasu odloučivosti technické pěny vyrobené ručním šlehačem za podílu 10 ml pěnidla a 90 ml vody (10% koncentrace) | | | |
|---|---|--------------------|---------------------------------|
| Pěnidlo | Objemová hmotnost pěny [kg/m ³] | Číslo napěnění [-] | Poločas odloučivosti pěny [min] |
| Sircontec FN1 | 73 | 13,4 | 125 |
| Sika SB2 | 66 | 15,0 | 42 |
| Sika Lightcrete L 500 | 62 | 16,5 | 30 |
| Sika LPS - V | 182 | 5,0 | 10 |
| Cemex CX Isofoam 935 | 82 | 12,0 | 194 |

Údaje z tabulek č. 5 a 6 jsou převedeny do grafů č. 1, 2 a 3.

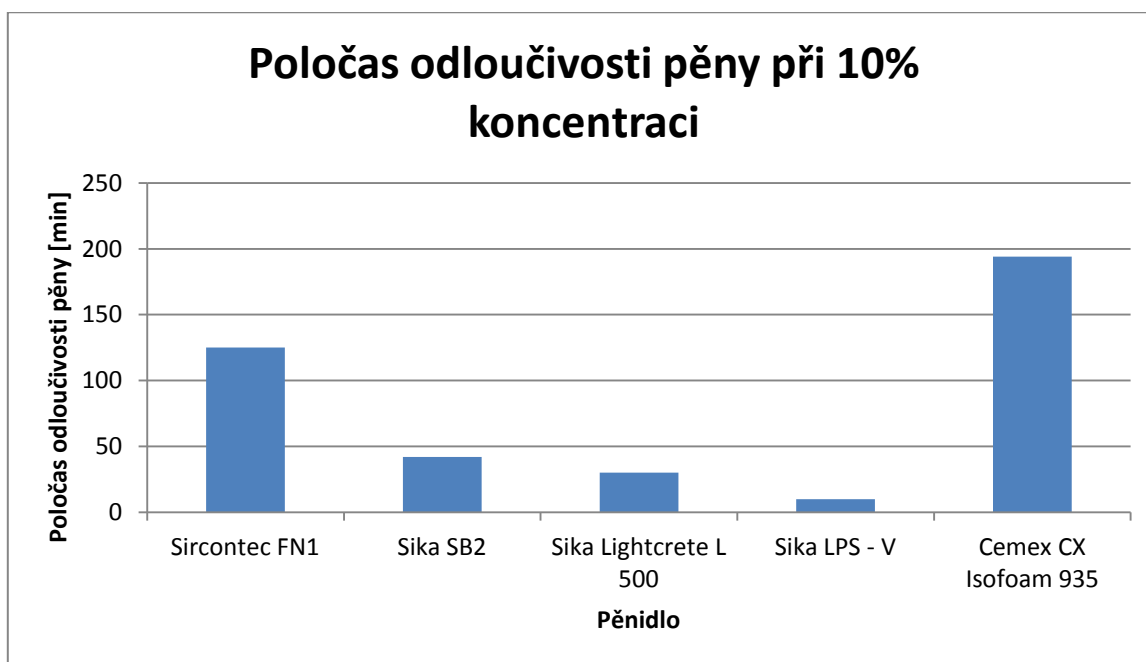
Graf 1 Objemové hmotnosti při 10% koncentraci



Graf 2 Číslo napěnění při 10% koncentraci



Graf 3 Poločas odloučivosti pěny při 10% koncentraci



Počet napěňujících přísad z původních 5 byl pro další měření zredukován na 3, protože vyřazená pěnidla Sika LPS - V a Lightcrete L 500 totiž nevytvořila kvalitní „kašovitou“ pěnu, nýbrž velké „bubliny“, které vypovídaly o tom, že se jedná spíše o provzdušňující přísady. Na zbylých 3 přísadách bylo upraveno množství záměsové vody z 90 ml na 390 ml, čímž vznikl 2,5% koncentrát a opět byly stanoveny zkoušky vydatnosti, objemové hmotnosti, číslo napěnění a poločasu odloučivosti pěny.

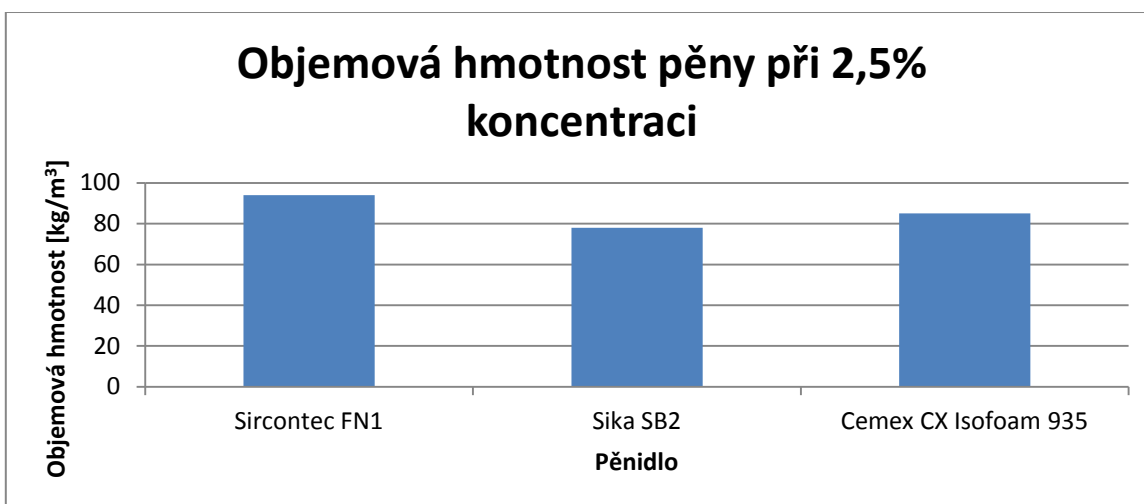
Tab. 7 Vydatnost pěny a poločas odloučivosti pěny při 2,5% koncentraci

| Naměřené hodnoty pro stanovení vydatnosti a poločasu odloučivosti technické pěny vyrobené ručním šlehačem za podílu 10 ml pěnidla a 390 ml vody (2,5% koncentrace) | | | | |
|--|--------------------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Pěnidlo | Vydatnost pěny | | Poločas odloučivosti pěny | |
| | Objem namíchané pěny [l] | Hmotnost namíchané pěny [g] | Objem odloučeného koncentrátu [ml] | Doba při odečtu hodnot [min] |
| Sircontec FN1 | 4,17 | 390 | 194 | 50 |
| Sika SB2 | 5,00 | 390 | 242 | 49 |
| Cemex CX Isofoam 935 | 4,65 | 395 | 225 | 51 |

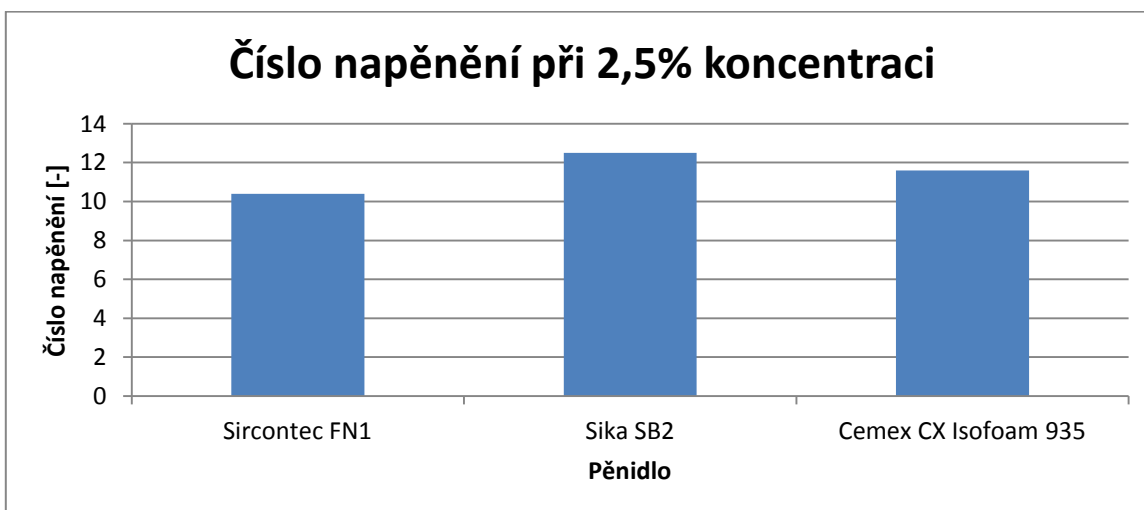
Tab. 8 Objemová hmotnost, číslo napěnění a poločas odloučivosti při 2,5% koncentraci

| Spočítané hodnoty objemové hmotnosti a poločasu odloučivosti technické pěny vyrobené ručním šlehačem za podílu 10 ml pěnidla a 390 ml vody (2,5% koncentrace) | | | |
|---|---|--------------------|---------------------------------|
| Pěnidlo | Objemová hmotnost pěny [kg/m ³] | Číslo napěnění [-] | Poločas odloučivosti pěny [min] |
| Sircontec FN1 | 94 | 10,4 | 52 |
| Sika SB2 | 78 | 12,5 | 40 |
| Cemex CX Isofoam 935 | 85 | 11,6 | 45 |

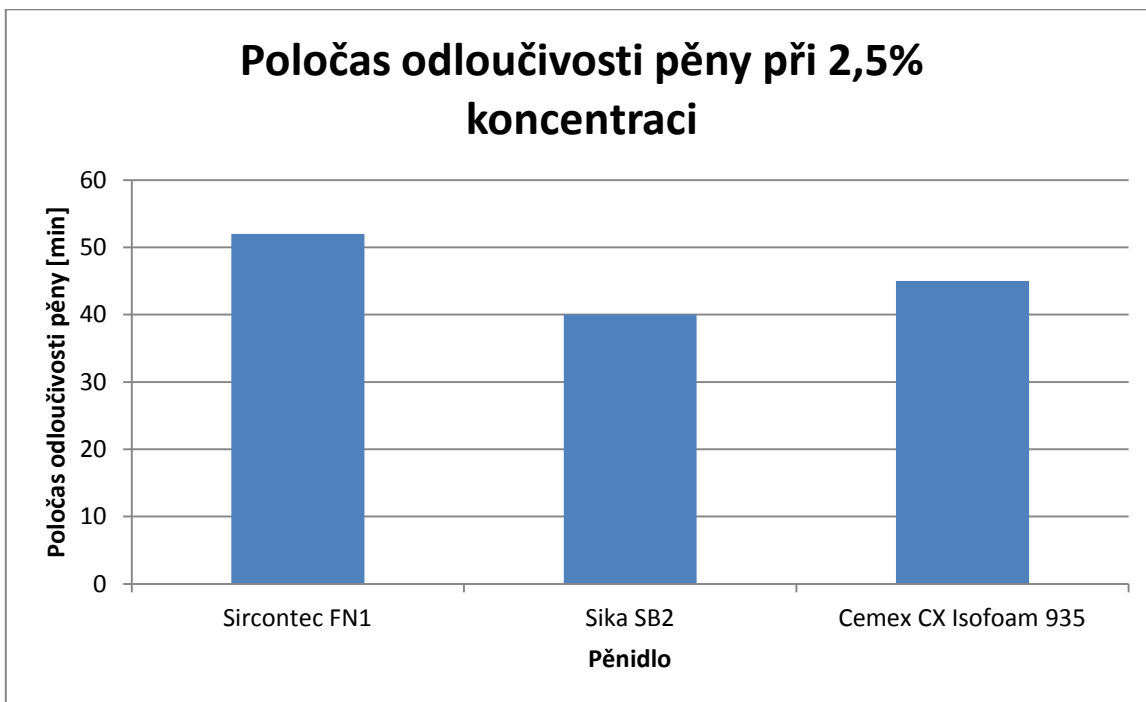
Graf 4 Objemové hmotnosti při 2,5% koncentraci



Graf 5 Číslo napěnění při 2,5% koncentraci



Graf 6 Poločas odloučivosti pěny při 2,5% koncentraci



Z uvedených tabulek a grafů vyplývá, že při nižší koncentraci (2,5 %) se výsledky jednotlivých pěnotvorných přísad navzájem blíží. Vzniká totiž technická pěna o vyšší objemové hmotnosti, ale nižším čísle napěnění a kratším poločasem odloučivosti. Pro praktické využití je však důležitá nízká objemová hmotnost, vysoké číslo napěnění a dlouhý poločas odloučivosti technické pěny. Při 10% koncentraci v těchto provizorních podmínkách docházelo k většímu rozptylu hodnot jednotlivých napěňovacích přísad.

7. Vzorové receptury pěnobetonů a jejich vlastnosti

V této praktické části bakalářské práce jsou podle navržených receptur zhotoveny vzorky pěnobetonů. Jsou použity různé technologie a pěnotvorné přísady. Na těchto zkušebních vzorcích jsou stanoveny pevnosti v tlaku ve stáří 7 a 28 dnů, objemové hmotnosti, stabilita v čase do 12 hodin od zamíchání a informativní hodnoty součinitele teplotní vodivosti.

7.1 Navržené receptury s nízkou dávkou cementu

Receptury číslo 1, 2 a 3 jsou navrženy jako směsi s nízkou objemovou hmotností. Nejnižší objemová hmotnost byla dosažena u receptury č. 1. V případě receptur č. 2 a 3 byla nízká dávka cementu doplněna o kamenivo frakce 0 - 4 mm. Technická pěna byla u všech tří záměsí vyrobena stejným způsobem při stejné koncentraci (pěnotvorný koncentrát FN1 : vodě = 1 : 40), měnilo se pouze množství dávky technické pěny. Pěna byla vyrobena za pomoci vlastnoručně vyrobeného nástavce do vysokotáčkové aku-pistole. Výsledná objemová hmotnost takto vyrobené pěny byla 113 kg/m³.

Tab. 9 Složení receptury č. 1

| Složení receptury č. 1 | |
|--------------------------------|------------------------------|
| složka | množství na 1 m ³ |
| CEM II / B - M (S - LL) 32,5 R | 165 kg |
| voda | 83 kg |
| pěna (Sircontec FN1) | 92 kg (voda) |
| | 2,4 kg (pěnidlo) |

Tab. 10 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury č. 1

| Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury č. 1 | | | | | |
|---|--------|--------|--------|------------------------|----------------------|
| STAV | a [mm] | b [mm] | h [mm] | D [kg/m ³] | R _c [MPa] |
| po 7 dnech | 99,03 | 99,5 | 100,55 | 190 | 0,2 |
| po 28 dnech | 99,59 | 100,34 | 99,65 | 200 | 0,2 |
| vysušený | 98,77 | 99,63 | 99,54 | 190 | 0,2 |

Tab. 11 Složení receptury č. 2

| Složení receptury č. 2 | |
|--------------------------------|------------------------------|
| složka | množství na 1 m ³ |
| CEM II / B - M (S - LL) 32,5 R | 210 kg |
| kamenivo frakce 0 - 4 mm | 210 kg |
| voda | 80 kg |
| pěna (Sircontec FN1) | 85 kg (voda) |
| | 2,1 kg (pěnidlo) |

Tab. 12 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury č. 2

| Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury č. 2 | | | | | |
|---|--------|--------|--------|------------------------|----------------------|
| STAV | a [mm] | b [mm] | h [mm] | D [kg/m ³] | R _c [MPa] |
| po 7 dnech | 98,67 | 99,78 | 99,68 | 460 | 0,2 |
| po 28 dnech | 99,27 | 99,63 | 100,47 | 490 | 0,3 |
| vysušený | 96,6 | 99,97 | 99,88 | 440 | 0,2 |

Tab. 13 Složení receptury č. 3

| Složení receptury č. 3 | |
|--------------------------------|------------------------------|
| složka | množství na 1 m ³ |
| CEM II / B - M (S - LL) 32,5 R | 210 kg |
| frakce 0 - 4 mm | 530 kg |
| voda | 95 kg |
| pěna (Sircontec FN1) | 70 kg (voda) |
| | 1,8 kg (pěnidlo) |

Tab. 14 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury č. 3

| Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury č. 3 | | | | | |
|---|--------|--------|--------|------------------------|----------------------|
| STAV | a [mm] | b [mm] | h [mm] | D [kg/m ³] | R _c [MPa] |
| po 7 dnech | 104,1 | 99,92 | 99,98 | 720 | 0,4 |
| po 28 dnech | 101,84 | 100,26 | 100,07 | 730 | 0,7 |
| vysušený | 150,01 | 150,16 | 89,76 | 720 | 0,4 |

7.2 Receptury SIRCONTEC PBG 35 a 40

Pro srovnání s dalšími recepturami byly dle receptury společnosti Sircontec namíchány dvě nejčastěji používané druhy pěnobetonů na mobilním výrobním zařízení MS 1000. Pěnobeton vyrobené touto technologií používají rovněž pěnотvornou přísadu FN 1, která je napěňována stlačeným vzduchem, tím vznikne technická pěna o objemové pevnosti 72 kg/m^3 . Pěnobeton dle těchto receptur neobsahuje žádná plniva a příměsi, kromě těch obsažených v cementu.

Tab. 15 Složení receptury SIRCONTEC PBG 35

| Složení receptury SIRCONTEC PBG 35 | |
|------------------------------------|-----------------------------|
| složka | množství na 1 m^3 |
| CEM II / B - M (S - LL) 32,5 R | 275 kg |
| voda | 180 kg |
| pěna (Sircontec FN1) | 45 kg (voda) |
| | 1,76 kg (pěnidlo) |

Zdroj: [23]

Tab. 16 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury SIRCONTEC PBG 35

| Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury SIRCONTEC PBG 35 | | | | | |
|---|--------|--------|--------|-----------------------|----------------------|
| STAV | a [mm] | b [mm] | h [mm] | D [kg/m^3] | R _c [MPa] |
| po 7 dnech | 98,15 | 100,67 | 100,23 | 370 | 1,0 |
| po 28 dnech | 95,46 | 99,9 | 99,89 | 410 | 1,5 |
| vysušený | 144,84 | 149,38 | 143,69 | 360 | 0,8 |

Tab. 17 Složení receptury SIRCONTEC PBG 40

| Složení receptury SIRCONTEC PBG 40 | |
|------------------------------------|-----------------------------|
| složka | množství na 1 m^3 |
| CEM II / B - M (S - LL) 32,5 R | 300 kg |
| voda | 195 kg |
| pěna (Sircontec FN1) | 44 kg (voda) |
| | 1,71 kg (pěnidlo) |

Zdroj: [23]

Tab. 18 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury SIRCONTEC PBG 40

| Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury SIRCONTEC PBG 40 | | | | | |
|---|--------|--------|--------|------------------------|----------------------|
| STAV | a [mm] | b [mm] | h [mm] | D [kg/m ³] | R _c [MPa] |
| po 7 dnech | 98,07 | 100,17 | 100,78 | 460 | 1,0 |
| po 28 dnech | 97,75 | 99,88 | 99,98 | 490 | 1,4 |
| vysušený | 147,46 | 149,96 | 149,52 | 430 | 1,2 |

7.3 Receptura společnosti CEMEX

Vzorky tohoto pěnobetonu byly vyrobeny na stabilním míchacím zařízení na brněnské pobočce betonárny Cemex. Jejich receptura je založena na cementu CEM I 42,5 R a na napěňovací přísadě Sika SB2, která je napěňována pěnogenerátorem za pomoci atmosférického vzduchu. Tato pěna má objemovou hmotnost 62 kg/m³. V tomto pěnobetonu jsou použity plniva, kamenivo frakce 0 - 4 mm a práškové příměsi v podobě popílku. A právě přítomnost vyšší dávky kameniva frakce 0 - 4 mm měla vliv na rozdílné objemové hmotnosti jednotlivých vzorků, kdy jejich rozptyl byl v čerstvém stavu 240 kg/m³, což se sice pozitivně podepsalo na následných pevnostech v tlaku, ale pro jednotné určení objemové hmotnosti to není vhodné, proto byly testované vzorky rozděleny do dvou skupin - A a B.

Tab. 19 Složení receptury CEMEX Poroflow F

| Složení receptury CEMEX Poroflow F | |
|------------------------------------|------------------------------|
| složka | množství na 1 m ³ |
| CEM I 42,5 R Mokrý | 270 kg |
| frakce 0 - 4 mm | 220 kg |
| popílek | 110 kg |
| voda | 180 kg |
| pěna (SIKA SB2) | 60 kg (voda) |
| | 2,4 kg (pěnidlo) |

Tab. 20 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury CEMEX Poroflow F - A

| Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury CEMEX Poroflow F - A | | | | | |
|---|--------|--------|--------|------------------------|----------------------|
| STAV | a [mm] | b [mm] | h [mm] | D [kg/m ³] | R _c [MPa] |
| po 7 dnech | 150,5 | 150,8 | 149,9 | 690 | 1,1 |
| po 28 dnech | 150,1 | 149,58 | 150,02 | 650 | 1,6 |
| vysušený | 151,13 | 149,14 | 149,24 | 580 | 1,3 |

Tab. 21 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury CEMEX Poroflow F - B

| Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury CEMEX Poroflow F - B | | | | | |
|---|--------|--------|--------|------------------------|----------------------|
| STAV | a [mm] | b [mm] | h [mm] | D [kg/m ³] | R _c [MPa] |
| po 7 dnech | 150,2 | 152,5 | 150,2 | 920 | 1,5 |
| po 28 dnech | 153,94 | 149,78 | 150,17 | 870 | 2,8 |
| vysušený | 149,14 | 149,15 | 149,28 | 770 | 2,6 |

7.4 Receptura pro ULW SCC

Tato receptura je spíše určena pro ultralehký samozhutnitelný beton, ale tím, že bylo použito pórovité kamenivo Liapor a napěňující přísada Sika Lightcrete L 500, která byla dávkována přímo do míchací komory bez použití pěnogenerátoru, podařilo se dostat na velmi zajímavé hodnoty čerstvé objemové hmotnosti (860 kg/m³).

Tab. 22 Složení receptury ULW SCC

| Složení receptury ULW SCC | |
|--|------------------------------|
| složka | množství na 1 m ³ |
| CEM I 42,5 R Mokrý | 380 kg |
| Liapor 1 - 4 mm | 340 l |
| Liapor 4 - 8 mm | 880 l |
| popílek | 120 kg |
| Chrysofluid optima 224 (1,2 % z m _c) | 4,56 kg |
| SIKA Lightcrete L 500 (1,5 % z m _c) | 5,7 kg |
| voda | 290 kg |

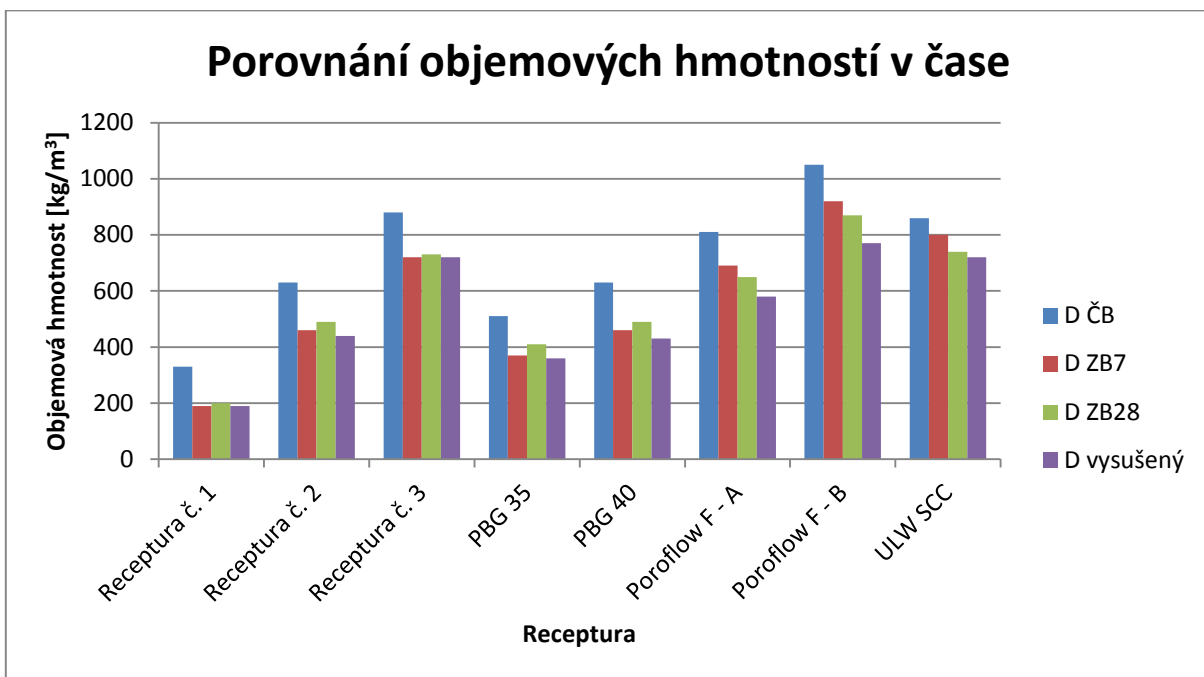
Tab. 23 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury ULW SCC

| Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury ULW SCC | | | | | |
|--|--------|--------|--------|------------------------|----------------------|
| STAV | a [mm] | b [mm] | h [mm] | D [kg/m ³] | R _c [MPa] |
| po 7 dnech | 150,4 | 151,4 | 150,2 | 800 | 0,9 |
| po 28 dnech | 145,8 | 149,3 | 149,2 | 740 | 1,7 |
| vysušený | 148,2 | 149,09 | 149,33 | 720 | 1,1 |

Tab. 24 Porovnání objemových hmotností v čase

| Porovnání objemových hmotností v čase | | | | |
|---------------------------------------|--|---------------------------|--|---|
| Receptura | D _{vysušený} [kg/m ³] | D ČB [kg/m ³] | D ZB ₇ [kg/m ³] | D ZB ₂₈ [kg/m ³] |
| Receptura č. 1 | 190 | 330 | 190 | 200 |
| Receptura č. 2 | 440 | 630 | 460 | 490 |
| Receptura č. 3 | 720 | 880 | 720 | 730 |
| PBG 35 | 360 | 510 | 370 | 410 |
| PBG 40 | 430 | 630 | 460 | 490 |
| Poroflow F - A | 580 | 810 | 690 | 650 |
| Poroflow F - B | 770 | 1050 | 920 | 870 |
| ULW SCC | 720 | 860 | 800 | 740 |

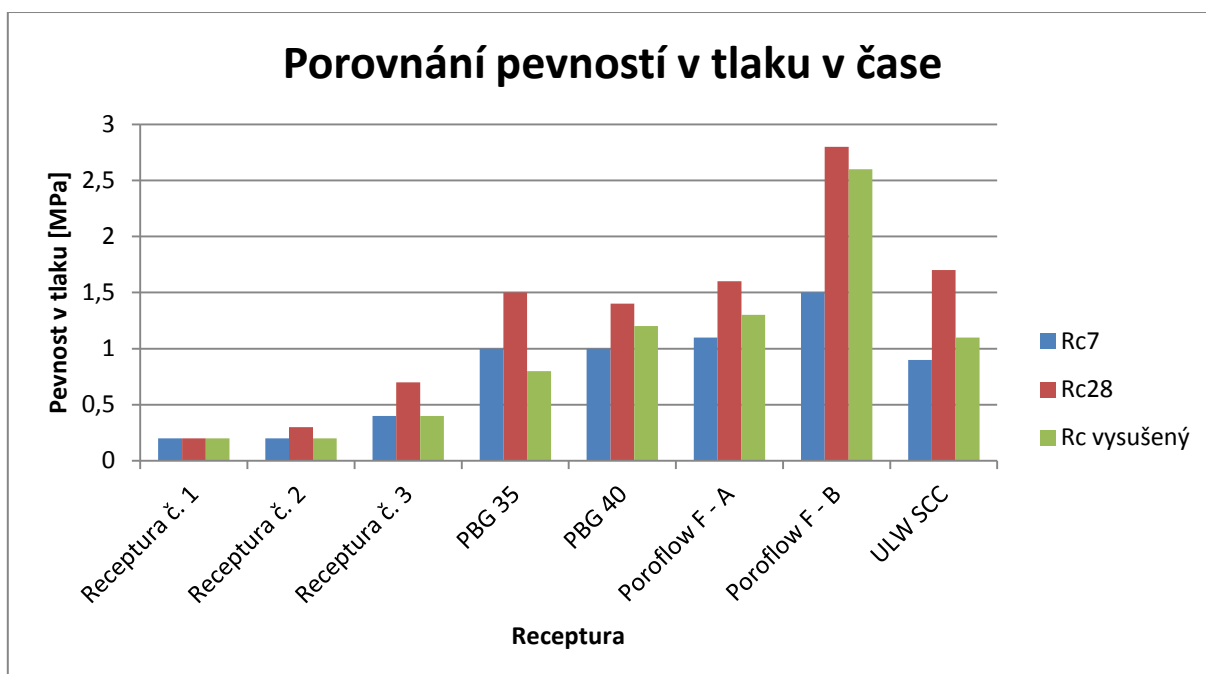
Graf 7 Porovnání objemových hmotností v čase



Tab. 25 Porovnání pevností v tlaku v čase

| Porovnání pevností v tlaku v čase | | | | |
|-----------------------------------|--|-----------------------|------------------------|-------------------------------|
| Receptura | D _{vysušený} [kg/m ³] | R _{c7} [MPa] | R _{c28} [MPa] | R _c vysušený [MPa] |
| Receptura č. 1 | 190 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Receptura č. 2 | 440 | 0,2 | 0,3 | 0,2 |
| Receptura č. 3 | 720 | 0,4 | 0,7 | 0,4 |
| PBG 35 | 360 | 1,0 | 1,5 | 0,8 |
| PBG 40 | 430 | 1,0 | 1,4 | 1,2 |
| Poroflow F - A | 580 | 1,1 | 1,6 | 1,3 |
| Poroflow F - B | 770 | 1,5 | 2,8 | 2,6 |
| ULW SCC | 720 | 0,9 | 1,7 | 1,1 |

Graf 8 Porovnání pevností v tlaku v čase



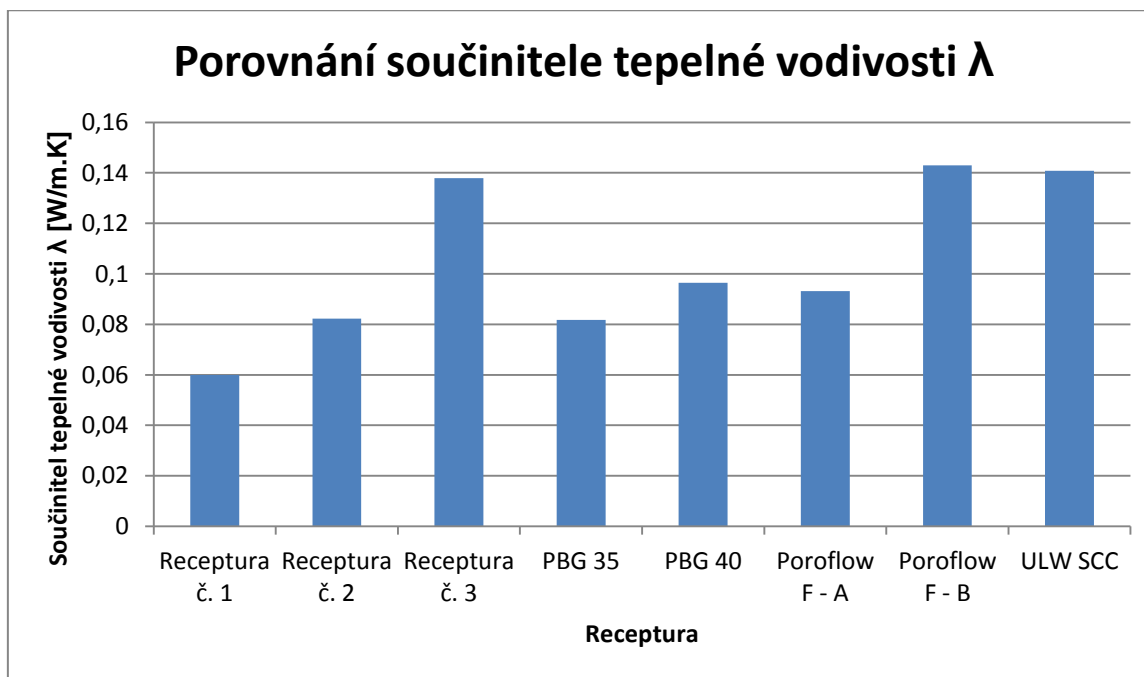
Tab. 26 Porovnání součinitelů tepelné vodivosti

| Porovnání součinitele tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti ve vysušeném stavu | | |
|---|---------------------------------------|--------------------------|
| Receptura | $D_{\text{vysušený}} [\text{kg/m}^3]$ | $\lambda [\text{W/m.K}]$ |
| Receptura č. 1 | 190 | 0,0599 |
| Receptura č. 2 | 440 | 0,0822 |
| Receptura č. 3 | 720 | 0,1379 |
| PBG 35 | 360 | 0,0817 |
| PBG 40 | 430 | 0,0965 |
| Poroflow F - A | 580 | 0,0932 |
| Poroflow F - B | 770 | 0,1430 |
| ULW SCC | 720 | 0,1408 |

Obr. 14 Měření součinitele tepelné vodivosti na přístroji Shotherm QTM



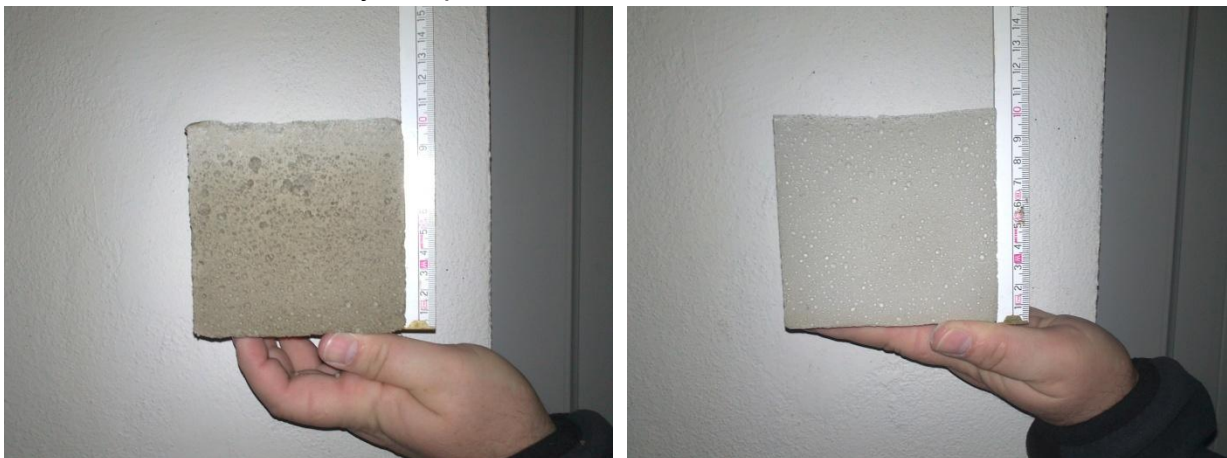
Graf 9 Porovnání součinitele tepelné vodivosti



7.5 Stabilita v čase do 12 hodin od zamíchání

Pěnobeton má v čerstvém stavu kašovitou viskozitu, přičemž během tuhnutí a následného tvrdnutí se na povrchu vytváří tuhý škraloup. Pokud není zvýšená okolní teplota, nedisponuje pěnobeton v čase do 12 hodin od zamíchání pochozími pevnostmi, je silně plastický a do materiálu lze udělat vtisk. Na následujících obrázcích jsou k vidění dvě krychle ze stejné záměsi, kdy jedna byla odformována již po 18 hodinách a druhá až po 36 hodinách. V řezu je patrné, že směs vysychá od povrchu do nitra směsi. Navíc je na zkušebním tělese patrné, že i když byla forma vyplněna a zarovnána čerstvou směsí pěnobetonu, během tuhnutí a tvrdnutí došlo k částečnému zhroucení směsi do středu formy.

Obr. 15 Vlevo odformovaná zkušební krychle po 18 hodinách zrání a vpravo odformovaná zkušební krychle po 36 hodinách zrání



Postup zkoušky pro stabilitu v čase do 12 hodin po zamíchání je následující. Do vodotěsně uzavřené PVC roury o vnitřním průměru 150 mm a celkové výšce 1095 mm byla nalita směs zkoušené receptury s mírným přebytkem, tento přebytek byl následně strhnut širokou špachtlí vedením přes okraj roury. Takto vyrobené zkušební těleso bylo bez vibrace ponecháno 12 hodin v klidu a poté byl pomocí posuvného měřítka změřen pokles hladiny pěnobetonu vůči hraně roury. Z této vzdálenosti byl poté vypočítán procentuální pokles hladiny pěnobetonu vůči původní výšce, tedy 1095 mm.

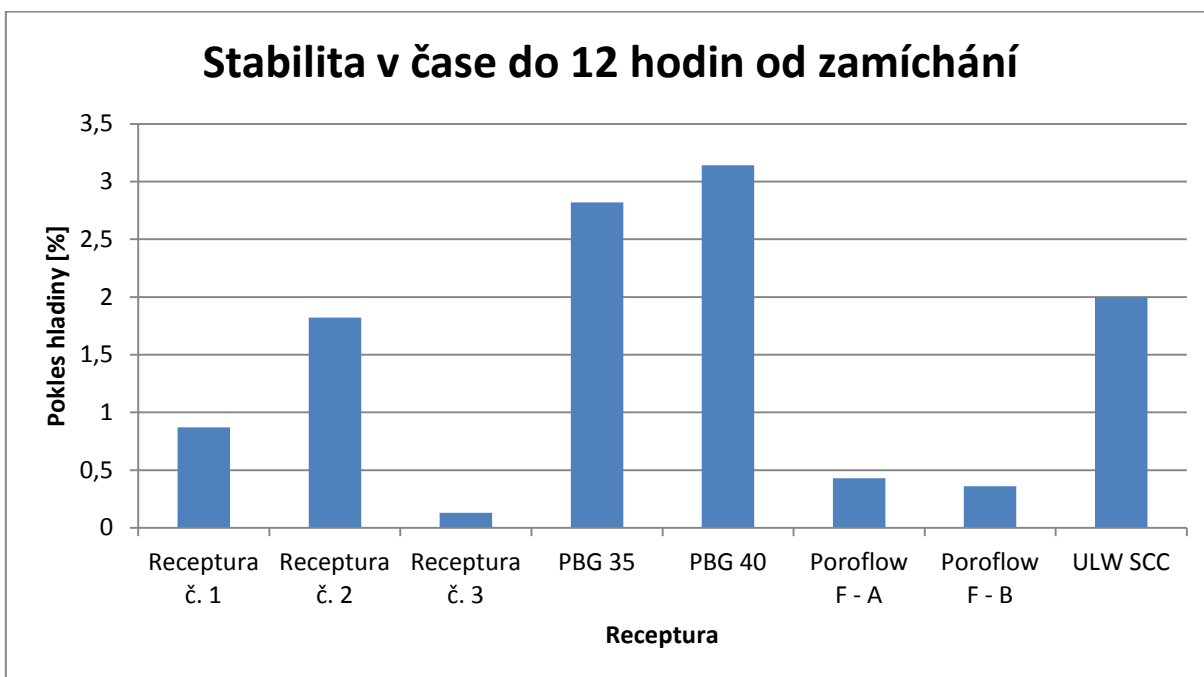
Tab. 27 Naměřené a vypočítané hodnoty při zkoušení stability v čase do 12 hodin po zamíchání

| Receptura | $D_{\text{vysušený}} \text{ [kg/m}^3\text{]}$ | Pokles hladiny [mm] | Pokles hladiny [%] |
|----------------|---|---------------------|--------------------|
| Receptura č. 1 | 190 | 9,53 | 0,87 |
| Receptura č. 2 | 440 | 19,93 | 1,82 |
| Receptura č. 3 | 720 | 1,42 | 0,13 |
| PBG 35 | 360 | 30,85 | 2,82 |
| PBG 40 | 430 | 34,35 | 3,14 |
| Poroflow F - A | 580 | 4,71 | 0,43 |
| Poroflow F - B | 770 | 3,94 | 0,36 |
| ULW SCC | 720 | 21,90 | 2,00 |

Obr. 16 Stanovení stability v čase



Graf 10 Stabilita v čase do 12 hodin od zamíchání



Praktickou částí se ověřilo, že pěnobetony dosahují nízkých objemových hmotností a velmi dobrých tepelně-izolačních vlastností. Bohužel nedosahují příliš vysokých pevností v tlaku, ty však se zvyšujícím obsahem plniv a tím zvyšující se objemovou hmotností rostou. Zvyšující se objemová hmotnost má zároveň pozitivní vliv na stabilitu v čase do 12 hodin od zamíchání.

Závěr

Hlavním cílem bakalářské práce bylo popsat technologii výroby a vlastnosti cementového pěnobetonu. Primárně existují dva druhy technologie výroby a to mobilní a stabilní podle druhu výrobního zařízení. Stabilní výrobní zařízení je využíváno na prefa výrobnách a betonárnách, odkud se případně dále dopravuje autodomíchávači na staveniště. V rámci stavby se pěnobeton přemísťuje pomocí šnekových čerpadel. U mobilního zařízení je výhodou, že se pěnobeton připravuje přímo na stavbě, kdy celé zařízení je včetně šnekového čerpadla osazeno na mobilní podvozek a tím je zaručena jeho pružná výroba.

Základem cementového pěnobetonu je směs cementu, vody a pěnotvorných přísad. V České republice jsou dostupné hlavně tyto pěnotvorné přísady: FN1 distribuovaná společností Sircontec, SB 2, Lightcrete L 500 a LPS – V vyráběné společností Sika a CX Isofoam 935 od společnosti Cemex. Na vzorcích těchto uvedených přísad byly provedeny zkoušky vydatnosti, objemové hmotnosti a určilo se jejich číslo napěnění a poločas odloučivosti pěny při různých koncentracích. Pro praktické využití je však důležitá nízká objemová hmotnost, vysoká vydatnost, vysoké číslo napěnění a dlouhý poločas odloučivosti technické pěny. Každá pěnotvorná přísada má však optimální vlastnosti při jiné koncentraci. To znamená, že při výrobě pěnobetonu je žádoucí dbát pokynů a receptur předepsaných výrobcem nebo distributorem, kteří již s touto pěnotvornou přísadou mají cenné zkušenosti.

V praktické části jsem porovnával vzorky navržených receptur pěnobetonů se vzorky zhotovenými podle receptur výrobců nebo distributorů pěnotvorných přísad. Bylo ověřeno, že pěnobetony dosahují nízkých objemových hmotností a velmi dobrých tepelně-izolačních vlastností. Bohužel nedosahují příliš vysokých pevností v tlaku, ty však se zvyšujícím obsahem plniv a tím zvyšující se objemovou hmotností rostou. Zvyšující se objemová hmotnost má zároveň pozitivní vliv na stabilitu v čase do 12 hodin od zamíchání. Pěnobetony s velmi nízkou objemovou hmotností vykazují zhoršenou stabilitu, která se projevuje poklesem hladiny nalité vrstvy.

Hlavní stavební využití technologie cementového pěnobetonu je převážně v podlahářské praxi. Tuto velmi lehkou ale dostatečně stabilní stavební hmotu s dobrými tepelně izolačními vlastnostmi lze využít jako náhrada deskových tepelně izolačních materiálů z polystyrenu či minerální vaty. Díky dobrým samonivelačním vlastnostem je cementový pěnobeton využíván k vyrovnání nivelety nad podkladními vrstvami v podlahových konstrukcích. Během ukládání tohoto materiálu jde o mokrý proces výroby, při kterém je materiál v kapalném skupenství, dokáže tedy oproti deskovým materiálům zcela obtéci nejrůznější instalace, které jsou vkládány do podlahových konstrukcí, čímž nedochází ke vzniku dutých míst. Díky tomu nevznikají v konstrukci tepelné mosty a i dané instalace jsou tím pádem daleko lépe chráněné proti deformacím vlivem stálého a užitného zatížení podlahové konstrukce. V případě pokládky deskových tepelně izolačních materiálů totiž většina míst v blízkosti těchto instalací zůstává nevyplněná nebo je zřídka alespoň obsypána pískem, či jiným jemnozrnným materiálem. Tato skladba podlahy už není tak kompaktní.

Pěnobeton lze jednoduše vylít do předem určené nivelety dle skladby podlahového souvrství. Za pomoci jednoduchého principu vibrace pomocí lehkých duralových tyčí se dosáhne téměř rovného povrchu bez ohledu na předcházející výškovou různorodost podkladních konstrukcí. Na takto znivelizovaný podklad lze položit např. systémovou desku z polystyrenu určenou pro pokládku teplovodního podlahového systému, hliníkovou odrazovou folii pro podlahové vytápění na bázi elektrického odporového drátu či po separaci Pe-folií nanést anhydritovou či cementovou mazaninu.

Kromě podlah lze pěnobeton využít také jako materiál na výplň dutých míst, jako jsou klenby a dutiny. Právě pro svou lehkost, relativní pevnost a možnost snadného odstranění v případě potřeby.

Seznam zdrojů

Tištěné zdroje:

- [1] ADÁMEK, Jiří; NOVOTNÝ, Bohumil; KOUKAL, Jan. *Stavební materiály*. 1. vyd. Brno: CERM, 1997. 210 s. ISBN 80-214-0631-3
- [2] DROCHYTKA, Rostislav; VÝBORNÝ, Jaroslav; KOŠATKA, Pavel; PUME, Dimitrij. *Pórobeton*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 1999. ISBN 80-214-1476-6
- [3] HEIDELBERG CEMENT GROUP. *Příručka technologa - beton - suroviny, výroba, vlastnosti*. 2. vyd. ARTIS, 2005. 104 s.
- [4] HELA, Rudolf. *Technologie betonu I*. 1. vyd. učební opory VUT FAST Brno, 2005. 110 s.
- [5] HELA, Rudolf. *Technologie betonu II*. 1. vyd. učební opory VUT FAST Brno, 2007. 148 s.
- [6] HROUDOVÁ, Jitka; ZACH, Jiří. *Izolační materiály - návody do cvičení*. 1. vyd. učební opory VUT FAST Brno, 2011. 42 s.
- [7] KŘÍŽOVÁ, Katarína. *Betonové konstrukce I*. 1. vyd. Praha: Sobotáles, 2010. 144 s. ISBN 978-80-86817-39-2
- [8] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu I*. 1. vyd. Brno: CERM, 1994. 144 s. ISBN 80-85867-07-9
- [9] SVOBODA, Luboš a kol. *Stavební hmoty*. 2. vydání Bratislava: Jaga group, 2007. 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1
- [10] ŠŤASTNÍK, Stanislav; ZNAJDA, Tomáš; ZACH, Jiří; NOVÁČEK, Jaroslav. *Fyzika stavebních látek - návody do cvičení*. 1. vyd. učební opory VUT FAST Brno, 2011. 25 s.

Normy a technické listy:

- [11] ČSN EN 197-1. *Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Český normalizační institut, 2001. Třídící znak 72 2101.
- [12] 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. Praha: Český normalizační institut, 2003. Třídící znak 73 2028.

- [13] *Darex[®] AE S 45 Foam concentrate for the production of ready-mixed mortar and lightweight concrete*. Grace Bauprodukte GmbH, 2005. Technický list 11/05.
- [14] *FOAM GA 285 Syntetická pěnotvorná přísada; určená pro výrobu lehkého betonu dle EN 206-1*. BASF. Technický list 668.
- [15] *Kemacón LPA Provzdušňující přísada do betonů a malt*. KEMA stavební materiály, 2006. Technický list 04/2006.
- [16] *Mapeplast LA Tekutá přísada pro výrobu lehčených betonů a malt*. MAPEI. Technický list 777/7.99.
- [17] *Schaumbildner 97 Pěnicí přísada do lehčeného pórobetonu*. Ha-Be Betonchemie. Technický list 230.
- [18] *Sika[®] SB 2 Pěnicí přísada pro pěnobeton*. Sika, 2010. Technický list 01/2010.
- [19] *Sika[®] Lightcrete L 500 Příklad provzdušňujícího betonu a těsnícího betonu, do suchých maltových směsí*. Sika, 2010. Technický list 01/2010.
- [20] *Sika[®] LPS-V Provzdušňující přísada pro silniční betony*. Sika, 2010. Technický list 04/2010.

Internetové zdroje:

- [21] KHESTL, Filip a kol. *Portlandský slínek* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství, 2010. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z:
http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty_cement
- [22] KUČEROVÁ, Irena a kol. *Stavební materiály - stanovení objemové hmotnosti a pórovitosti přístupné vodě - teoretická část* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko technologická, Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství, 2008. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z:
http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_stavebni_materialy_objem_hmotnost/index.htm

- [23] SCHERFEL, Walter. *Sircontec* [online]. SIRCONTEC,© 2005 - 2010 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://www.sircontec.sk/>
- [24] Svaz výrobců Betonu. *Pojmy* [online]. Praha: Sunnysoft. [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://ebeton.cz/pojmy/>

Seznam tabulek

- Tab. 1 Mechanické a fyzikální požadavky dle ENV 197-1
- Tab. 2 Receptury dle společnosti Sircontec
- Tab. 3 Receptury dle teoretických výpočtů
- Tab. 4 Cementy pro výrobu pěnobetonů (PBG) a polystyrenbetonů (PsB)
- Tab. 5 Vydatnost pěny a poločas odloučivosti pěny při 10% koncentraci
- Tab. 6 Objemová hmotnost, číslo napěnění a poločas odloučivosti při 10% koncentraci
- Tab. 7 Vydatnost pěny a poločas odloučivosti pěny při 2,5% koncentraci
- Tab. 8 Objemová hmotnost, číslo napěnění a poločas odloučivosti při 2,5% koncentraci
- Tab. 9 Složení receptury č. 1
- Tab. 10 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury č. 1
- Tab. 11 Složení receptury č. 2
- Tab. 12 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury č. 2
- Tab. 13 Složení receptury č. 3
- Tab. 14 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury č. 3
- Tab. 15 Složení receptury SIRCONTEC PBG 35
- Tab. 16 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury SIRCONTEC PBG 35
- Tab. 17 Složení receptury SIRCONTEC PBG 40
- Tab. 18 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury SIRCONTEC PBG 40
- Tab. 19 Složení receptury CEMEX Poroflow F
- Tab. 20 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury CEMEX Poroflow F - A
- Tab. 21 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury CEMEX Poroflow F - B
- Tab. 22 Složení receptury ULW SCC
- Tab. 23 Naměřené hodnoty na vzorcích z receptury ULW SCC
- Tab. 24 Porovnání objemových hmotností v čase
- Tab. 25 Porovnání pevností v tlaku v čase
- Tab. 26 Porovnání součinitelů tepelné vodivosti
- Tab. 27 Naměřené a spočítané hodnoty při zkoušení stability v čase do 12 hodin od zamíchání

Seznam grafů

- Graf 1 Objemové hmotnosti při 10% koncentraci
- Graf 2 Číslo napěnění při 10% koncentraci
- Graf 3 Poločas odloučivosti pěny při 10% koncentraci
- Graf 4 Objemové hmotnosti při 2,5% koncentraci
- Graf 5 Číslo napěnění při 2,5% koncentraci
- Graf 6 Poločas odloučivosti pěny při 2,5% koncentraci
- Graf 7 Porovnání objemových hmotností v čase
- Graf 8 Porovnání pevností v tlaku v čase
- Graf 9 Porovnání součinitele tepelné vodivosti
- Graf 10 Stabilita v čase do 12 hodin od zamíchání

Seznam obrázků

- Obr. 1 Přehled lehkých betonů
- Obr. 2 Pohled na řezy různými lehkými betony
- Obr. 3 Přehled lehkých pórovitých betonů
- Obr. 4 Řez pěnobetonem
- Obr. 5 Princip cementové pece
- Obr. 6 Cement - normalizované značení
- Obr. 7 Přehled pěnobetonů
- Obr. 8 Schéma betonárny Sircontec MS 1000
- Obr. 9 Ruční dávkování cementu do výrobního zařízení Sircontec MS 1000
- Obr. 10 Mobilní výrobní zařízení Sircontec MS 1000
- Obr. 11 Pěnogenerátor užívaný společností Cemex na betonárně v Brně
- Obr. 12 Přečerpání pěnobetonu z autodomíchače na místo pokládky
- Obr. 13 Výroba technické pěny ručním mixérem
- Obr. 14 Měření součinitele tepelné vodivosti na přístroji Shotherm QTM
- Obr. 15 Vlevo odformovaná zkušební krychle po 18 hodinách zrání a vpravo odformovaná zkušební krychle po 36 hodinách zrání
- Obr. 16 Stanovení stability v čase