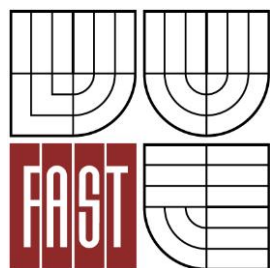




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

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

LEHČENÉ PODLAHY NA BÁZI PĚNOBETONŮ A PLYNOBETONŮ S VYUŽITÍM DRUHOTNÝCH SUROVIN

LIGHTWEIGHT FLOORS BASED ON AERATED CONCRETE AND FOAM CONCRETE WITH THE USE
OF SECONDARY RAW MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. PAVEL KAPČUK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Pavel Kapčuk
Název	Lehčené podlahy na bázi pěnobetonů a plynobetonů s využitím druhotných surovin
Vedoucí diplomové práce	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2013
Datum odevzdání diplomové práce	17. 1. 2014
V Brně dne 31. 3. 2013	

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

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

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá vývojem nové lehčené hmoty pro průmyslové podlahy založené na bázi pěnobetonu a neautoklávaného pórobetonu s možným využitím druhotných plniv a přírodních lehčených plniv namísto klasického kameniva, které by bylo možné skladovat ve formě suché směsi připravené k použití jen s přidáním vody.

Klíčová slova: pěnobeton, plynobeton, druhotné suroviny, plynotvorná přísada, pěnotvorná přísada

Abstract: This thesis is oriented on development of new porous materials for industrial floors based foam concrete and not autoclaved aerated concrete with the possible use of secondary raw materials and natural lightweight aggregates instead of classic aggregates. The dry mixture should be stored in bags as ready to use with the addition only of water.

Keywords: foam concrete, aerated concrete, secondary raw materials, aerating additive, foaming additive

Bibliografická citace VŠKP

KAPČUK, Pavel. *Lehčené podlahy na bázi pěnobetonů a plynobetonů s využitím druhotných surovin*. Brno, 2013. 90 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA.

Prohlášení:

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

V Brně dne 15. 1. 2014

.....
podpis autora
Pavel Kapčuk

Poděkování

Děkuji prof. Ing. Rostislavu Drochytkovi, CSc., MBA a Ing. Evě Tůmové za odborné vedení, konzultaci, pomoc při gramatické kontrole a užitečné rady vedoucí k dokončení diplomové práce. Dále bych rád poděkoval paní Blance Bártové za odbornou pomoc a rady při tvorbě praktické části práce. Rád bych také poděkoval své rodině za jejich podporu.

Obsah

1. ÚVOD	9
2. CÍL	10
3. METODIKA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	11
3.1 ETAPA I – TEORETICKÉ MOŽNOSTI VYLEHČENÍ HMOT PRO PODLAHOVÉ KONSTRUKCE	11
3.2 ETAPA II – EXPERIMENTÁLNÍ TVORBA VYLEHČENÝCH HMOT PLYNOBETONŮ A PĚNOBETONŮ.....	11
3.3 ETAPA III – LABORATORNÍ ODZKOUŠENÍ VZORKŮ VYTVOŘENÝCH HMOT.....	11
3.4 ETAPA IV – ZHODNOCENÍ A VÝBĚR RECEPTURY.....	11
4. PODLAHY	16
4.1 PODLAHOVÁ KONSTRUKCE	16
4.2 NEJČASTĚJŠÍ DRUHY PRŮMYSLOVÝCH PODLAH.....	17
4.2.1 <i>Betonové podlahy (prosté)</i>	17
4.2.2 <i>Pancéřové podlahy</i>	17
4.2.3 <i>Teracové podlahy</i>	18
4.2.4 <i>Dřevěné podlahy</i>	18
4.2.5 <i>Speciální živičná překrytí</i>	18
4.2.6 <i>Čedičové podlahy</i>	19
5. VYLEHČOVÁNÍ STAVEBNÍCH LÁTEK	20
5.1 MOŽNOSTI VYLEHČOVÁNÍ:	20
5.2 PLYNOBETONY A PLYNOTVORNÉ ČINIDLA.....	21
5.3 HLINÍKOVÝ PRÁŠEK.....	22
5.3.1 <i>Historie používání hliníkového prášku</i>	24
5.4 CHLOROVÉ VÁPNO A PEROXID VODÍKU.....	24
5.5 PĚNOBETONY A PĚNOTVORNÁ ČINIDLA	25
5.5.1 <i>Historie používání pěnobetonu</i>	26
5.5.2 <i>Pěnobeton</i>	27
5.5.3 <i>Použitá pěnотvorná činidla</i>	28
6. PLNIVA VHODNÁ PRO VYLEHČENÉ RECEPTURY	30
6.1 PLNIVA Z ODPADNÍCH LÁTEK	30
6.1.1 <i>Úletový popílek</i> :	30
6.1.2 <i>Struska</i>	31
6.1.3 <i>Mikrosilika</i>	32
6.1.4 <i>Odpad z praní drceného vápence</i>	32
6.1.5 <i>Odpadní křemičitý písek</i>	32
6.1.6 <i>Cenosféry (mikrosféry)</i>	32
6.2 LEHČENÁ PLNIVA VYRÁBĚNÉ Z ODPADNÍCH SUROVIN.....	33
6.2.1 <i>Skelný recyklát</i> :	33
6.2.2 <i>Granulát - Liaver</i>	33
6.2.3 <i>Granulát-Poraver</i>	34
6.2.4 <i>Plnivo - Refaglass</i>	34
6.2.5 <i>Plnivo - Geocell</i>	35
6.2.6 <i>Betonový recyklát</i>	36
6.3 PLNIVA VYRÁBĚNÁ Z PŘÍRODNÍCH SUROVIN.....	37
6.3.1 <i>Vermikulit</i>	37
6.3.2 <i>Expandovaný perlit</i>	37
6.3.3 <i>Liapor - keramzit</i>	38
7. POUŽITÉ POSTUPY PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK	39
7.1 PEVNOST VTAHU ZA OHYBU [ČSN EN 13892-2].....	39
7.2 PEVNOST V TLAKU [ČSN EN 13892-2].....	40
7.3 STANOVENÍ TVRDOMI POVRCHU [ČSN EN 13892-6]	40
7.4 STANOVENÍ KONZISTENCE ČERSTVÉ MALTY S POUŽITÍM STŘÁSACÍHO STOLKU [ČSN EN 1015-3]	41

8.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	42
8.1	VÝBĚROVÝ PROCES PLNIVA.....	42
8.1.1	<i>Výběr plniva z hlediska nákladů na pořízení plniva</i>	<i>42</i>
8.1.2	<i>Výběr nevhodnějšího plniva z hlediska stanovených kritérií.....</i>	<i>43</i>
8.2	NÁVRH A ODZKOUŠENÍ VHODNÝCH RECEPTUR PRO PĚNOT VORNÉ LÁTKY	44
8.2.1	<i>Návrh vhodných receptur pro lehčené hmoty na bázi pěnobetonu.....</i>	<i>44</i>
8.2.2	<i>Výsledné hodnoty mechanicko – fyzikálních zkoušek.....</i>	<i>45</i>
8.2.3	<i>Stanovení konzistence.....</i>	<i>46</i>
8.2.4	<i>Tvrdość povrchu.....</i>	<i>47</i>
8.2.5	<i>Fyzikálně-mechanické vlastnosti.....</i>	<i>48</i>
8.3	HLINÍKOVÝ PRÁŠEK.....	50
8.3.1	<i>Výsledné hodnoty mechanicko – fyzikálních zkoušek.....</i>	<i>51</i>
8.3.2	<i>Tvrdość povrchu.....</i>	<i>52</i>
8.3.3	<i>Fyzikálně-mechanické vlastnosti.....</i>	<i>53</i>
8.4	CHLOROVÉ VÁPNO A PEROXID VODÍKU.....	56
8.4.1	<i>Návrh a zkoušení vhodných receptur pro lehčené hmoty na bázi plynobetonů.....</i>	<i>57</i>
8.4.2	<i>Objemová hmotnost čerstvé směsi.....</i>	<i>59</i>
8.4.3	<i>Výsledné hodnoty mechanicko – fyzikálních zkoušek.....</i>	<i>61</i>
8.4.4	<i>Tvrdość povrchu.....</i>	<i>63</i>
8.4.5	<i>Fyzikálně-mechanické vlastnosti.....</i>	<i>64</i>
8.5	OVĚŘENÍ DLOUHODOBÉ STABILITY SUCHÝCH SMĚSÍ A URČENÍ JEJICH VHODNOSTI KE SKLADOVÁNÍ	68
8.5.1	<i>Výsledné hodnoty laboratorních zkoušek.....</i>	<i>68</i>
8.5.2	<i>Porovnání fyzikálně-mechanických vlastností po 3 měsíčním odležení.....</i>	<i>69</i>
9.	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ A OPTIMALIZACE RECEPTUR.....	72
9.1.1	<i>Ekonomické zhodnocení receptur.....</i>	<i>72</i>
9.1.2	<i>Optimalizace receptur.....</i>	<i>74</i>
10.	SHRNUTÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	76
10.1	ETAPA I. - TEORETICKÉ MOŽNOSTI VYLEHČENÍ HMOT PRO PODLAHOVÉ KONSTRUKCE	76
10.2	ETAPA II. - EXPERIMENTÁLNÍ TVORBA VYLEHČENÝCH HMOT PLYNOBETONŮ A PĚNOBETONŮ.....	76
10.3	ETAPA III. - LABORATORNÍ ODZKOUŠENÍ VZORKŮ VYTVOŘENÝCH HMOT.....	77
10.4	ETAPA IV – ZHODNOCENÍ A VÝBĚR RECEPTURY.....	80
11.	CELKOVÉ SHRNUTÍ.....	81
12.	ZÁVĚR	83
	LITERATURA A POUŽITÉ ZDROJE.....	85
	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ.....	87
	SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	88
	SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ	89
	SEZNAM POUŽITÝCH NOREM	90

1. Úvod

Za průmyslovou podlahu můžeme považovat takovou podlahu, která se nachází na místech více mechanicky zatěžovaných nebo vykazujících zvláštní požadavky na její využívání či odolnost. V celé škále případů se jedná především o různé průmyslové, tovární nebo jiné nebytové objekty větších rozměrů. Do kategorie průmyslových podlah se dají zařadit i různé velkokapacitní plochy jako jsou koncertní, reprezentativní a parkovací plochy. Pro průmyslové plochy jsou předpokládána statická i dynamická zatížení mnohem vyšší než u občanských podlahových konstrukcí. Zároveň je nutné brát v úvahu vyšší namáhání pěšími, vozovými i manipulačními prostředky.

Průmyslová podlaha je podle normy ČSN 74 4505 definována takto. “Průmyslová podlaha je podlahovou konstrukcí, která je zatížena rovnoměrným zatížením větším než 5 kN.m^{-2} , nebo pohyblivým zatížením - manipulačními prostředky, jejichž celková hmotnost je větší než 2000 kg. Průmyslovou podlahou je i konstrukce se zvláštními požadavky na odolnost proti obrusu, kontaktnímu namáhání, chemickému působení, a to i v případě, že zatížení je menší než výše uvedené hodnoty.“

Při stále měnící se ekonomické situaci je při výstavbě nových průmyslových podlah kladen důraz na zlepšení potřebných vlastností a trvanlivost materiálů. Na měnící se nároky těchto velkokapacitních zařízení působí ceny stavebních surovin na trhu velkým dílem, proto je stále větším trendem nahrazovat vybrané drahé suroviny surovinami druhotnými a tím dosáhnout celkového snížení ceny hmoty za stejných nebo obdobných vlastností. Zároveň jsou využívána různá aditiva ke zlepšení či úpravě stávajících vlastností, až po úplnou modifikaci hmoty.

S příchodem stále se zvětšující nabídky průmyslových podlah vznikl požadavek na jejich částečné vylehčení za stálého zachování požadovaných mechanických i chemických vlastností. Tento požadavek je zvláště účinný pro vícepodlažní objekty, kdy snížení hmotnosti průmyslových podlahových konstrukcí v celém součtu objektu dosahuje velkých hodnot. Lehčení průmyslových podlah v této diplomové práci bude probíhat především vnášením pórů vzduchu či jiných plynů do matrice materiálu.

2. Cíl

Cílem této diplomové práce je provést analýzu na trhu lehčených stavebních hmot a podlah. Prozkoumání možnosti vylehčení stavebních hmot, a to zejména suchým způsobem, bez přídavku dalších tekutých aditiv. Tato diplomová práce prozkoumá vhodný výběr surovin pro návrh možných receptur s vylehčením pomocí mikropórů, s následným laboratorním ověřením jednotlivých vlastností pro konkrétní suroviny. Receptury budou modifikovány pro nejlepší vhodnou kombinaci vlastností, jako je pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, tvrdost povrchu a objemová hmotnost. Pro konkrétní vybrané směsi, s nejlepšími výsledky k vytvoření lehčené průmyslové podlahy, bude ověřena dlouhodobá stabilita suché směsi a jejich vhodnost ke skladování. Hlavním cílem je vývoj nového materiálu na bázi pěnobetonu nebo neautoklávovaného pórobetonu s využitím vhodných odpadních surovin, který bude možné uvést do stavu připraveného k použití s přídavkem vody bez dalších aditiv.

Po stanovení nejvhodnějších receptur bude ekonomickým výpočtem zhodnocen výběr různých druhů odpadních a lehčených plniv jako plnohodnotná náhrada za běžné kamenivo. Vybrané vhodné receptury budou optimalizačním výpočtem zhodnoceny z pohledu fyzikálně-mechanických vlastností, účinnosti vylehčení a ekonomické stránky.

3. Metodika bakalářské práce

3.1 Etapa I – teoretické možnosti vylehčení hmot pro podlahové konstrukce

V Etapě I jsou zjišťovány možnosti vylehčení stavebních hmot, a to především přímým vnášením pórů vzduchu či jiných plynů do matrice materiálu. Dále jsou tyto možnosti rozdělovány na plynobetony a pěnobetony a je poukazováno na druhy reakcí způsobujících naplynění či napěnění matrice materiálu.

3.2 Etapa II – experimentální tvorba vylehčených hmot plynobetonů a pěnobetonů

Etapa II se zabývá různými druhy receptur založených na rozdílných technologických postupech, k tomu použitých surovin a jejich následné modifikování receptury. Při posuzování receptur bude v této etapě především brán ohled na vylehčení směsi (nakypření – napěnění). V případě nedostačujících výsledků bude receptura modifikována o zvýšenou dávku reakční látky způsobující vniknutí vzduchu či plynu do matrice materiálu.

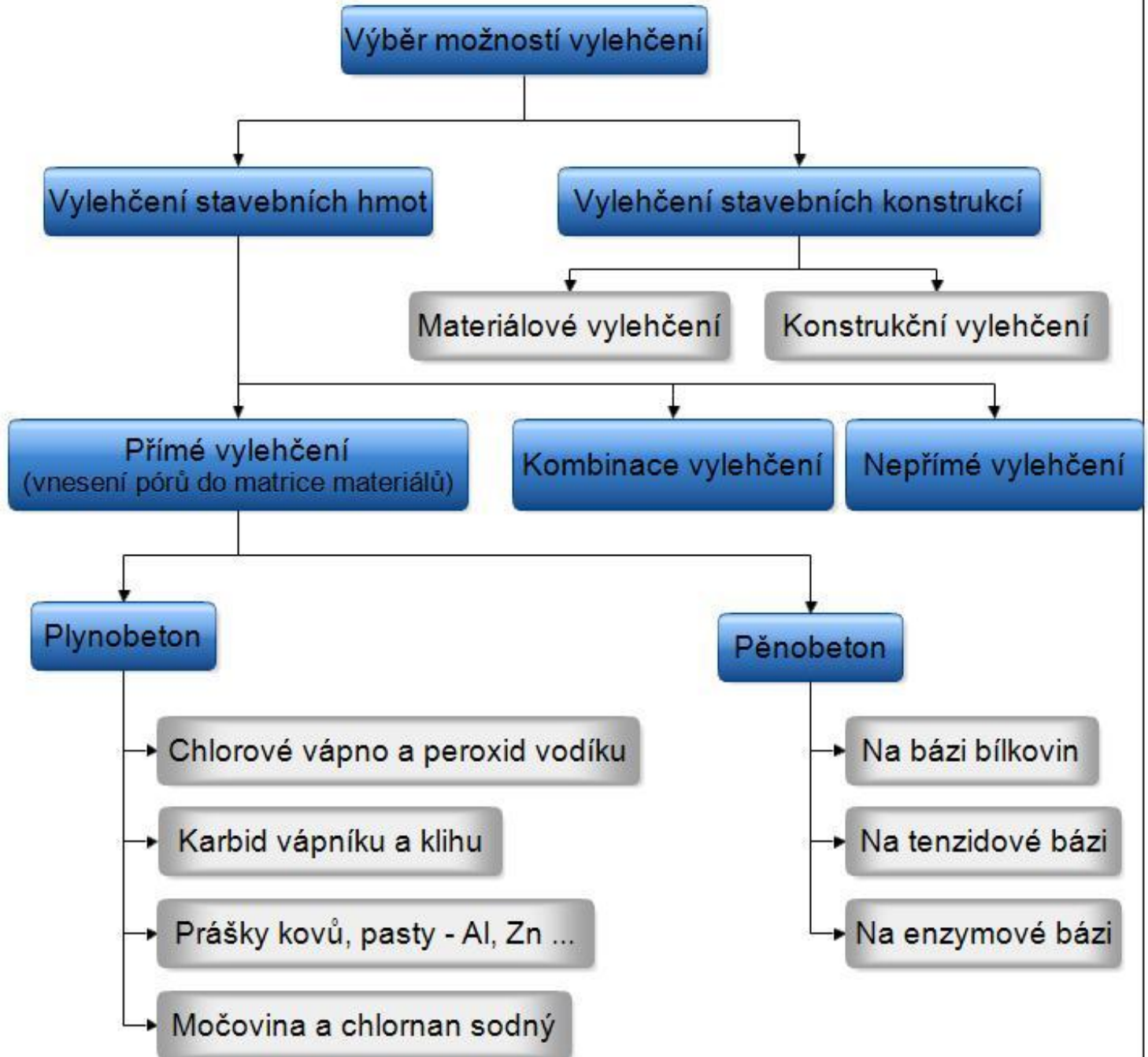
3.3 Etapa III – laboratorní odzkoušení vzorků vytvořených hmot

Etapa III zkoumá vlastnosti vytvořených a již uzrálých vzorků 40 x 40 x 160 mm. Z kritérií, která jsou důležitá pro průmyslové podlahy, zkoumáme především výsledky fyzikálně-mechanických vlastností jako je pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, tvrdost povrchu a objemová hmotnost pro plynobetony. Vzorky pěnobetonů budou zkoušeny na stejná kritéria jako vzorky plynobetonů a navíc budou zkoušeny na zpracovatelnost daného materiálu.

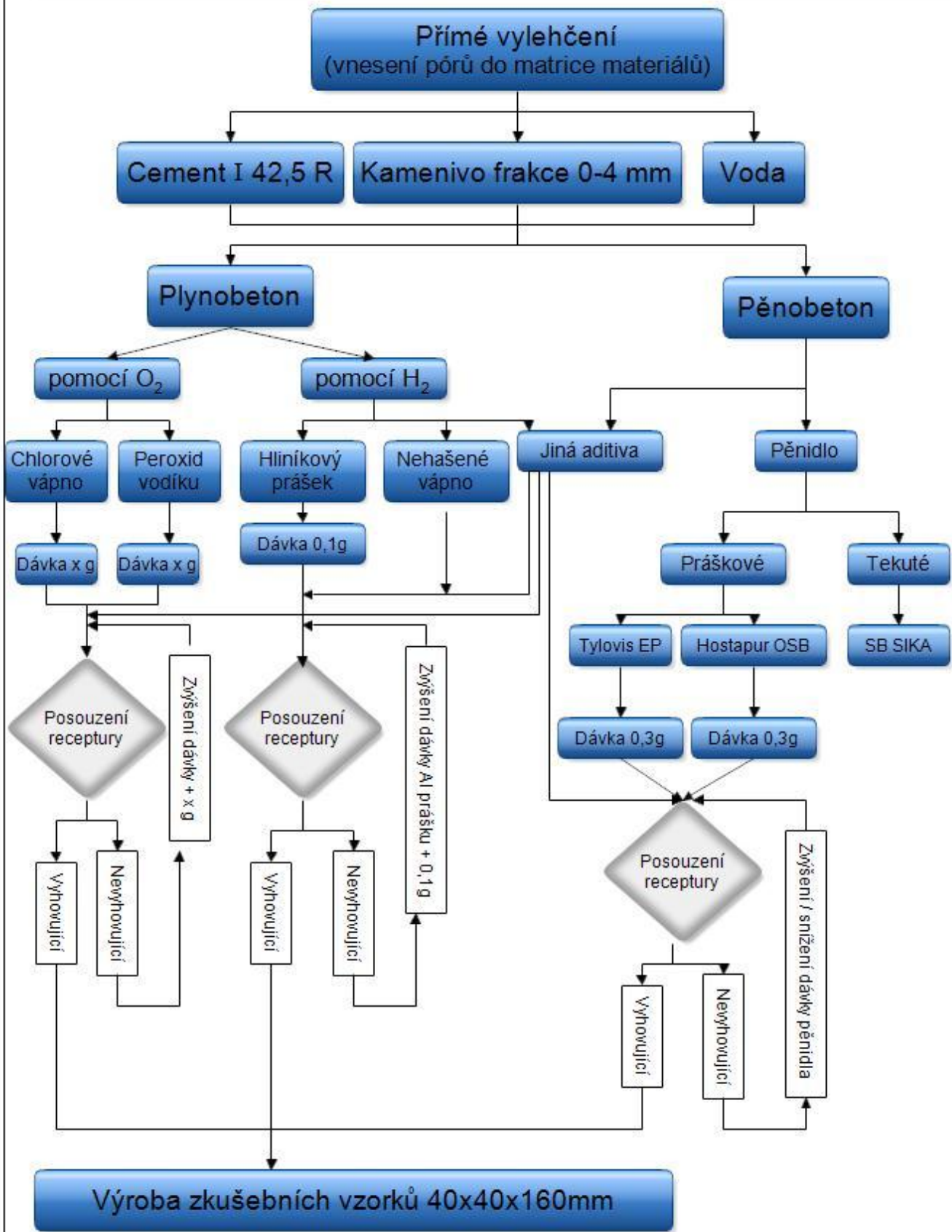
3.4 Etapa IV – zhodnocení a výběr receptury

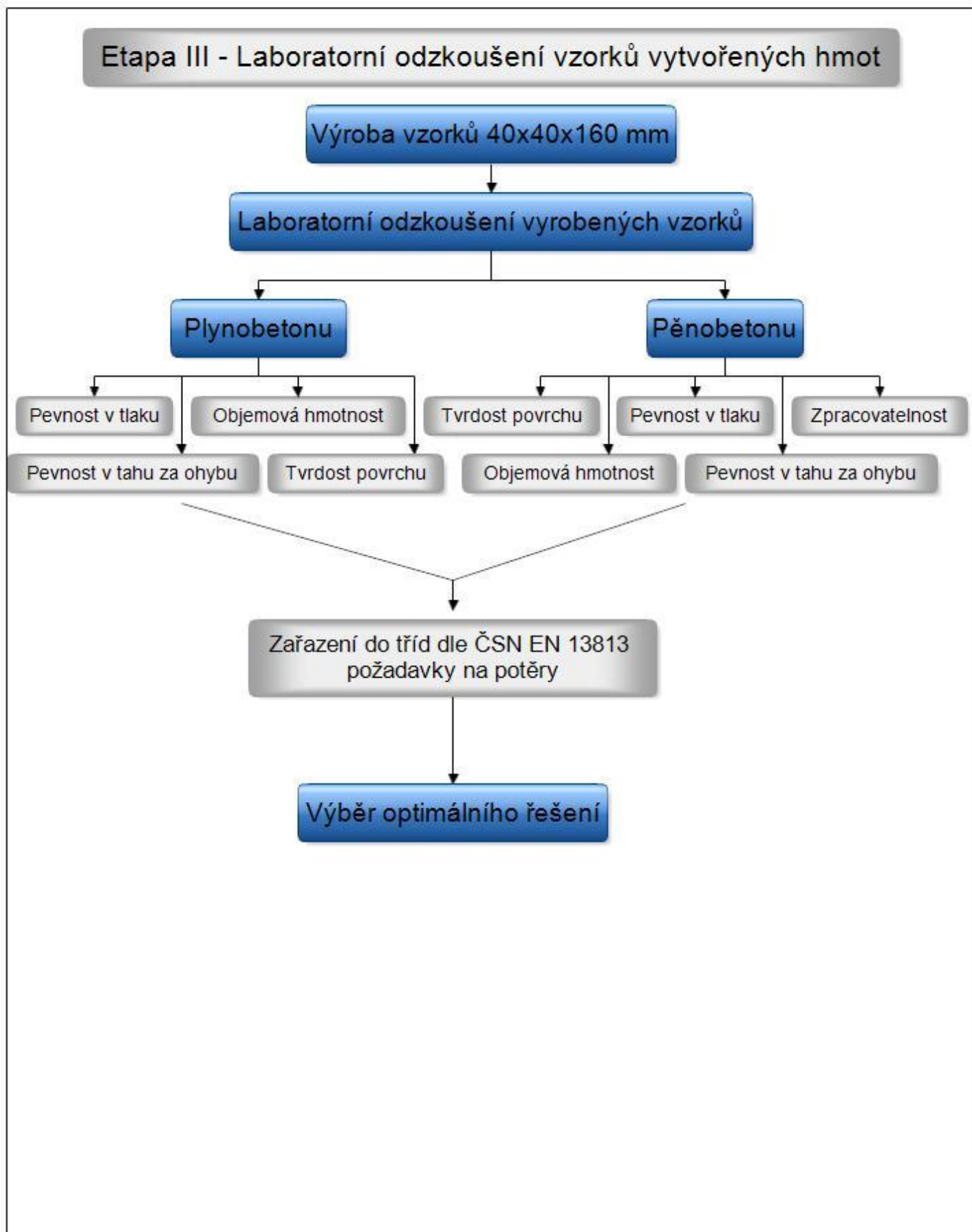
Etapa IV analyzuje dané konkrétní metody vylehčení podle stanovených kritérií. Následně budou dané metody komplexně porovnány a ekonomicky zhodnoceny. V dalším kroku budou podrobeny optimalizačnímu výpočtu podle složení jednotlivých receptur. K posledním krokem bude výběr nejlépe hodnocené receptury.

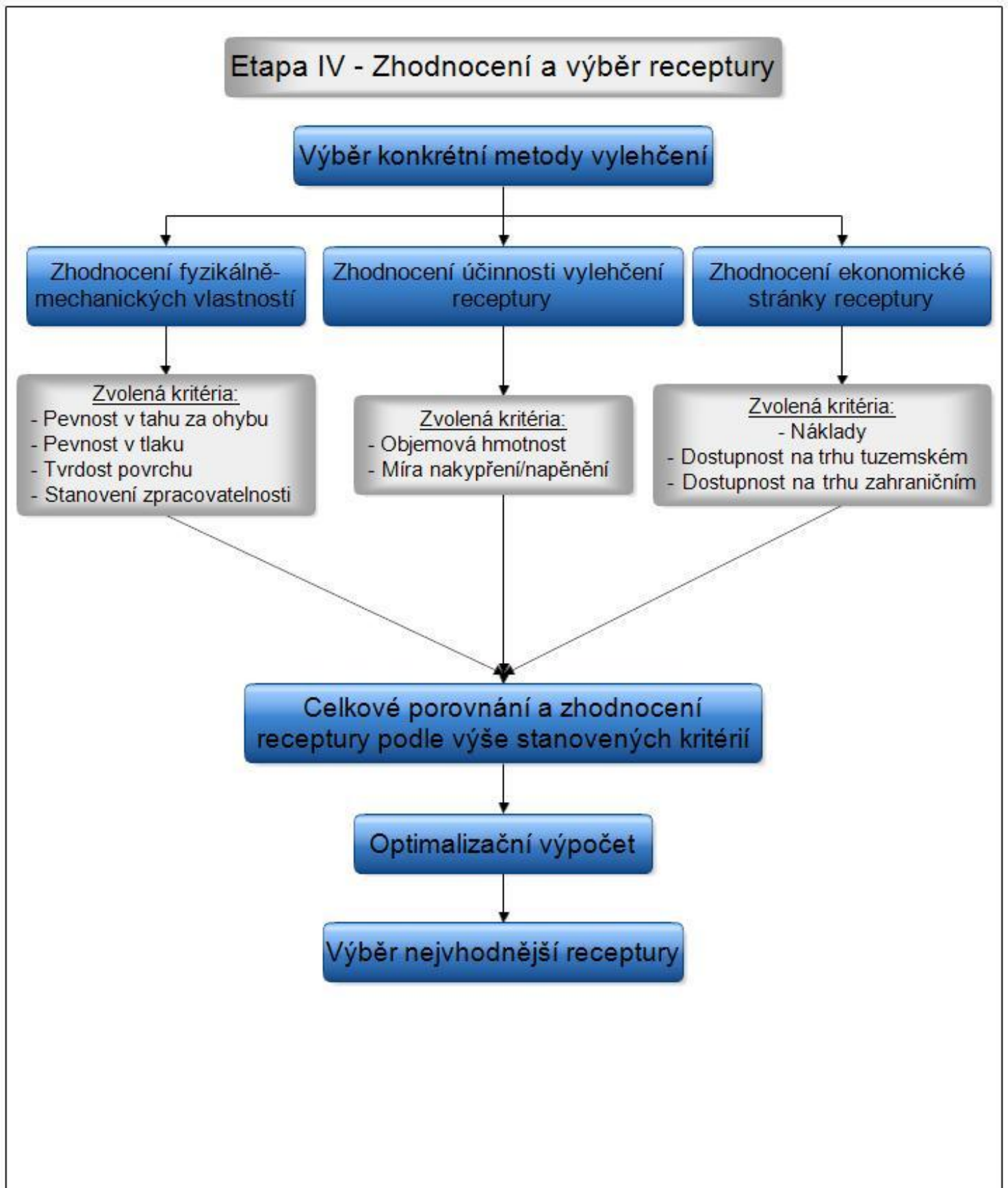
Etapa I - Teoretické možnosti vylehčení hmot pro podlahové konstrukce



Etapa II - Experimentální tvorba vylehčených hmot pro ply/pěnobetonů







4. Podlahy

4.1 Podlahová konstrukce

Pojmem podlaha rozumíme jednovrstvou či vícevrstvou konstrukci, která tvoří vrchní část vodorovných konstrukcí a činí je pochůznými. Podlaha vždy leží na svém podkladovém materiálu a zcela na něj navazuje. Ve vyšších patrech navazuje na stropní konstrukce, zatímco v nejnižším patře na podkladní vrstvu betonu. Na konstrukce podlah jsou kladeny podmínky z hlediska jejich využití, typu a umístění. Podmínkami rozumíme například neprozvučnost, odolnost, bezpečnost, hygienickou nezávadnost, atd.

Za průmyslové podlahy se považují podlahy v skladech, továrních linkách, halách a jiných nebytových objektech, ale i podlahy velkých rozměrů v podobě různých stadiónů, sálů, tělocvičen a jiných míst kde se za nějakými účely shromažďují lidé, stroje či jiná technika. Průmyslové podlahy jsou větších plošných rozměrů s velkým statickým a často dynamickým zatížením od různých manipulačních strojů, techniky či jiného technologického vybavení. U těchto podlah se klade důraz na odolnost, trvanlivost, hlavně použitelnost. V dnešní době jsou kladeny nároky také na ekonomický pohled - za co nejmenší peníze dosáhnout co nejlepších výsledků. [1]



Obrázek 1 - Průmyslová podlaha [24]

4.2 Nejčastější druhy průmyslových podlah

4.2.1 Betonové podlahy (prosté)

Podlahy betonové jsou nejčastějším typem podlah v průmyslu, obchodu i jiných odvětvích. Jsou velmi žádané kvůli jejich životnosti, pevnosti, možnému zatížení, rychlosti a flexibilitě výstavby, otěruvzdornosti a údržbě. U betonových podlah je možné ovlivnit jejich vlastnosti vkládáním různých typů výztuží (železné pruty, drátky, vlákna různých materiálů), ale také způsobem zpracování a dodatečným úpravám.



Obrázek 2 - Betonová podlaha [25]

4.2.2 Pancéřové podlahy

Podlahy pancéřové jsou určitý typ průmyslových monolitických podlah, kde nosný prvek tvoří betonová deska s vpravenou práškovou směsí obsahující tříděná tvrdá plniva, speciální cementy a chemické přísady. Tento systém je využíván kvůli vysoce odolnému povrchu. Kde odolnost proti opotřebení je závislá na vlastnostech nášlapné vrstvy a kvalitě jejího propojení s nosným prvkem.



Obrázek 3 - Pancéřová podlaha [26]

4.2.3 Teracové podlahy

Teracová podlaha je monolitická podlahovina, která se vytváří přebroušením ztuhlé vrstvy betonu složeného z pojivových materiálů a vhodných kamenitých frakcí, popřípadě teracových drtí, příměsí, přísad a záměsové vody. Teracové podlahy jsou vyhledávány pro svou pevnost, tvrdost, ale i barevnost a estetickou hodnotu.



Obrázek 4 - Teracová podlaha [27]

4.2.4 Dřevěné podlahy

Dřevěné podlahy jsou již tradičním a dlouho používaným prvkem v průmyslovém odvětví. V řadě průmyslových staveb je vyžadována kvůli provozu, alespoň částečně dřevěná podlaha. Dřevěné systémy mají početné zastoupení, v základu se liší vlastnostmi, druhem a formou použitého dřeva.



Obrázek 5 - Dřevěná podlaha [28]

4.2.5 Speciální živičná překrytí

Speciální živičná překrytí, tzv. horká technologie, nacházejí u průmyslových podlah uplatnění jen výjimečně, a to vzhledem k dlouhodobému odpařování zdraví škodlivých látek z asfaltu. Speciální živice se v pochůzných vrstvách používají pouze při lepení některých typů dlaždic nebo parket.

4.2.6 Čedičové podlahy

Tavený čedič má vynikající vlastnosti, jako je vysoká pevnost v tlaku, otěruvzdornost a tvrdost, chemická odolnost, nenasákavost, mrazuvzdornost, ekologická a hygienická nezávadnost. Tyto vlastnosti jsou velmi důležité pro tvorbu průmyslových podlah. Zejména jsou využívány pro svou povrchovou úpravu, vysokou životnost a dobrou protiskluznost. [35]



Obrázek 6 - Čedičová průmyslová podlaha [29]

5. Vylehčování stavebních látek

5.1 Možnosti vylehčování:

- A. Vylehčení přímé - Tento typ vylehčení je založený na vnášení pórů vzduchu či jiného plynu do základní matrice hmoty. Přímého vylehčení se dosahuje odpařením vody nebo chemickou reakcí, která způsobuje uvolnění vzduchu nebo plynů. Látky, které se tímto způsobem uvolňují, následně tvoří v matrici hmoty dutiny. Tyto dutiny zvyšují izolační vlastnosti a snižují hmotnost daného materiálu. Tento typ vylehčení je typický pro tvorbu autoklávovaných i neautoklávovaných pórobetonů. Druhým typickým druhem přímého vylehčení pro materiály vhodné pro tuto diplomovou práci jsou materiály vylehčené pomocí napěnění materiálu. Napěnění je využíváno pro řadu materiálů, jako jsou výplně, pórovitá kameniva, organické látky a betonové směsi. U této struktury se vzniklé dutiny ukládají rovnoměrně, tudíž je struktura materiálu homogenní.
- B. Vylehčení nepřímé - Tohoto vylehčení se dosahuje snížením celkové hmotnosti použitých surovin. Převážně se používají organické i neorganické pórovité látky, které obsahují vzduchové dutiny. Tyto dutiny jsou rozloženy v těchto materiálech převážně nerovnoměrně.
- C. Vylehčení ve skladbě konstrukce - Vylehčení ve skladbě se provádí záměrnou skladbou konstrukce a volbou vhodného materiálu (polystyren, dřevo, desky, vzduchové mezery, zásypy, atd.). Je důležité dbát zvláště na materiál a jeho vlastnosti (např. nenasákavé desky), abychom omezili následné negativní chování podlahové konstrukce a její následné znehodnocení. [35]



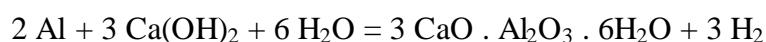
Obrázek 7 - Vylehčení ve skladbě konstrukce [30]

5.2 Plynobetony a plynotvorné činidla

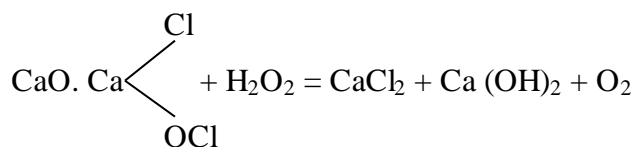
Pro možnost vzniku plynobetonů jsou z literatury či praxe známy čtyři základní rovnice, které uvádějí, za jakých podmínek k nim dochází. Principem těchto reakcí je chemické uvolnění plynů a následné zachycení v matici vytvářeného materiálu. Zachycením odcházejících plynů v matici dochází k celkovému vylehčení směsi plynobetonu a zlepšení určitých vlastností materiálu na úkor snížení pevnosti v tlaku a tahu za ohybu.

Reakce a činidla k nim potřebná:

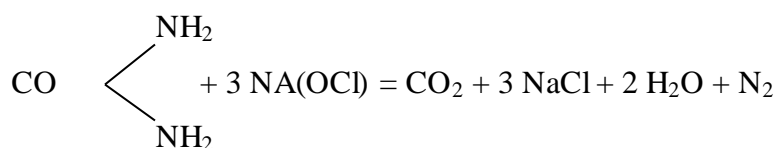
1. Hliníkový prášek nebo pasta a hydroxid vápenatý



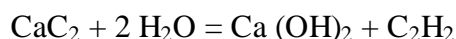
2. Chlorové vápno a peroxid vodíku



3. Močovina a chlornan sodný



4. Karbid vápníku za přídavku křihlu

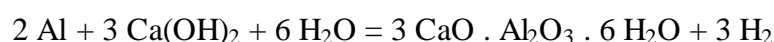


Při tvorbě plynobetonových směsí se nejběžněji využívá jako plynotvorná látka hliníkový prášek předem zaručených kvalit. Obsah aktivního hliníku v hliníkovém prášku musí být alespoň 94 % z celkového množství, se zaručením kolísání menšího než 1 %. Pro komerční využití se dále využívají i prášky jiných látek jako vápníku, zinku, hořčíku, barya nebo lithia. Dále je možné využívat i jiných nakypřujících směsí, jako peroxidu vodíku a chlorového vápna, močoviny a chlornanu sodného, karbidu vápníku za přídavku křihlu nebo kovového prášku a kalcimhydridu. Pro praktickou tvorbu směsí bude používán pouze hliníkový prášek o množství dále podléhajícímu zájmu zkoumání. V celkovém obsahu směsí bude neměnná receptura až na množství přidaného hliníkového prášku. Hlavním sledovaným faktorem bude objemová hmotnost, pevnost v tlaku a v tahu za ohybu, tvrdost povrchu a míra nakypření. Očekávaným výsledkem bude ekonomické vyhodnocení pro danou recepturu,

u které stanovíme přesné poměrové množství účinného hliníkového prášku v závislosti na procentuálním vylehčení, charakteru pevností a dalších zkoumaných vlastnostech plynobetonu. Druhým zkoumaným plynobetonem v této práci bude směs chlorového vápna a peroxidu vodíku. Optimální funkční poměry nejsou z dostupné literatury patrné, proto se tato otázka stane předmětem podrobného zkoumání. Suroviny použité k dalšímu zkoumání budou takové, které se nacházejí na trhu přístupnému běžnému zákazníkovi.

5.3 Hliníkový prášek

Pro tento použitý kovový prvek platí známá chemická rovnice pro nakypření betonu:



Hliníkový prášek je jednou z hlavních průmyslově využívaných výrobních plynotvorných látek. Distribuované balení výrobci na trhu je různé od jednotlivých balení až po průmyslové zásilky.

Z výše uvedené rovnice nakypření je patrné, že vznikajícím expanzním plynem pro vylehčení matrice je vzdušný vodík. V běžném výrobním procesu se využívá na 1 m³ pórobetonu okolo 0,1 - 0,5 kg.m⁻³ odmaštěného hliníkového prášku. Z důvodů možnosti samovznícení či výbuchu se do vyráběného hliníkového prášku přidává minerální olej nebo tuky bránící nechtěným reakcím. Látky vytvoří povrchový film, který brání těmto negativním vlivům. Tento postup je nutný z důvodů snadné oxidace hliníkového prášku. Prvním krokem při výrobě plynobetonu je proto odmaštění hliníkového prášku. Odmaštění probíhá chemickou reakcí alkalickými látkami, nejčastěji jsou využívány mazlavá mýdla, klišopryskyřičné emulze, louhy či soda. Tyto látky povrchový film zmýdelní a tím i odstraní. Při výrobě, kde se používá hliníkový prášek, je nutné tento krok provádět těsně před přidáním do výrobní směsi. Dokonale odmaštěný hliníkový prášek je poznat podle toho, že se ve vodě disperguje a sedimentuje, místo toho aby se vznášel na hladině.

U průmyslově používaného hliníkového prášku je hlavním kritériem množství a rychlost vývoje vylehčujícího plynu, který je určován alkalitou, eventuálně přímo obsahem alkálií. Při výrobě plynobetonů je výhodné přidání nehašeného vápna nebo hydroxidu sodného. Přidání zvyšuje teplotu vznikající směsi a zaručuje co možná nejlepší využití hliníkového prášku pro vývoj expanzního plynu.

Specifické složení vybraného hliníkového prášku: Al min. 98,0 %; Fe max. 0,4 %; Si max. 0,4 %; Cu max. 0,02 %. Průměrná velikost částí je 65 mikronů. Prášek je podle normy látkou definovanou jako H228 hořlavá tuhá látka a H260 látka, která při styku s vodou uvolňuje hořlavé plyny schopné se samovolně vznítit.

Požadavky pro používání hliníkového prášku

Při výrobním procesu musí hliníkový prášek splňovat daná kritéria, kvůli zajištění kvality výrobního procesu. Hliníkový prášek s nižšími vlastnostmi může způsobit degradaci celkové směsi.

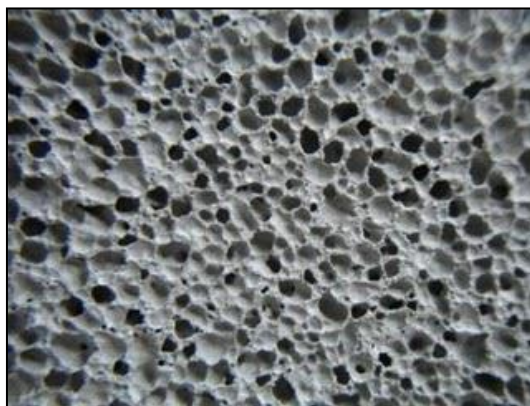
- a) Obsah aktivního hliníku musí být nejméně 94% a nesmí kolísat o více jak 1 %.
- b) Hliníkový prášek musí být velmi jemný, protože se s jemností velmi urychluje vývoj plynu. Specifický povrch se má pohybovat od 700 - 1200 m² kg.
- c) Hliníkový prášek se musí skládat z rovnoměrně velkých stříbrošedých částic šupinového tvaru, vzniklých rozmačkáním při mletí, a tudíž majících největších reaktivnost. Dále prášek nesmí obsahovat slepené hrudky nebo zrna kulovitá, které vznikají rozprášením tekutého hliníku a mají relativně malý reaktivní povrch nebo část zrn o větším průměru, protože reagují méně dokonale. Plynové bublinky, které se na nich vyvíjejí, by byly příliš velké a struktura pórobetonu by potom byla nerovnoměrná.
- d) Obsah tuku nemá překročit 1,3 %, aby nevznikaly potíže při odmašťování, eventuálně opožděný vývoj plynu.
- e) Vlhkost hliníkového prášku nesmí být vyšší než 0,2 %.



Obrázek 8 - Hliníkový prášek [foto:autor]

5.3.1 Historie používání hliníkového prášku

Za začátek výroby pórobetonů se pokládá patent A. Ericsona, používaný od roku 1924. Tato technologie se postupně ve velké míře uplatňovala ve Švédsku, Dánsku, Polsku a v zemích bývalého SSSR. Začátek výroby byl dán krizí ve Švédsku, kdy se dovážely velmi draze suroviny pro výrobu energie, jako jsou uhlí a oleje. Následkem bylo hledání materiálu, který by uspořil velké množství energie, a to jak při výrobním procesu, tak i při jeho dlouhodobém používání. Vzhledem k nehostinnému prostředí v skandinávské oblasti byly náklady na vytápění tradičních staveb z masivních zdících materiálů opravdu velké, proto vznikl vizionářský stavební materiál – pórobeton s velkými vzduchovými dutinami s velmi dobrými tepelně izolačními vlastnostmi. Masově se začal vyrábět v roce 1929. U nás je za začátky výroby pórobetonu považována produkce z roku 1958. [35]

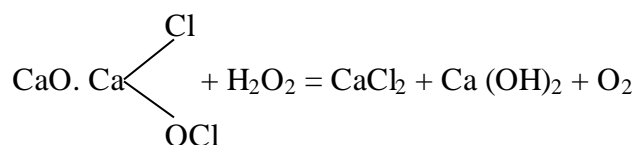


Obrázek 9 - Struktura pórobetonu [31]

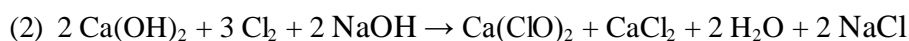
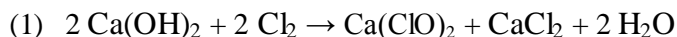
5.4 Chlorové vápno a peroxid vodíku

Reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku je v praxi běžně nepoužívaná metoda naplnění matrice vyráběného materiálu. V odborné literatuře je možné nalézt níže zmíněnou rovnici reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku.

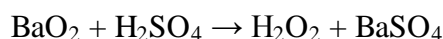
Chlorové vápno a peroxid vodíku



Smícháním chlorového vápna a peroxidu vodíku vzniká chemická reakce, kde vzdušný kyslík uniká a následně se zachycuje v matrici daného materiálu. Chlorové vápno (Chlornan vápenatý) se vyrábí vápnickovým (1) nebo sodíkovým (2) procesem.



Na pohled je chlorové vápno bílé nebo nažloutlé ve formě prášku se silnými oxidačními účinky. Chlorové vápno se využívá k dezinfekci, bělení, čištění povrchů a textilu. Od ostatních druhů vápen je možné chlorové vápno rozlišit už podle typického zápachu chlóru. Chlorové vápno má nepříznivé účinky na organismus při větším množství nebo při vdechnutí. Druhou složkou z výše zmíněné reakce je peroxid vodíku, lidově nazývaný kysličník. Jde o čirou kapalinu s viskozitou větší než voda, která má silné oxidační, ale i redukční účinky. Využívá se k dezinfekci, k odbarvování vlasů i například jako součást pohonu různých bojových raket či torpéd za druhé světové války. Poprvé byl peroxid vodíku připraven v roce 1818 z kyseliny sírové s peroxidem barnatým a odpařením nadbytečné vody za sníženého tlaku dle rovnice:



Při vyšších koncentracích peroxidu vodíku je nutné dodržovat bezpečnostní předpisy, kvůli možnému poleptání kůže, samovznícení, žravosti nebo vzniku výbušných par.

5.5 Pěnobetony a pěnotvorná činidla

Princip tvorby materiálu na bázi pěnobetonu je určen fyzikálním principem tvorby dostatečně stálých bublin vzduchu a následným vstřebáním do matrice materiálu. Tento postup lze provést přidáním pěnotvorného činidla přímo do vytvářené směsi, a to jak do suché tak do mokré formy podle druhu pěnotvorné přísady nebo vytvořením pěny mimo připravovanou záměs a její následné promíchání s připravovaným materiálem.

5.5.1 Historie používání pěnobetonu

První výskyt pěnidel je datován v Rusku již před osmdesáti lety. Pěnidlo bylo vyráběno z rostliny rostoucí ve střední Asii (bohužel jméno rostliny je v současné době neznámé). Ve 30 letech se začali sovětsí vědci zabývat myšlenkou vytvořit experimentální pěnidlo (podobné mýdlu), pro přidavek do malt, které by bylo možno průmyslově vyrábět. Výsledek tohoto nového experimentu byl nový stavební materiál. Teprve později odborníci začali tento materiál aktivně využívat v průmyslu jako pěnobeton, který vzniká smícháním cementu a chemických přísad. Na základě tohoto vývoje se v Rusku začaly vyrábět stavební materiály a dílce vyrobené z pěnobetonu: bloky, panely, příčky, které přesahovaly tepelně izolačními vlastnosti výrobky z cihel a betonu zhruba 3 - 5x. Pěnidla pracovala na bázi povrchově aktivních látek (tenzidů). [35]

Rozdělení pěnidel podle účinných látek:

A. Pěnidla na bázi bílkovin

Látky na bázi bílkovin se vyrábí hydrolyzou živočišných bílkovin obvykle z rohů, krve, kostí, popřípadě podobných odpadů z chovu skotu, prasat či jiných živočišných schránek. Tato výroba je nepřesná a vzhledem k měnícím se surovinám dochází ke kolísání kvality v konečném stavu výrobku. Dalším faktorem je velmi nepříjemný zápach z těchto produktů.

B. Pěnidla na bázi povrchově aktivních látek

Syntetické pěnotvorné látky jsou čistě chemického původu s konstantní kvalitou. Povrchově aktivní látky se hromadí na fazi rozhraní kapaliny či plynu a vytváří stabilizující film. Pro dobré pěnidlo je nutná schopnost filmu reagovat s dostatečně velkou změnou povrchového napětí v roztoku. Velmi velkou roli hraje rychlost difúze těchto povrchově aktivních látek.

C. Pěnidla na bázi enzymové

Enzymatické pěny jsou výsledkem nejnovějšího vývoje. Skládají se převážně z vysoce aktivních bílkovin rostlinného původu. Dosahují optimálnější kvality bez typického zápachu. [35]

5.5.2 Pěnobeton

Hmoty vylehčené fyzikálním jevem napěnění za přídavku pěnotvorného činidla a většinou portlandského cementu nazýváme pěnobetony. Výroba pěnobetonů vmísením předem vytvořené pěny do hmoty se nejčastěji využívá při tvorbě in-situ. Tento krok je podmíněn výkonnějším míchacím zařízením, které zlepšuje celkové procentuální vylehčení vytvořené směsi a zároveň umožňuje danou hmotu přivádět na místo možného zpracování. Sjednocení zařízení mísícího pěny a zároveň plnicí funkci čerpadla je v in-situ velmi výhodné. Dochází k ušetření pracovních nákladů za techniku, pracovní síly a manipulaci. Velkou nevýhodou jsou počáteční vstupní náklady spojené s koupí zařízení a příslušenství. Druhou možností tvorby pěnobetonu je výroba přímo na lince, kde je takto vzniklý pěnobeton využíván převážně k tvorbě tvárnic, bloků, panelů atd. Suchá pěnidla se dávkuje na celkové množství cementu v dané výrobní směsi. Základní rozsah zaručených vlastností pracovních teplot je v rozmezí mezi +5 do +30 °C. Rozsah je možné upravit přidáním aditiv nebo jenom zvýšenou péčí o hmotu a používané povrchy. Z nejpoužívanějších aditiv jsou chemické přípravky, které zabraňují nebo zpomalují odpařování vody. Povrchy je možné chránit fóliemi nebo rohožemi, a to jak proti odpařování, tak proti osychání povrchové vrstvy vlivem slunečního záření.

Výhody lehkých betonů pro podlahy:

- Nízká objemová hmotnost
- Vysoké tepelněizolační schopnosti
- Nehořlavost
- Dlouhodobá stálost
- Propustnost pro páru
- Odolnost proti rázům a plísním
- Dobrá mechanická pevnost v závislosti na objemové hmotnosti
- Odolnost proti zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům [35]



Obrázek 10 - Stroj pro výrobu pěny na stavbě [25]

5.5.3 Použitá pěnotvorná činidla

Sika SB2

Pěnotvorné činidlo je výrobkem německé firmy Sika. Toto pěnidlo je navrženo na vytvoření pěny mimo hmotu a následné mísení. Princip napěnění je založen na chemické bázi organických tenzidů. Sika SB2 je vzhledem k způsobu druhu užití vhodná pro linkovou výrobu tepelné izolace, tvarovek, bloků, výplňových betonů a výrobě in-situ lehčených malt a betonů s objemovými hmotnostmi od 400 kg.m^{-3} do 2000 kg.m^{-3} . Zjevnými výhodami jsou nízká váha stavebních konstrukcí, možnost nastavení objemové hmotnosti dané hmoty množstvím vmísené pěny a zlepšení fyzikálních vlastností betonu. Pěnidlo samo o sobě je bezbarvá až nažloutlá kapalina vyšší viskozity s minimální teplotou zpracování $+1^\circ\text{C}$. Optimální dávkování je stanoveno výrobcem na $1,5 - 2,3 \text{ kg.m}^{-3}$ pěny.



Obrázek 11 - Pěna z pěnidla Sika SB2 [32]

Hostapur OSB

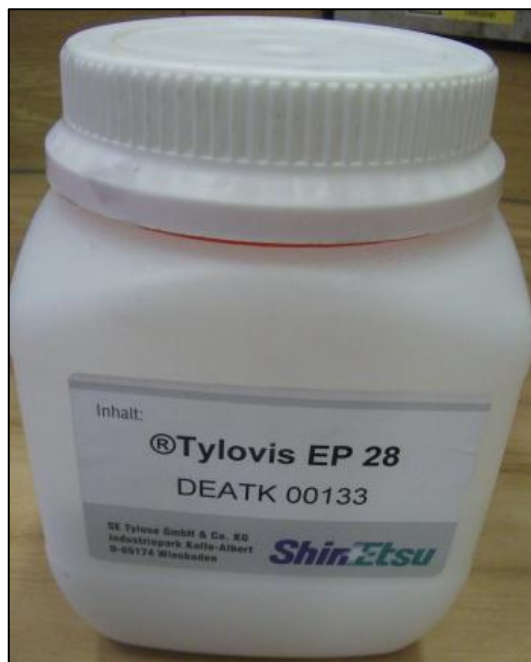
Tato přísada je založena na bázi chemických povrchově aktivních látek. Je určena převážně pro suché malty a směsi, do kterých vnáší mikropóry vzduchu. Dávka doporučená výrobcem se pohybuje v rozmezí 0,01 - 0,03 % k suché směsi. Pěnidlo působí i jako částečný plastifikátor a zlepšuje zpracovatelnost směsi. Výrobcem tohoto produktu je firma Esolyt.



Obrázek 12 - Přísada HOSTAPUR OSB [foto:autor]

Tylovis EP 28

Tato přísada má disperzní efekt a působí jako mírný plastifikátor a částečně brání odchodu vzduchu z účinné matrice, ve které vytváří mikropóry vzduchu. Při použití této přísady dochází ke zlepšení zpracovatelnosti jak pro cementové, vápenné i sádrové matrice. Doporučené dávkování by mělo být mezi 0,01 - 0,03 % ze suché směsi. Přísada je založena stejně jako pěnidlo Hostapur OSB na bázi tenzidů. Výrobce tohoto produktu je firma Esolyt.



Obrázek 13 - Pěnotvorná přísada Tylovis EP 28 [foto:autor]

6. Plniva vhodná pro vylehčené receptury

Tuzemský a zahraniční trh obsahuje velké množství rozličných plniv fungujících jako částečná či úplná náhrada běžného kameniva využívaného pro tvorbu směsí průmyslových podlah. Tato plniva se liší rozlišností frakcí, dostupností, cenou a hlavně užitnými vlastnostmi. Pro další tvorbu receptur byl vytvořen jen omezený výčet vhodných plniv.

Pojiva byla pro přehlednost diplomové práce rozdělena na 3 kategorie:

- Plniva z odpadních látek
- Lehčená plniva vyráběné z odpadních surovin
- Plniva z přírodních látek

6.1 Plniva z odpadních látek

Tyto látky vznikající při výrobě jako vedlejší či úplně nechtěný produkt. Proto jejich opětovné využívání je velmi praktické z mnoha hledisek, především z důvodu výrazných úspor. Při použití těchto plniv dochází ke změně pořizovacích nákladů. Při vhodném upravení vlastností daných směsí, výběru odpadních materiálů a vyplnění křivky zrnitosti. Odpadní látky je možné využívat jako částečnou náhradu za klasické plnivo. [3]

- Úletový popílek
- Struska
- Mikrosilika
- Křemičitý úlet
- Odpad z praní drceného vápence
- Odpadní křemičitý písek

6.1.1 Úletový popílek:

Tento druh odpadního plniva je produktem získávaným ze spalování práškového antracitu, černého nebo hnědého uhlí. Následně je zachycován v elektrostatických či mechanických odlučovačích z plynů jako velmi jemně zrnitý prášek. Vlastností popílků jsou poměrně v delším časovém horizontu stálé. Popílek se skládá převážně z kuliček skla s hladkým povrchem. Zvláštní vlastností křemičitého úletového popílku je jeho pucolánová

aktivita, s vápnem a vodou reaguje za vzniku pojivých fází, které jsou podobné těm obsaženým v portlandském cementu. [15]



Obrázek 14 - Úletový popílek do betonu [15]

6.1.2 Struska

Struska vzniká jako vedlejší produkt termických a spalovacích procesů, především při výrobě surového železa ve vysokých pecích. Struska se zpracovává rychlým ochlazením produkované taveniny vodou, kvůli zastavení krystalizace a přetrvání sklovitého charakteru. [35]



Obrázek 15 - Struska [foto:autor]

6.1.3 Mikrosilika

Známá také pod názvem křemičitý úlet, který je vedlejším produktem při výrobě křemíku. Mikrosilika, jak naznačuje její název, je velmi jemný materiál skládající se z kulovitých částic se středním průměrem zrn 150 nm. V mikrosilice je obsažen až 98% podíl SiO_2 . Je využívána pro zvyšování pevností betonů a zvýšení jeho odolnosti vůči korozi.

6.1.4 Odpad z praní drceného vápence

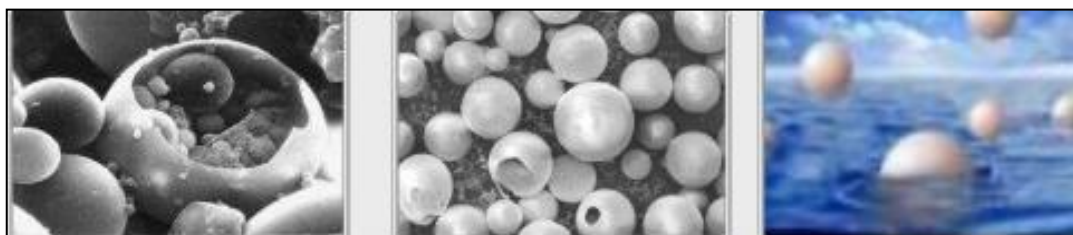
Tento odpad získáváme z vstupních surovin, s vysokým obsahem vápence, ve fázi praní a sušení. Při procesu praní a sušení vzniká odpad, který má vlhkost kolem 8 %, proto se před použitím dosušuje. Před začátkem výroby je nutné na lince vybrat ručně cizorodé látky jako kovy a jiné. [35]

6.1.5 Odpadní křemičitý písek

Písek je směsicí malé kamenité frakce z různých lokací původu. Křemičitý písek je tvořen převážně zrny křemene různé velikosti a tvaru. Jako odpadní písky jsou většinou brány písky s nevhodnou příměsí či frakcí, které se nehodí do určeného betonu. [35]

6.1.6 Cenoféry (mikrosféry)

Cenoféry jsou velmi lehkou plnicí surovinou získávanou plavením popílků. Dnes jsou již spíše vyráběny průmyslovou výrobou. Cenoféry jsou žároodolný, sypký materiál sférického tvaru o rozptylu velikosti od 10 do $500 \cdot 10^{-6}$ m. Bod tání se u cenofér pohybuje kolem 1300 °C, proto jsou hojně využívány do různých izolačních dílců, malt, plastických materiálů, obkladaček a dlaždic. Obvyklou barvou cenofér je bílá až šedá. [14]



Obrázek 16 - Cenoféry (mikrosféry) [14]

6.2 Lehčená plniva vyráběné z odpadních surovin

Jedná se především o plniva procházející úpravou či sérií úprav, které zlepšují jejich vlastnosti z různých odpadních materiálů. Často dochází k úplné změny struktury daného materiálu.

- Skelný recyklát
- Granulát - Liaver
- Granulát-Poraver
- Plnivo - Refaglass
- Plnivo – Geocell
- Betonový recyklát

6.2.1 Skelný recyklát:

Jako skelný recyklát je v dnešní době myšleno převážně recyklované sklo obalové a obrazkové. Nejzastoupenějším sklem je sklo obalové lahvové, které se zpětně zpracovává zahříváním na teplotu 1500°C pro následné zpracování. Lahvové sklo se převážně vyrábí z 50% křemičitého písku, 16% sody (uhličnan sodný), 12% vápence (uhličnan vápenatý), 18% odpadního skla (drcené střepey) a 4% ostatních látek. [15]

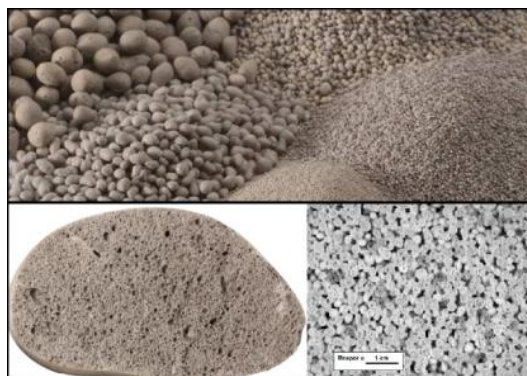


Obrázek 17 - Skelný recyklát [15]

6.2.2 Granulát - Liaver

Granulát Liaver se vyrábí z expandovaného skelného odpadu. Prvotní rozdrcené sklo se rozdrucuje a zhutní, po aplikaci těchto kroků probíhá expanzní proces v peci při teplotách 750 až 900°C. Granulát Liaver je prodáván ve frakcích od 0,1 až do 16 mm. Zrnitost

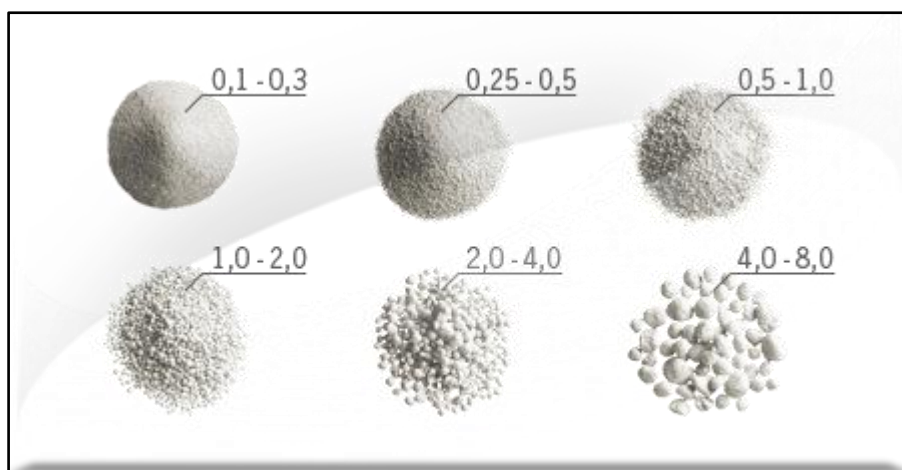
granulátu jemných frakcí se nachází v rozmezí 0,5 – 1 mm se sypnou hmotností kolem 250 kg.m^{-3} . Má výborné izolační vlastnosti, je odolný proti kyselinám, louhům a organickým rozpouštědlům. Nachází se ve skupině A1 – nehořlavý. Granulát Liaver je složen převážně z 71% SiO_2 , 13% Na_2O , 8% CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO a některé stopové prvky. Liaver je využíván do suchých malt, lehčených i izolačních omítek, jako násypy a výplně, lehčených betonů a protipožárních desek. [17]



Obrázek 18 - Kamenivo Liaver [17, 33, 34 úprava: autor]

6.2.3 Granulát-Poraver

Granulát Poraver je z expandovaného tříděného skelného odpadu, vyrábí se šest frakcí zrnitosti. Barva kameniva Poraver je krémově bílá s udanými pevnostmi v rozmezí 0,5 až $6,5 \text{ N.mm}^{-2}$. Dále se granulát Poraver vyznačuje vysokou tepelnou odolností až do $700 \text{ }^\circ\text{C}$. [18]



Obrázek 19 - Granulát Poraver [18]

6.2.4 Plnivo - Refaglass

Plnivo Refaglass je vyráběno převážně z lahvového skelného recyklátu. Toto plnivo je ve stavebnictví využíváno v širším záběru, především jako možná náhrada izolačních

materiálů. Materiál pro výrobu plniva Refaglass je prvotně rozdrčen na jemný prach a homogenizován s přidáním aditiv, následuje výpal na pásovém dopravníku a expanzní napětí v peci. Tímto krokem vznikají převážně uzavřené póry, které jsou nenasákavé s nízkou objemovou hmotností. Toto plnivo se vyznačuje dobrou tepelnou odolností s bodem měknutí kolem 700°C a je zařazeno do třídy nehořlavosti A1. Plnivo je především využíváno jako zásypové tepelně izolační materiály. [19]



Obrázek 20 - Plnivo Refaglass připravené pro průmyslovou podlahu [19]

6.2.5 Plnivo - Geocell

Plnivo Geocell je vysoce tepelně izolační materiál, který je vyráběn expanzí ze starého skelného odpadu při teplotách kolem 900°C. Takto vzniklý materiál se následně ochladí a rozláme na příslušné frakce. Výsledný materiál se vyznačuje velmi nízkou objemovou hmotností kolem 150 kg.m⁻³, dobrou zhutnitelností, nehořlavostí třídy A1 a mrazuvzdorností. Toto plnivo je nejčastěji využíváno pro izolační materiály, zásypy a lehké potěry. [20]



Obrázek 21 - Plnivo Geocell [foto:autor]

6.2.6 Betonový recyklát

Betonový recyklát je získáván z různých zdrojů, ze stavebních či demoličních prací druhotným přetříděním a podrcením vhodného betonového materiálu na požadované frakce. Betonový recyklát se stal předmětem mnoha zkoumání či laboratorních prací a jeho využití je zakotveno i v některých normách. Jelikož se jedná o recyklát, dosahující oproti jiným kamenivům použitým ve stejných směsích nižších fyzikálně-mechanických vlastností. Betonový recyklát snižuje především tyto vlastnosti: pevnost v tlaku o 10 – 15 %, modul pružnosti o 15 – 20 %, objemovou hmotnost a nepříznivě ovlivňuje konzistenci celkové směsi. Betonový recyklát je často využíván jako podkladový materiál pro různé druhy vozovek, jako podložní materiál a jako náhrada přírodního kameniva do konstrukčních betonů, u kterých není zapotřebí vysokých pevnostních tříd. [21]



Obrázek 22 - Různé frakce betonového recyklátu [21]

6.3 Plniva vyráběná z přírodních surovin

Do této kategorie spadají převážně zrnitá kameniva nízkých objemových hmotností, která většinou prošla nebo jsou schopna projít procesem expanze za pomoci obsažené vody nebo jiných plynů. Tato plniva mají většinou dobré izolační schopnosti a vysoký bod tání. [35]

- Vermikulit
- Perlit
- Keramzit

6.3.1 Vermikulit

Plnivo Vermikulit je hořečnatoželeznatá slída, která prošla procesem expandování. Expandování plniva Vermikulit je založeno na změně skupenství vody uložené v krystalické mřížce na vodní páru. K této skupenské přeměně dochází při teplotách 1100 °C a vyšších, zároveň probíhá oddělování laminárních vrstev obsažených v jílovém minerálu. Expanzí se objem minerálu zvětšuje až v rozsahu 20 % – 30 %. Plnivo Vermikulit má nízkou objemovou hmotnost, dobré izolační účinky a širokou škálu užití. Nejčastěji se ve stavebním oboru využívá do lehčených tepelně izolačních malt, lehčených betonů, tvarových dílců a desek. [5]



Obrázek 23 - Plnivo Vermikulit [foto:autor]

6.3.2 Expandovaný perlit

Expandovaný perlit je zrnitý, pórovitý, lehký materiál bílé až šedé barvy vyráběný expanzí ze surového perlitu, který obsahuje zhruba 5 % chemicky vázané vody. Voda se při zahřátí ze struktury uvolňuje při teplotách 850 - 1150 °C za celkového zvětšení objemů 5x až 10x. Perlit vznikl sopečným působením a jedná se v podstatě o amorfni křemičitan hlinitý podobný pemzám či smolkům. Expandovaný perlit je chemicky netečný, s výbornými tepelně

a akusticky izolačními vlastnostmi, s nízkou objemovou hmotností pohybující se kolem 35 kg.m^{-3} až 150 kg.m^{-3} . Expandovaný perlit je často ve stavebnictví využíván do tepelně izolačních zdí a omítkových malt, výrobu lehkých betonů (perlitbetonů), zateplení konstrukcí i jako výplňový materiál. [22]



Obrázek 24 - Expandovaný perlit [foto:autor]

6.3.3 Liapor - keramzit

Liapor je granulát o velmi nízké objemové hmotnosti, který je vyráběn expanzí z vhodných přírodních jíů. Je známý především pro svou dobrou pevnost, malou nasákavost, zdravotní nezávadnost a výborné tepelně izolační účinky. Liapor je převážně kulatý s uzavřeným slinutým povrchem. Granulát Liapor je vyráběn v mnoha frakcích a ve stavebnictví je často vyhledáván jako zásypový materiál, materiál vhodný pro minimalizaci zatížení, výplň konstrukcí, do izolačních betonů a malt, atd.



Obrázek 25 - Granulát Liapor [foto:autor]

7. Použité postupy prováděných zkoušek

7.1 Pevnost v tahu za ohybu [ČSN EN 13892-2]

Pevnost v tahu za ohybu se stanoví na zkušebních tělesech zhotovených podle ČSN EN 13892-1. Pevnost v tahu za ohybu se vypočítá ze zatížení, které vede k porušení zkušebního tělesa při zatížení, vyvozeného v jeho středu.

$$R_f = \frac{1,5 F_f * l}{b * d^2} [N.mm^{-2}]$$

Použité zkratky a vztahy:

F_f - zatížení (N) které vede k porušení při zkoušce v tahu za ohybu

l - vzdálenost podpěr (mm) mezi osami dvou válcových podpěr při zkoušce v tahu za ohybu

b - šířka zkušebního těles (mm) pod středovým válcem při zkoušení pevnosti v tahu za ohybu

d - tloušťka zkušebního těles (mm) pod středovým válcem při zkoušení pevnosti v tahu za ohybu

R_f - pevnost v tahu za ohybu v $N.mm^{-2}$



Obrázek 26 - Pevnost v tahu za ohybu [foto:autor]

7.2 Pevnost v tlaku [ČSN EN 13892-2]

Zkušební tělesa se rovnoměrně zatíží tlakem, rovnoměrně rozloženým po části tělesa. Pevnost v tlaku se vypočítá ze zatížení, které vede k porušení zkušebního tělesa.

$$R_c = \frac{F_c}{A} [N \cdot mm^{-2}]$$

Použité zkratky a vztahy:

F_c - zatížení které vede k porušení při zkoušce v tlaku

A - plocha zkušebního tělesa, při zkoušce v tlaku ve styku s tlačnými destičkami (1600 mm²)

R_c - pevnost v tlaku N.mm⁻²

7.3 Stanovení tvrdosti povrchu [ČSN EN 13892-6]

Tvrдость povrchu se stanoví, jako hloubka vtláčení ocelové kuličky, umístěné na povrchu zkušebního tělesa pod normalizovaným tlakem. Tvrдость povrchu se vypočítá jako podíl zatížení, vyvozeného na ocelovou kuličku a plochy vtláčení vypočtené z hloubky vtláčení.

$$SH = \frac{F}{d * \pi * t} [N \cdot mm^{-2}]$$

Použité zkratky a vztahy:

t - hloubka vtláčení

F_v - počáteční zatížení (10 ± 0,1) N

F - hlavní zatížení (500 ± 5) N

SH - tvrdost povrchu vypočtená dle vztahu:



Obrázek 28 - Pevnost v tlaku [foto:autor]



Obrázek 27 - Höpplerův konzistomer [foto:autor]

7.4 Stanovení konzistence čerstvé malty s použitím střešacího stolku [ČSN EN 1015-3]

Hodnota rozlité se stanoví změřením průměru rozlitého zkušebního vzorku čerstvé malty po předepsaném počtu svislých pádů, při nichž se deska střešacího stolku zvedá a pak volně padá z dané výšky.

Použité zkratky a vztahy:

d_1, d_2 - průměry koláče na sebe kolmé z čerstvé malty změřené na střešacím stolku v mm.



Obrázek 29 - Střešací stolek [foto:autor]

8. Experimentální část

V experimentální části budou odzkoušeny receptury s pěnotvornými činidly na suché bázi, optimalizované receptury dále rozšířené užití hliníkového prášku a směs chlorového vápna s peroxidem vodíku pro výrobu plynobetonu. U hliníkového prášku bude stanovena optimální dávka hliníkového prášku vzhledem k fyzikálně-mechanickým vlastnostem a vylehčení. Směs chlorového vápna a peroxidu vodíku bude zkoušena experimentálně, kvůli absenci podrobnějších informací v literatuře. Všechny vzorky budou vyráběny podle normy jako zkušební trávce 40x40x160 mm a budou na nich odzkoušeny pevnosti v tlaku, pevnosti v ohybu, zpracovatelnosti, tvrdosti povrchu a následně bude stanovena objemová hmotnost po 28 dnech zrání.

8.1 Výběrový proces plniva

Z důvodů velké škály možností, byl do experimentálního procesu tvorby receptur vložen rozhodovací proces, který má za cíl vybrat nejvhodnější plnivo jako plnohodnotnou náhradu.

8.1.1 Výběr plniva z hlediska nákladů na pořízení plniva

Plnivo - produkt	Cena [Kč.m ⁻³]
Mikrosféry Omega-SPHERES W300	22000
Mikrosféry hollow cells Q-CEL-7014	7880
Vermikulit expandovaný	600-1260
Perlit expandovaný	2100
Liapor frakce 0-2mm	2050
Liapor frakce 0-4mm	2120
Liapor frakce 4-8mm	2110
Liapor frakce 8-16mm	2110
Refaglass	1810
Geocell	1420
Liaver frakce 0,25-0,5mm	4725
Liaver frakce 0,5-1mm	3265
Liaver frakce 1-2mm	3300
Liaver frakce 2-4mm	2545
Poraver	5120
Betonový recyklát	Velmi nízká podle druhu

Tabulka 1 - Náklady na pořízení surovin

*Zjištěné ceny jsou pouze orientační.

Z uvedených cen vyplývá, jako nejlepší volba z kategorie kameniv vyráběných jsou, expandovaný Perlit, Vermikulit, Liapor a z kameniv vyráběných z odpadních surovin jako nejlépe vhodná varianta vyplývá kamenivo Liaver.

8.1.2 Výběr nejvhodnějšího plniva z hlediska stanovených kritérií

Pro výběr nejvhodnějšího plniva bylo stanoveno bodové hodnocení v následné tabulce. Provedení tohoto kroku bylo důležité z hlediska regulace velké škály možností na minimum. Z předešlého výzkumu fakulty byla stanovena nejvhodnější plniva. Tato plniva byla posouzena dle zvolených kritérií jako náhrada běžného plniva do používaných receptur. Bodová stupnice byla stanovena v rozsahu od 1 do 10 bodů, kde číslo 1 je nejhorší a číslo 10 nejlepší možné hodnocení.

Kritérium	Bodové ohodnocení		
	Perlit	Liapor	Liaver
Cena	7	6	4
Dostupnost	5	5	6
Pevnost v tlaku	2	5	6
Objemová hmotnost	8	6	7
Trvanlivost	7	7	7
Variabilita výběru frakcí	3	6	8
Bodový součet	32	35	38

Tabulka 2 - Hodnocení výběru plniva

*Plniva byla ohodnocena na bodové stupnici od 1 do 10.

Po bodovém zhodnocení kritérií předem vybraných plniv bylo jako nejvhodnější plnivo určeno plnivo Liaver. Plnivo Liaver bude použito v navrhovaných recepturách jako celková či částečná náhrada běžně používaného kameniva. Od plniva Liaver jako náhrady je očekáváno snížení objemové hmotnosti směsí při přijatelném snížení pevnostních charakteristik. Hodnocena byla dostupnost, cena, objemová hmotnost, trvanlivost, pevnost v tlaku a možnost variace výběru frakcí.

8.2 Návrh a odzkoušení vhodných receptur pro pěnotvorné látky

V experimentální části bylo vytvořeno několik receptur za využití suchých pěnidel s Hostapur OSB a Tylovis EP 28. Jako aditivum byla použita přísada urychlující tvrdnutí X - SEED 100. Výsledné receptury byly dále modifikovány pro zlepšení požadovaných vlastností.

8.2.1 Návrh vhodných receptur pro lehčené hmoty na bázi pěnobetonu

Návrh receptur byl zpracován na základě předešlých zkušeností s pěnotvornými činidly a odpadními plnivy. Výsledné receptury jsou modifikovány v předem definovaných poměrech vzhledem k celkové záměsi. Pěnotvorná činidla byla odvozená hmotnostně na celkovou dávku suché směsi. Jako lehčené plnivo bylo vybráno kamenivo Liaver frakce 0 - 4 mm.

Receptura	REC A	REC B	REC C	REC D	REC E	REC F	REC G	REC H	REC I	REC J	REC K	REC L	REC M	REC N
CEM I 42,5 R	450	450	450	450	450	450	450	200	450	450	450	200	200	200
Kamenivo frakce 0-4mm	1350	1350	1350	1350	900	900	900		900	900	900			
Liaver 0-4mm					90	90	90	400	90	90	90	400	400	400
Voda	250	250	250	250	300	250	250	175	250	250	250	175	175	175
Pěnidlo Hostapur	0,72	0,72				0,54		0,3	0,54				0,3	
Pěnidlo Tylovis EP			0,72	0,72						0,54	0,54	0,3		0,3
Přísada X-SEED		9		9					9		9			6

Tabulka 3 - Návrh receptur pěnobetonů

8.2.2 Výsledné hodnoty mechanicko – fyzikálních zkoušek

Označení vzorku	Průměrná objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pevnost v tahu za ohybu [N.mm ⁻²]	Průměrná pevnost v tlaku [N.mm ⁻²]	Průměrná tvrdost povrchu [N.mm ⁻²]
A	1700	1,3	6,4	5,9
B	1460	0,4	1,6	6
C	1615	1,0	3,8	6,3
D	1720	1,1	6,5	7,9
E	1710	3,1	18,7	3,1
F	1535	1,8	12,3	7,7
G	1750	3,3	23,6	8,1
H	505	0,0	0,5	1,8
I	1475	2,6	14,7	7,9
J	1525	3,2	17,7	7,4
K	1640	3,5	21,2	4,8
L	490	0,6	2,2	2
M	525	0,7	2,3	0,4
N	450	0,3	0,5	1,7

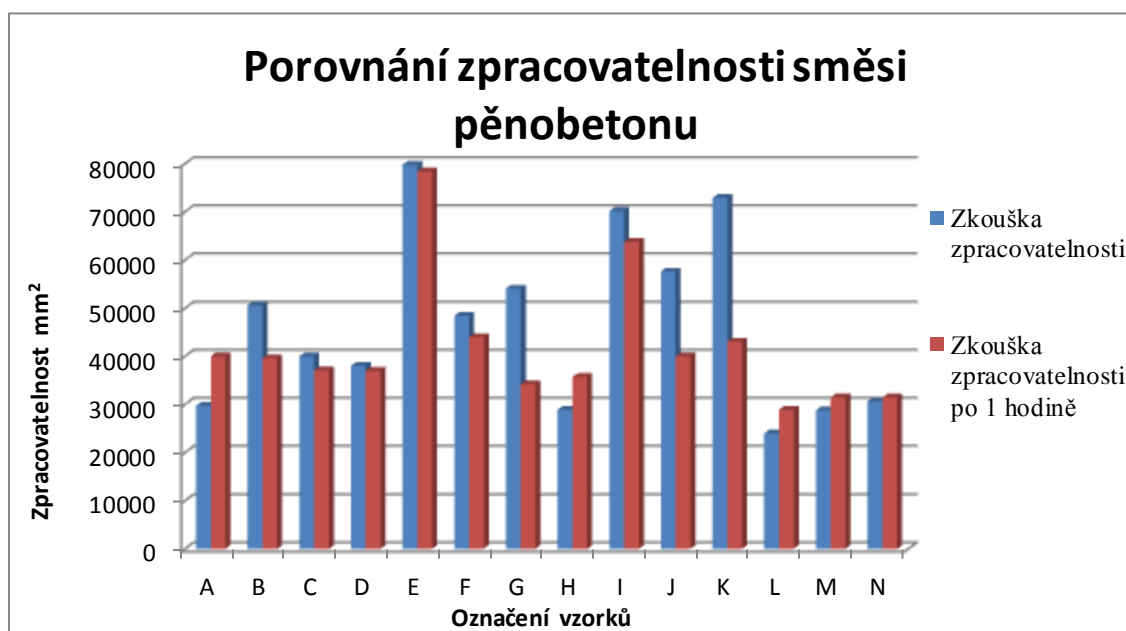
Tabulka 4 - Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek pěnobetonů po 28 dnech

8.2.3 Stanovení konzistence

Pomocí střešovacího stolku byla stanovena orientační zpracovatelnost daných záměsí pěnobetonů pro porovnání jejich konzistence.

Označení vzorku	Zkouška zpracovatelnosti [mm]	Zkouška zpracovatelnosti po 1 hodině [mm]	Zkouška zpracovatelnosti [mm ²]	Zkouška zpracovatelnosti po 1 hodině [mm ²]
A	170*175	200*200	29750	40000
B	230*220	180*220	50600	39600
C	200*200	190*195	40000	37050
D	190*200	185*200	38000	37000
E	280*285	280*280	79800	78400
F	220*220	220*200	48400	44000
G	230*235	180*190	54050	34200
H	170*170	170*210	28900	35700
I	270*260	250*255	70200	63750
J	240*240	200*200	57600	40000
K	270*270	210*205	72900	43050
L	150*160	170*170	24000	28900
M	160*180	175*180	28800	31500
N	170*180	170*185	30600	31450

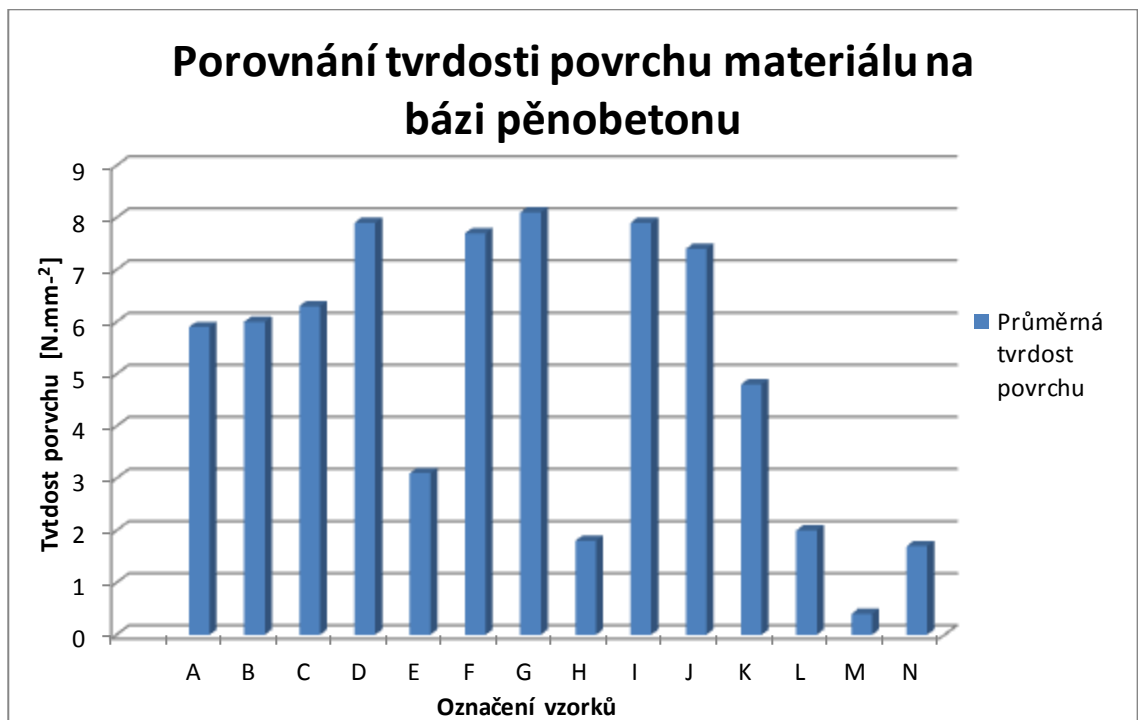
Tabulka 5 - Zpracovatelnost pěnobetonů



Graf 1 - Zpracovatelnost směsi pěnobetonů

Na grafickém vyhodnocení je viditelné chování použitých receptur v závislosti na čase. Nejvíce tekutou směsí byla receptura E, proto vyplývá jako nejméně vhodná receptura.

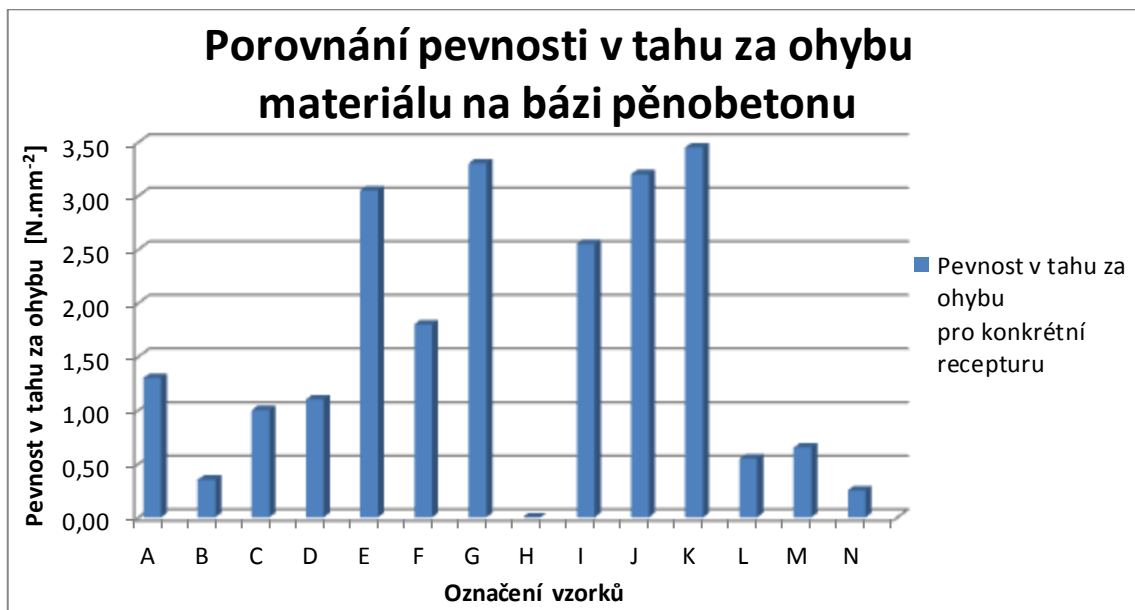
8.2.4 Tvrdość povrchu



Graf 2 - Tvrdość povrchu pěnobetonu

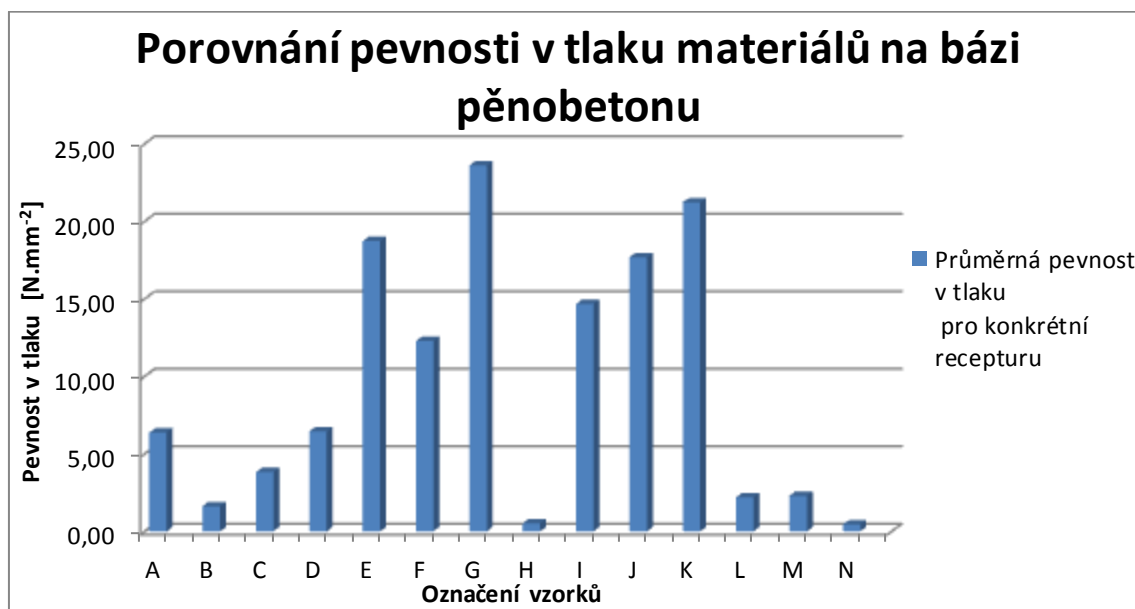
Z výsledných tvrdostí povrchů je patrné, že přídavek či nahrazení části kameniva frakce 0 - 4 mm kamenivem Liaver výrazně snižuje výsledné tvrdosti povrchu ve všech recepturách. Receptury s přídavkem pěnidla Hostapur OSB dosahují vyšších tvrdostí povrchu než receptury s přídavkem pěnidla Tylovis EP, ale rozdíly jsou zanedbatelné. Nejvyšších tvrdostí povrchu dosahují receptury I s hodnotou 7,9 N.mm⁻², D: 7,9 N.mm⁻², G: 8,1 N.mm⁻² a J: 7,4 N.mm⁻². Receptury s nejnižší tvrdostí povrchu jsou H s hodnotou 1,8 N.mm⁻² a M: 0,4 N.mm⁻².

8.2.5 Fyzikálně-mechanické vlastnosti



Graf 3 - Pevnost v tahu za ohybu pěnobetonů

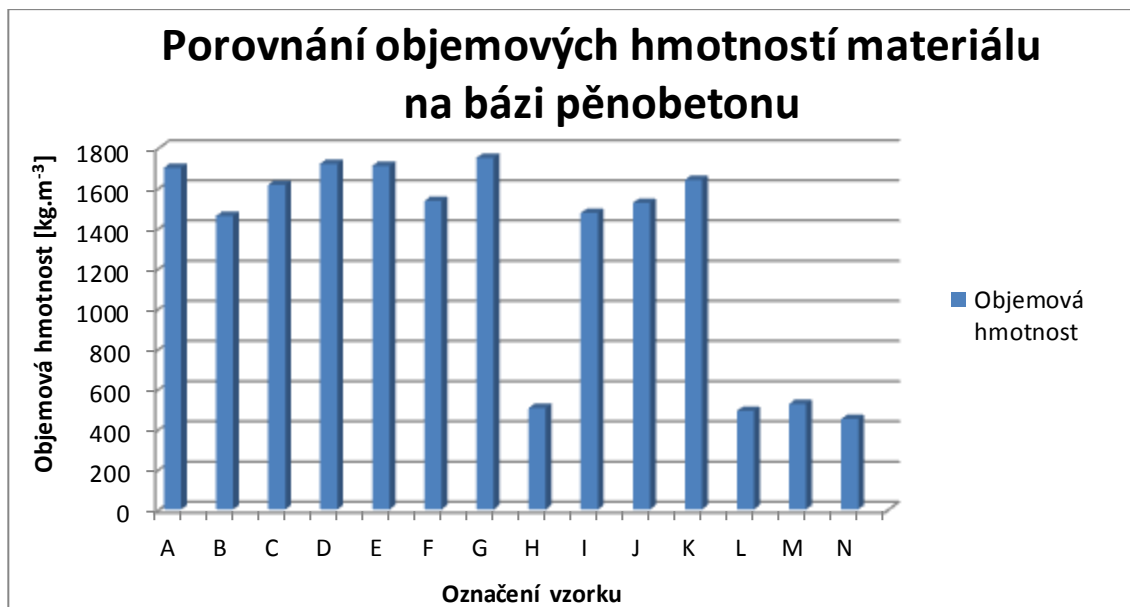
Z grafu pevností v tahu za ohybu vyplývá, že oproti recepturám E a G, u kterých není použito pěnidlo, dochází k poklesu pevností skoro u většiny receptur. U receptur obsahující zvýšené množství kameniva Liaver dochází k snížení pevností na velmi nízkou hodnotu. Nejvyšších hodnot s přidanou pěnотvornou přísadou dosahují receptury I, J, K a F.



Graf 4 - Pevnost v tlaku pěnobetonů

Z grafu pevností v tlaku je patrné, že oproti recepturám E a G, u kterých není použito pěnidlo, dochází k očekávanému poklesu pevností, ty ale klesají na přijatelnou hladinu. Nahrazení klasického kameniva 0 - 4 mm kamenivem Liaver, výrazně snižuje pevnost, proto

je náhrada většího množství klasického kameniva kamenivem Liaver nepříznivá pro konečné pevnosti. Nejvyšších hodnot s přídanou pěnotvornou přísadou dosahují receptury I, J, K a F, kdy průměrný pokles pevnosti klesá zhruba o jednu třetinu.



Graf 5 - Objemová hmotnost pěnobetonů

Přídavek či nahrazení klasického kameniva 0 - 4 mm kamenivem Liaver výrazně snižuje objemovou hmotnost, vyšší přídavek tohoto kameniva snížil objemovou hmotnost až pod hranici 600 kg.m⁻³. U ostatních receptur je patné snížení objemové hmotnosti se zvyšujícím se přídavkem pěnidel. Oproti referenčnímu vzorku G, E dochází k vylehčení receptur průměrně o 200 kg.m⁻³ u receptur B, F, I, J a K. U receptur H, L, M a N, s větším podílem náhrady běžného kameniva, objemová hmotnost klesá až o 1200 kg.m⁻³ oproti referenčnímu vzorku.

8.3 Hliníkový prášek

	Suroviny	Dávka
Receptura:	Cement I 42,5R	200 g
	Nehašené vápno	200 g
	Kamenivo frakce 0 – 4 mm	600 g
	Voda o pokojové teplotě	250 g
	Odmaštěný hliníkový prášek	X g

Tabulka 6 - Složení receptury hliníkového plynobetonu

Pro předem stanovenou recepturu byly odzkoušeny postupně, po stanovených hmotnostních nárůstech, zvyšující se dávky přidávaného hliníkového prášku. Z těchto receptur budou vyrobena laboratorní zkušební tělesa 40x40x160 mm a na nich budou odzkoušeny fyzikálně-mechanické vlastnosti dané modifikované receptury. Zvyšování dávek bude probíhat fixní hmotnostní, a to 0,1 g hliníkového prášku. Zjišťovanými vlastnostmi jsou tvrdost povrchu, objemová hmotnost, pevnost v tlaku a v tahu za ohybu. Stanovení zpracovatelnosti je u této technologie v našich laboratorních podmínkách nemožné, jelikož hliníkový prášek musí reagovat ve formě, kde dochází k nárůstům (kynutí) hmoty. Reakce je natolik spontánní, že je z důvodu poškození pórů vzduchu v struktuře matrice nemožné směr uskladnit jinde než ve formě. Hmotu nelze vícekrát ukládat, jelikož tím dochází k poškození vlivem manipulace. Hmotu se po nárůstu nechá zatvrdnout a přerost je následně oříznut dle stanovené formy.



Obrázek 30 - Čerstvá směs [foto:autor]



Obrázek 31 - Směs po nakynutí [foto:autor]

8.3.1 Výsledné hodnoty mechanicko – fyzikálních zkoušek

Dávka hliníkového prášku	Pevnost v tahu za ohybu [N.mm ⁻²]	Pevnost v tlaku [N.mm ⁻²]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Průměrná tvrdost povrchu [N.mm ⁻²]
0,1g	0,65	3,6	1480	3,5
0,2g	0,5	1,45	1185	1,4
0,3g	0,7	2,5	1465	2
0,4g	0,7	2	1290	3,3
0,5g	0,7	2,15	1385	3
0,6g	0,6	2,25	1395	2,4
0,7g	0,55	3	1420	5,2
0,8g	1,4	4,4	1560	5,5
0,9g	1,5	3	1540	2,6
1g	0,8	0,8	1140	0,8
1,1g	0,3	1,5	1340	1,4
1,2g	0,4	3,5	1550	3
ref. 0g	0,7	11	1900	6,6
Extrémní dávka 4g	0,6	1,75	1430	2,4

Tabulka 7 - Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek hliníkového prášku po 28 dnech

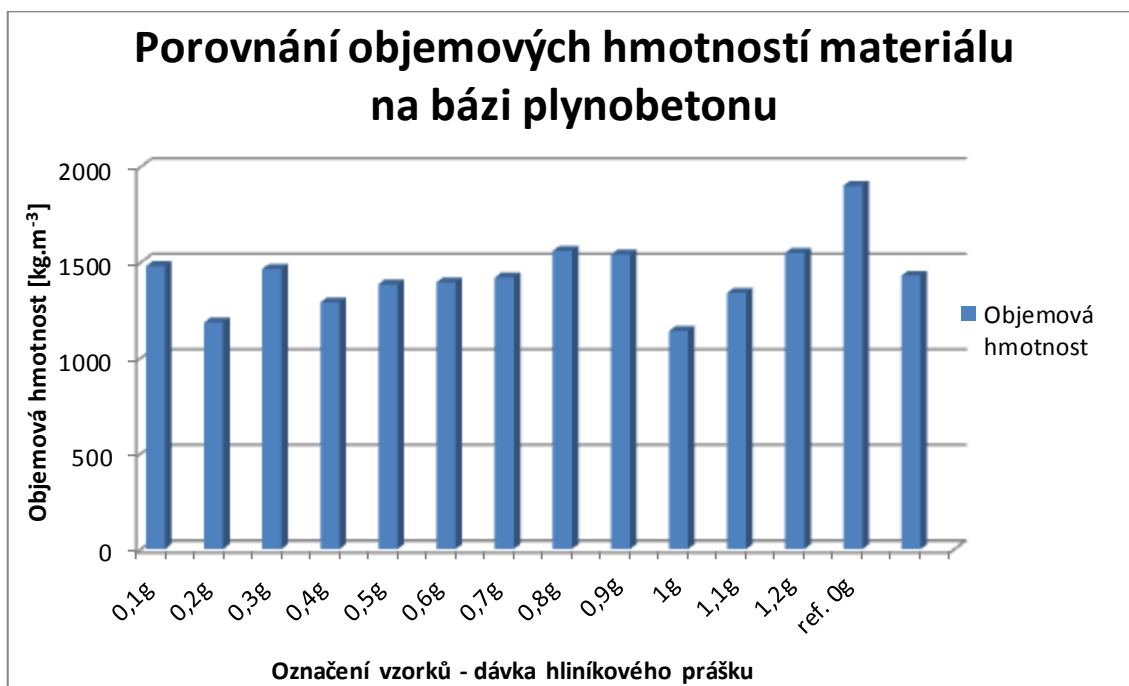
8.3.2 Tvrdość povrchu



Graf 6 - Tvrdość povrchu hliníkových plynobetonů

Z grafu výsledné tvrdosti povrchu je patrné, že přídavek hliníkového prášku snižuje celkovou tvrdost povrchu směsi. Záleží na způsobu probíhající reakce hliníkového prášku, proto se výsledná tvrdost povrchu nedá přesně určit bez předem zajištění stejných podmínek probíhající reakce. Tímto je například stejná teplota vstupních surovin, používaných forem a rovnoměrné rozmísení hliníkového prášku v celé záměsi. Je patrné, že tvrdost povrchu vzorků plynobetonů stoupá až do dosažení optimální dávky hliníkového prášku. Po dosažení této hranice tvrdost povrchu zase klesá. Neoptimálnější dávkou z grafického vyhodnocení vyplývá dávka 0,7 g, 0,8 g a 0,9 g hliníkového prášku pro zvolenou recepturu. Nejnižších výsledných hodnot dosahuje dávka 0,2 g, 0,3 g a 1 g hliníkového prášku pro zvolenou recepturu.

8.3.3 Fyzikálně-mechanické vlastnosti



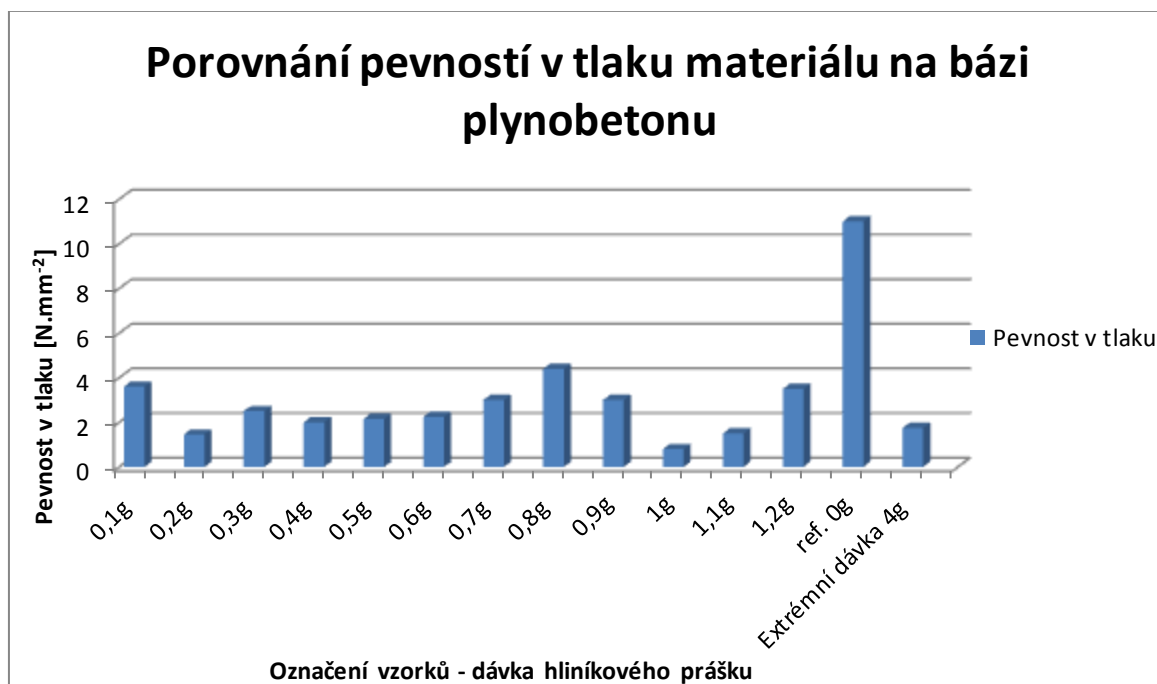
Graf 7 - Objemové hmotnosti hliníkových plynobetonů

Při fixním zvyšování dávek hliníkového prášku ve směsi dochází ke snížení objemové hmotnosti, ale výsledná objemová hmotnost je závislá na průběhu reakce naplynění směsi. Ale i při extrémní dávce, což je 4g hliníkového prášku na stanovenou recepturu, nedochází k výraznějšímu snížení objemové hmotnosti. Proto je nutné stanovit optimální dávku hliníkového prášku v směsi. Nejlepších výsledků objemových hmotností dosahují směsi s dávkou 1g a 1,1g hliníkového prášku. Ostatní testované vzorky dosahují s jistými odchylkami stejných objemových hmotností při rozdílných dávkách hliníkového prášku. Oproti referenčnímu vzorku klesá objemová hmotnost zhruba o 400 kg.m^{-3} .



Graf 8 - Pevnost v tahu za ohybu hliníkových plynobetonů

Z grafického vyhodnocení vyplývá, že dávka hliníkového prášku na směs 0,8 a 0,9 g dosahuje nejvyšších pevností v tahu za ohybu. Při nízkých hmotnostních přídavcích hliníkového prášku se snižuje výsledná pevnost. To samé platí i pro příliš velké dávky hliníkového prášku. Z grafu je také patrné, že pevnost v tahu za ohybu je vyšší než pevnost referenčního vzorku. V ostatních hmotnostních přídavcích jsou výsledné hodnoty v pevnosti v tahu za ohybu s minimálními odchylkami obdobné jako u referenčního vzorku.



Graf 9 - Pevnost v tlaku hliníkových plynobetonů

Z grafu je patrné, že nejlépe vychází dávka 0,8 a 0,9 g hliníkového prášku na směs. Při nízkých hmotnostních přídavcích hliníkového prášku se snižuje výsledná pevnost v tlaku. To samé platí i pro příliš velké dávky. Z grafu je patrné, že došlo k velkému pevnostnímu propadu oproti referenčnímu vzorku, a to až na hodnotu jeho jedné třetiny. Z výsledných hodnot grafického vyhodnocení vyplývá, že i minimální dávka hliníkového prášku způsobuje značný pokles pevnostních charakteristik. Proto je nutné použít pouze stanovenou optimální dávku pro recepturu.

8.4 Chlorové vápno a peroxid vodíku

Výše zmíněné suroviny jsou známy jako teoretická směs pro tvoření plynobetonu, ale v běžné praxi je nejčastěji využíván hliníkový prášek. Protože z dostupné literatury nejsou známy praktické údaje je nutné tuto směs prověřit experimentálními zkoušením. K navrženým recepturám bude přidáván stále se zvětšující hmotnostní podíl peroxidu vodíku a bude sledována jeho následná reakce. Chlorové vápno i peroxid vodíku byly zakoupeny na trhu přístupném jakémukoliv potencionálnímu zákazník. Chlorové vápno se nejčastěji využívá k dezinfekčním účelům a obsahuje minimálně 30 % chlóru. Chlorové vápno je rozeznatelné od ostatních druhů vápna svým typickým zápachem. Technický peroxid vodíku 30% je běžně využíván pro čištění a bělení. Obě tyto látky jsou ve vyšších koncentracích zdraví nebezpečné.



Obrázek 32 - 30% peroxid vodíku a chlorové vápno [foto:autor]

8.4.1 Návrh a zkoušení vhodných receptur pro lehčené hmoty na bázi plynobetonů

Protože praktická data nejsou z přístupné literatury známa, byl návrh receptur řešen experimentální tvorbou. Receptury obsahující chlorové vápno, cement, kamenivo a vodu byly vystaveny zvyšujícím se dávkám peroxidu vodíku obsaženého ve vodě, a to v pravidelných fixních přídavicích. Během experimentálního zkoušení receptury prošly částečnou úpravou podle chování čerstvé směsi. Prvotní a hlavní úpravou bylo zvýšení vodního součinitele za účelem zlepšení zpracovatelnosti směsi a zpomalení zatvrdnutí. Po smísení suché směsi obsahující chlorové vápno a vody obsahující určité procento peroxidu vodíku dochází k bouřlivé reakci, kdy větší část produkovaného plynu (vzdušného kyslíku) odchází pryč z mísené směsi. Jen malá část plynu se zachytí v matici čerstvého materiálu, ale okamžitě dochází k zlepšení zpracovatelnosti materiálu, jelikož směs se výrazně vylehčuje a stává se plastičtější.

Velkou nevýhodou je velká tvorba tepla a velmi rychlé zatvrdnutí směsi. Vhodnou budoucí úpravou pro možnou modifikaci se jeví přidání zpomalovačů tvrdnutí, které by nahradili nutné zvýšení vodního součinitele pro prvotní experimentální ověření materiálu. Toto opatření by mělo vést k celkovému zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností daných receptur.

Experimentální receptura						
		CEM 42,5 [g]	CHLOR. VÁPNO [g]	KAMENIVO 0-4 mm [g]	VODA [g]	PEROXID [g]
A	1	260	260	780	325	10
	2	260	260	780	400	10
	3	260	260	780	400	20
	4	260	260	780	400	30
	5	260	260	780	400	40
	6	260	260	780	400	50
	7	260	260	780	400	60
	8	260	260	780	400	70
	9	260	260	780	400	80
	10	260	260	780	400	90
	11	260	260	780	400	100

Tabulka 8 - Navrhnutá receptura A

Experimentální receptura							
		CEM 42,5 [g]	CHLOR. VÁPNO [g]	KAMENIVO 0-4 mm [g]	VODA [g]	PEROXID [g]	LIAVER 0-4 mm [g]
B	1	360	120	720	360	10	-
	2	360	120	720	360	25	-
	3	360	120	720	360	40	-
	4	360	120	720	360	55	-
	5	360	120	720	360	70	-
	6	360	120	720	360	85	-
	7	360	120	720	360	100	-
	8	360	120	720	360	150	-
	9	360	120	500	360	-	255
	10	360	120	720	360	-	-

Tabulka 9 - Navrhnutá receptura B, se zvýšeným obsahem cementu

Experimentální receptura						
		CEM 42,5 [g]	CHLOR. VÁPNO [g]	KAMENIVO 0-4 mm [g]	VODA [g]	PEROXID [g]
C	1	120	360	720	420	10
	2	120	360	720	420	25
	3	120	360	720	420	40
	4	120	360	720	420	55
	5	120	360	720	360	70
	6	120	360	720	360	85
	7	120	360	720	360	100
	8	120	360	720	480	70
	9	120	360	720	480	120

Tabulka 10 - Navrhnutá receptura C, se zvýšeným obsahem chlorového vápna

Experimentální receptura								
		CEM 42,5 [g]	CHLOR. VÁPNO [g]	KAMENIVO 0-4 mm [g]	VODA [g]	PEROXID [g]	LIAVER 0-2 mm [g]	LIAVER 2-4 mm [g]
D	1	260	260	400	400	45	260	120
	2	260	260	300	400	45	80	180
	3	260	260	300	400	45	100	100
	4	260	260	140	400	45	130	130
	5	260	260	400	400	35	50	100

Tabulka 11 - Navrhnutá receptura D

Experimentální receptura								
	CEM 42,5 [g]	CHLOR. VÁPNO [g]	KAMENIVO 0-4 mm [g]	VODA [g]	PEROXID [g]	LIAVER 0-2 mm [g]	LIAVER 2- 4mm [g]	
E	1	360	120	540	420	40	90	90
	2	360	120	540	420	40	180	-
	3	360	120	540	420	40	-	180
	4	360	120	360	420	40	260	100
	5	360	120	360	420	40	100	260
	6	360	120	648	420	40	72	-

Tabulka 12 - Navrhnutá receptura E, se zvýšeným obsahem cementu a částečnou náhradou kameniva

Experimentální receptura								
	CEM 42,5 [g]	CHLOR. VÁPNO [g]	KAMENIVO 0-4 mm [g]	VODA [g]	PEROXID [g]	LIAVER 0-2 mm [g]	LIAVER 2-4 mm [g]	
F	1	120	360	540	420	70	90	90
	2	120	360	540	420	70	180	-
	3	120	360	540	420	70	-	180
	4	120	360	360	420	70	260	100
	5	120	360	360	420	70	100	260
	6	120	360	648	420	70	72	-

Tabulka 13 - Navrhnutá receptura F, se zvýšeným obsahem chlorového vápna a částečnou náhradou kameniva

8.4.2 Objemová hmotnost čerstvé směsi

Pro určení orientačního chování vylehčujících pórů v čerstvé směsi chlorového vápna a peroxidu vodíku byla měřena objemová hmotnost čerstvé směsi. Jelikož v této směsi probíhá proces naplynění, bylo nutné měřit vzorky ve stejném časovém intervalu. Níže uvedené údaje jsou pouze jako orientační, a to kvůli nestabilnímu průběhu vylehčovacího procesu. Intenzita uvolňování vzdušného kyslíku reakcí peroxidu vodíku a chlorového vápna a následného zachytávání vzdušného kyslíku do matrice směsi se může s ohledem na čas a případně na další vnější činitele lišit.

	Vzorek č.	Receptura					
		A	B	C	D	E	F
Objemová hmotnost čerstvé směsi [kg.m ⁻³]	1	1380	1320	1440	960	980	1160
	2	1320	1500	1600	1020	1160	1160
	3	1380	1820	1360	1080	940	1200
	4	1900	1520	1740	980	940	980
	5	1560	1600	1660	1240	820	920
	6	1420	1720	1500		800	1400
	7	1600	1800	1640		1280	
	8	1660	1820	1400			
	9	1700	1180	1420			
	10	1600	1860	1700			
	11	1380					

Tabulka 14 - Objemová hmotnost receptur chlorových plynobetonů



Obrázek 33 - Čerstvá směs chlorového vápna a peroxidu vodíku [foto:autor]

8.4.3 Výsledné hodnoty mechanicko – fyzikálních zkoušek

Receptura	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pevnost v tlaku [N.mm ⁻²]	Pevnost v tahu za ohybu [N.mm ⁻²]	Tvrdość povrchu [N.mm ⁻²]
A _{ref}	1180	0,6	0,3	2,9
A1	1340	0,8	0,3	1,2
A2	1260	0,5	0,3	0,5
A3	1220	0,3	0,3	0,4
A4	1260	0,5	0,3	0,6
A5	1170	0,4	0,3	1,1
A6	1060	0,2	0,2	0,3
A7	1070	0,3	0,4	0,4
A8	910	0,3	0,3	0,3
A9	1020	0,4	0,3	0,6
A10	-	-	-	-
A11	940	0,2	0,3	0,5
B _{ref}	1050	1,6	0,7	1,2
B1	1210	1,3	0,7	1,3
B2	1140	1,4	0,8	1,9
B3	1230	1,9	0,9	1,5
B4	1300	2,1	1,1	1,7
B5	1280	2,3	1	1,8
B6	1350	2,4	1,1	2,9
B7	1380	2,5	1,2	2,6
B8	1430	3,1	1,4	3
B9	900	2,6	1	2,3
B10	1730	4,5	1,7	4,3
C _{ref}	1170	0,5	0,4	0,6
C1	1080	0,4	0,4	0,3

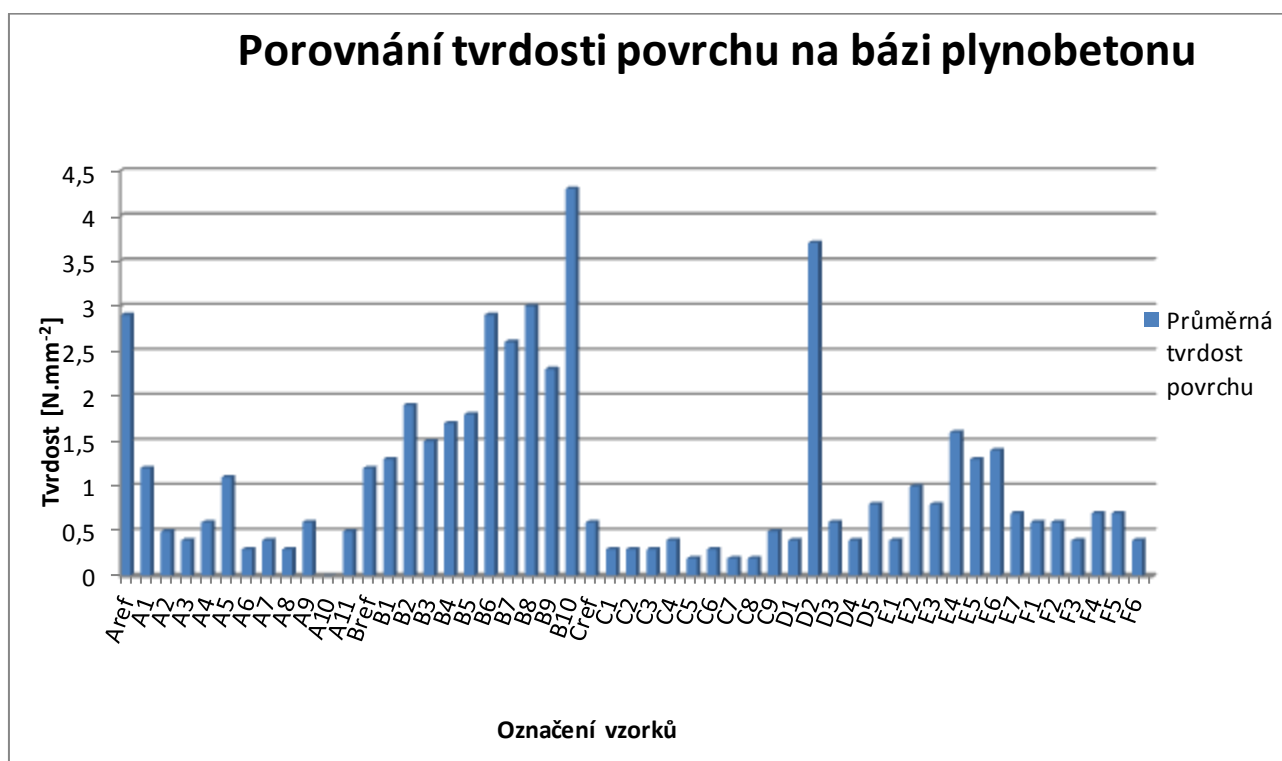
Tabulka 15 - 1/2 Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek chlorových plynobetonů

Receptura	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pevnost v tlaku [N.mm ⁻²]	Pevnost v tahu za ohybu [N.mm ⁻²]	Tvrdość povrchu [N.mm ⁻²]
C2	1120	0,2	0,2	0,3
C3	1130	0,3	0,3	0,3
C4	1040	0,3	0,3	0,4
C5	970	0,3	0,3	0,2
C6	920	0,3	0,3	0,3
C7	930	0,3	0,3	0,2
C8	810	0,2	0,3	0,2
C9	800	0,2	0,2	0,5
D1	670	0,2	0,2	0,4
D2	700	1,5	0,7	3,7
D3	720	0,4	0,4	0,6
D4	570	0,2	0,3	0,4
D5	860	0,7	0,4	0,8
E1	660	0,2	0,2	0,4
E2	750	0,9	0,6	1
E3	620	0,9	0,4	0,8
E4	680	2	0,8	1,6
E5	940	1,8	0,8	1,3
E6	670	1,8	0,8	1,4
E7	860	1	0,5	0,7
F1	800	0,4	0,3	0,6
F2	820	0,3	0,4	0,6
F3	820	0,3	0,3	0,4
F4	710	0,5	0,4	0,7
F5	680	0,7	0,5	0,7
F6	920	0,4	0,4	0,4

Tabulka 16 - 2/2 Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek chlorových plynobetonů

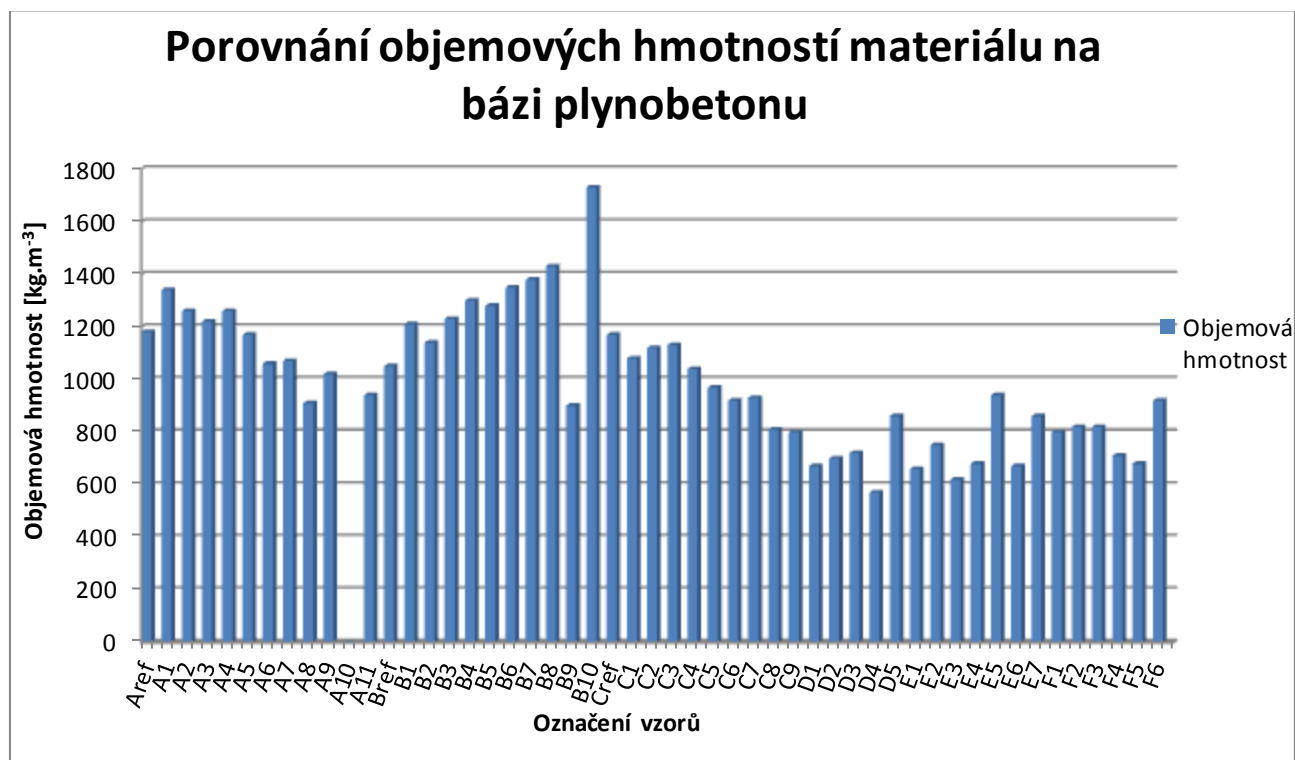
8.4.4 Tvrdość povrchu

Tvrdość povrchu vzorků, jak je z grafického vyhodnocení patrné, je převážně ovlivněna danou recepturou, přesněji množstvím obsaženého cementu. Je jasně viditelné, že vzorky obsahující větší množství cementu dosahují oproti ostatním ztelně vyšších tvrdostí povrchů. S ohledem na přidavek peroxidu vodíku se tvrdość povrchu vzorků zvětšuje do dosažení optimálního přídavku, následně tvrdość povrchu klesá. Toto chování je podobné jako u plynobetonů s dávkou hliníkového prášku. Receptury s vyšším obsahem chlorového vápna dosahují velmi malých tvrdostí povrchů s porovnáním s ostatními recepturami. Tento jev je způsoben nižším obsahem cementu k celkové směsi a také nedokonale proběhlou reakcí, která způsobila shluk vápenatých produktů a tudíž oslabení struktury zkoušených vzorků. Receptury obsahující částečnou náhradu kameniva Liaver dosahují velmi malých tvrdostí povrchu oproti recepturám, které jsou bez náhrady.



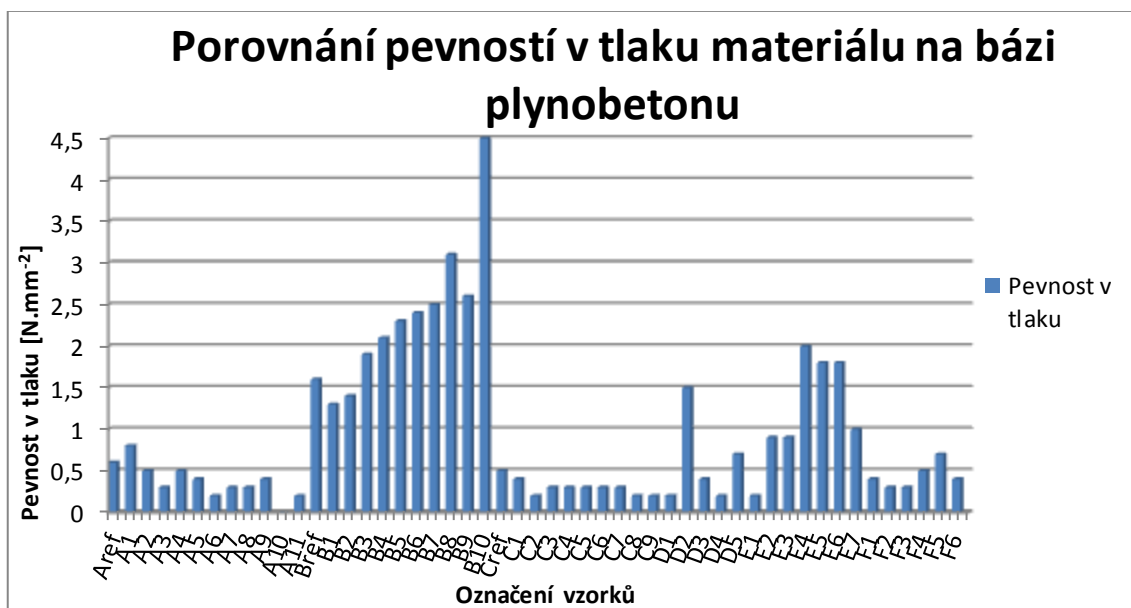
Graf 10 - Tvrdość povrchu chlorových plynobetonů

8.4.5 Fyzikálně-mechanické vlastnosti



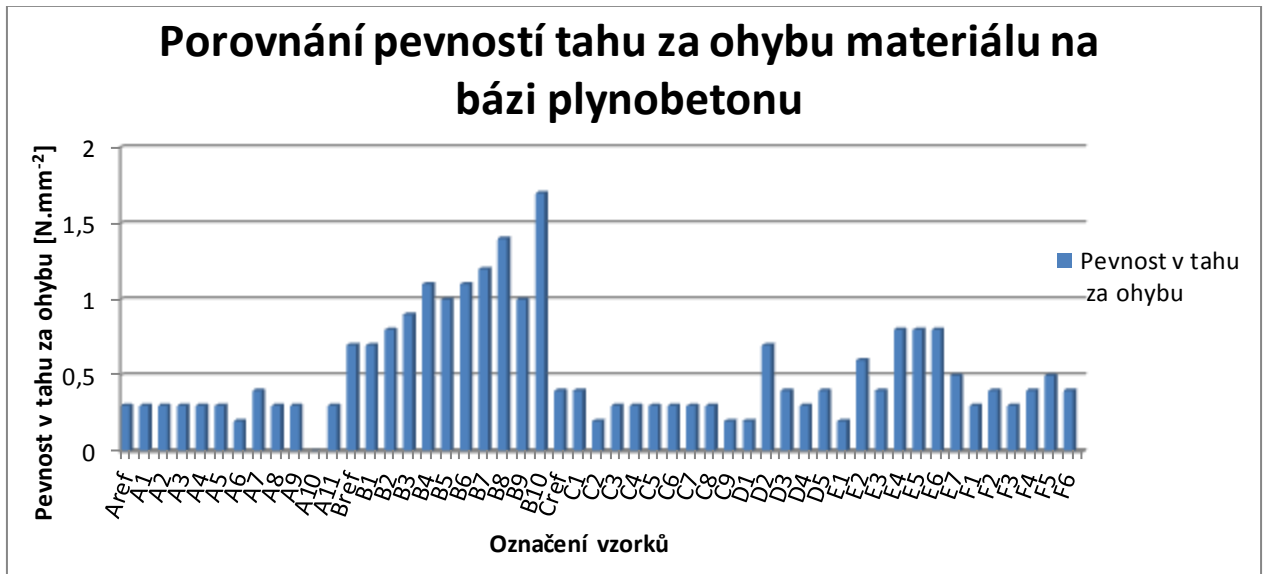
Graf 11 - Objemová hmotnost chlorových plynobetonů

Z grafického vyhodnocení je patrné, že zvyšující se dávka peroxidu vodíku přispívá k úměrnému zmenšení objemové hmotnosti testované směsi. U receptury B, se zvýšeným obsahem cementu, dochází k pravému opaku. Tento jev je možné vysvětlit malou dávkou chlorového vápna v poměru k celkové směsi, nižší mírou nakypřující reakce oproti ostatním recepturám a působení peroxidu vodíku na složky cementu.



Graf 12 - Pevnost v tlaku chlorových plynobetonů

Výsledné pevnosti v tlaku nedosahují příliš vysokých hodnot, tyto hodnoty jsou úměrné množství cementu a chlorového vápna ve směsi obsažených. Se zvyšujícím se množstvím chlorového vápna klesá celková pevnost v tlaku. To samé platí pro zvyšující se přídavek peroxidu vodíku, který snižuje výsledné pevnosti v tlaku. U receptur B, se zvýšenou dávkou cementu, se hodnoty pevnosti zvyšují s přídavkem peroxidu vodíku. Tento jev je možné vysvětlit reakcí se složkami chlorového vápna nebo cementu za vzniku nových anorganických produktů, zároveň i nižší koncentrací chlorového vápna obsaženého v receptuře. Receptura C, se zvýšenou dávkou chlorového vápna, vlivem nedokonalého proběhnutí reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku ve výsledném vzorku způsobuje shluky vápenatých produktů, které způsobují celkové oslabení struktury materiálu. Receptury s částečnou náhradou běžného kameniva za kamenivo Liaver dosahují hodnot v závislosti na množství a frakci kameniva nahrazeného. Receptury se stejnou dávkou chlorového vápna a cementu dosahují také velmi nízkých hodnot. Je nutné podotknout, že výsledné pevnosti negativně ovlivňoval zvýšený vodní součinitel, který zpomalil průběh tuhnutí směsi. Vhodnou volbou pro možné další zkoumání se jeví možnost využití zpomalovačů tuhnutí, které umožní snížení vodního součinitele a zlepší celkovou zpracovatelnost směsi.



Graf 13 - Pevnost v tahu za ohybu chlorových plynobetonů

Pevnost v tahu za ohybu je až na výjimku, recepturu B se zvýšenou dávkou cementu, na analogické úrovni s ostatními recepturami, a to bez větších odchylek pro všechny odzkoušené vzorky. Výjimkou jsou pouze receptury s částečnou náhradou běžného kameniva za kamenivo Liaver, které v testovaném vzorku zvyšuje pevnosti v tahu za ohybu. U vzorků se zvýšenou dávkou chlorového vápna byla struktura negativně ovlivněna vytvořenými shluky vápenatých produktů způsobeným nedokonalým průběhem reakce chlorového vápna s peroxidem vodíku. Tento jev ovlivnil všechny průběhy fyzikálně-mechanických zkoušek prováděných na této receptuře.



Obrázek 34 - Shluky vápenatých produktů [foto:autor]

Vzorky plynobetonu na bázi reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku byly vyrobeny experimentální postupem. Výslednou kvalitu materiálu ve většině případů ovlivnil zvýšený vývin tepla, které je vedlejším produktem při této reakci. Proto bylo nutné zvýšit hodnotu vodního součinitele pro zlepšení zpracovatelnosti směsi. V některých případech nebylo možné do jedné minuty s danou směsí pracovat, pokud nebyl zvýšen vodní součinitel. Jinak docházelo k zatuhnutí čerstvé směsi. Pro zlepšení budoucích výsledných charakteristik je vhodnou optimální volbou přídavek zpomalovačů tuhnutí do vybraných receptur. Další podmínkou je dodržení maximálního poměru chlorového vápna k celkové směsi schopné s danými surovinami reagovat, a tím zabránit tvorbě nezreagovaných částic negativně ovlivňujících strukturu výsledného materiálu.

8.5 Ověření dlouhodobé stability suchých směsí a určení jejich vhodnosti ke skladování

V této kapitole byly prověřeny vlastnosti suchých směsí po odležení v pytlí simulujícím běžné podmínky, kterým jsou materiály po výrobě a přepravě do míst určení vystaveny. Materiály na bázi pěnobetonů a plynobetonů byly uloženy v igelitových pytlích, které zabraňují přístupu vlhkosti k danému materiálu. Pro dlouhodobé ověření byl stanoven časový horizont odležení tři měsíce. Po skončení tohoto časového úseku byly z odleželých vzorků v laboratorním prostředí namíchány zkušební vzorky, na kterých byly ověřeny fyzikálně-mechanické vlastnosti.

8.5.1 Výsledné hodnoty laboratorních zkoušek

Receptura	Tvrdość povrchu po 3 měsících [N.mm⁻²]	Objemová hmotnost po 3 měsících [kg.m⁻³]	R_{tlak} po 3 měsících [N.mm⁻²]	R_{ohyb} po 3 měsících [N.mm⁻²]
J	4,2	1635	14,8	4,2
F	4,5	1505	9,4	3,4
K	4,4	1830	12,2	3,7
I	5,4	1315	7,6	2,9
0g Al	4,9	1575	10,3	3,0
1g Al	1,7	1515	1,9	0,9
4g Al	1,3	1415	0,8	0,6

Tabulka 17 - Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek po dlouhodobém odležení

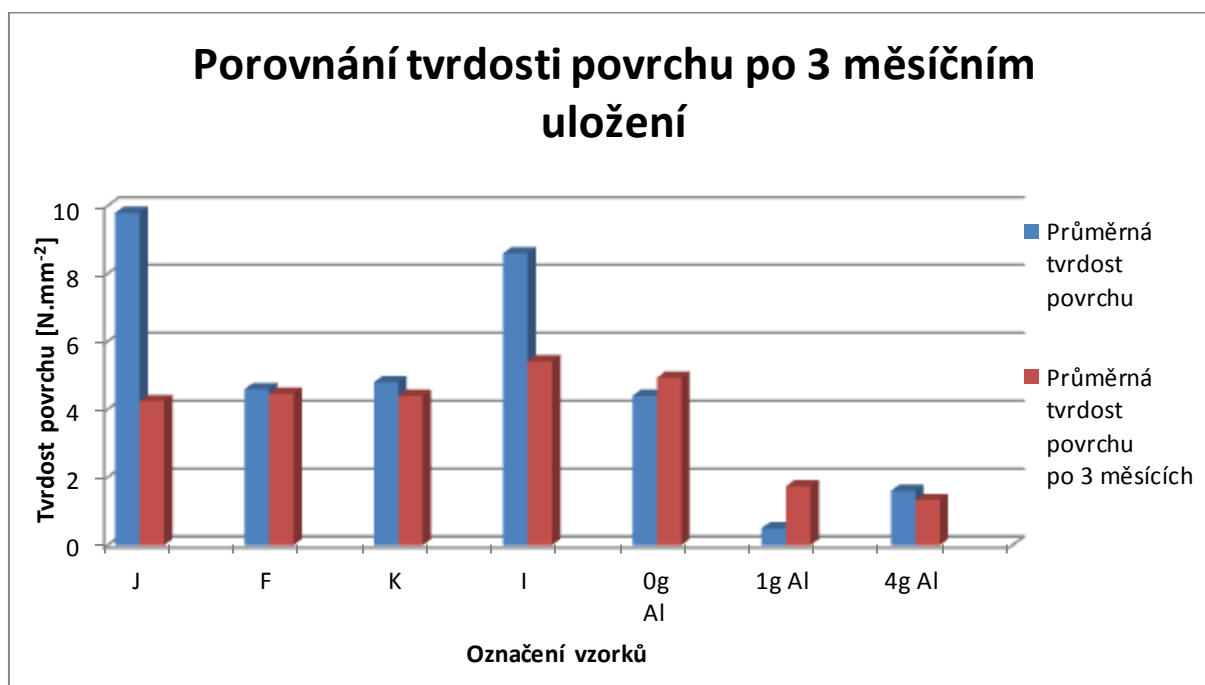
U materiálů na bázi pěnobetonů, které jsou vylehčeny přidáním suchých pěnotvorných činidel, jsou všechny složky vůči sobě, bez přidání vody, inertní. Proto dlouhodobým uložením nedochází k degradaci materiálů, naopak manipulací a následnou přepravou dochází k domísení směsi.

U materiálů na bázi plynobetonů, fungujících na principu hliníkového prášku, bylo nutné nejdříve hliníkový prášek odmastit, před přidáním do uložené směsi vhodným odmašťovadlem. Protože hliníkového prášku je v poměru k celkovému objemu směsi velmi

málo i minimální degradace jeho vlastností může nepříznivě ovlivnit výsledné hodnoty pevnostních charakteristik. Proto je nutné jeho rovnoměrné rozptýlení v dané záměsi a zabránění jeho možné segregaci.

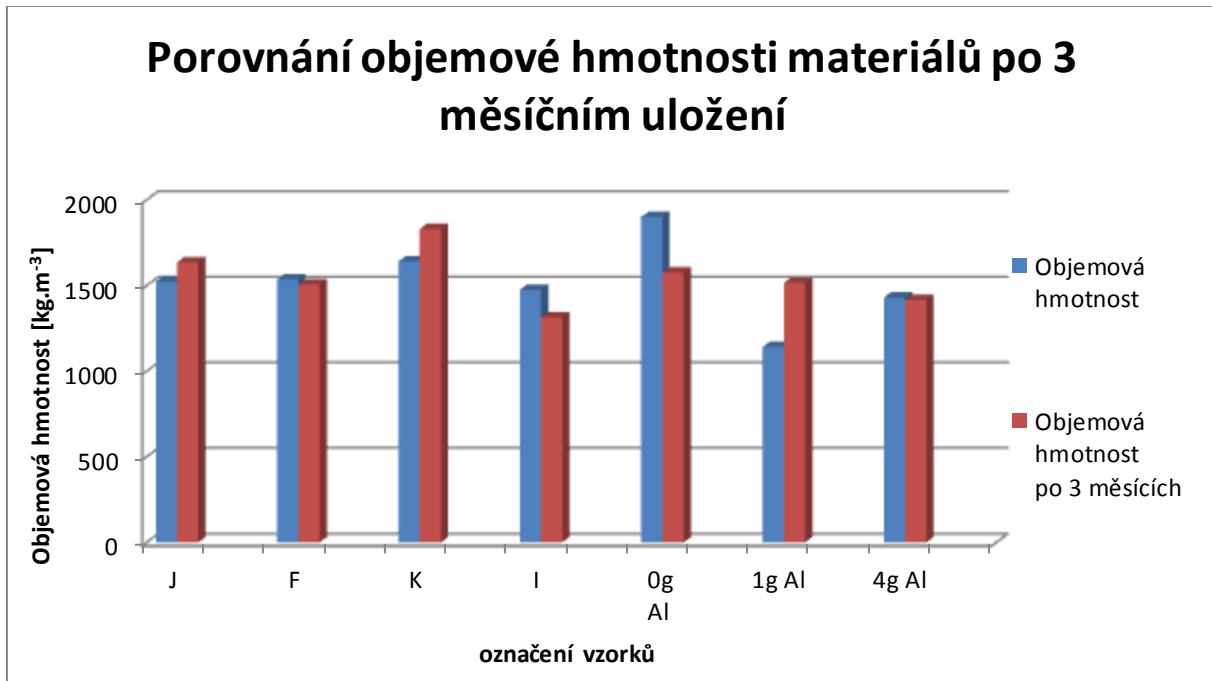
U materiálů na bázi plynobetonů, fungujících na principu reakce chlorového vápna s peroxidem vodíku, bylo stanoveno na základě velmi nízkých manipulačních pevností po odformování namíchaných čerstvých směsí, že nejsou vhodné pro dlouhodobé skladování. Pro jejich možnost skladování by byly nutné modifikace.

8.5.2 Porovnání fyzikálně-mechanických vlastností po 3 měsíčním odležení



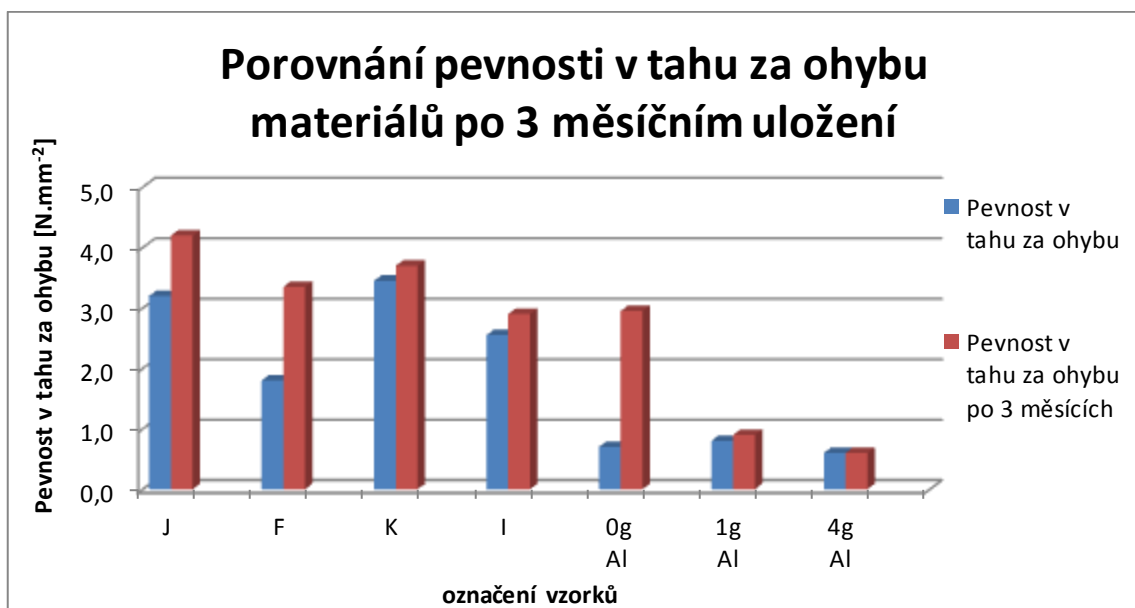
Graf 14 - Porovnání tvrdosti povrchu po 28 dnech a po dlouhodobém odležení

Z grafického vyhodnocení je patrné, že u receptur pěnobetonů I, J po tříměsíčním odležení došlo k poklesu tvrdosti povrchu oproti jejich standardu. Dvojice receptur pěnobetonů J, F a K, I, až na změnu druhu pěnotvorné přísady, jsou ve složení analogické, ale k poklesu dochází pouze u vzorků receptury J a I. U receptur s využitím hliníkového prášku, je tvrdost povrchu v rozmezí předem předpokládané odchylky, kde pouze u vzorku s 1g dávkou hliníkového prášku dochází k razantnímu zvýšení. Z velmi nízkých hodnot vzorku dávky 1g hliníkového prášku se lze domnívat, že nedošlo k ideálnímu proběhnutí reakce a tudíž možnému degradování vytvořeného vzorku.



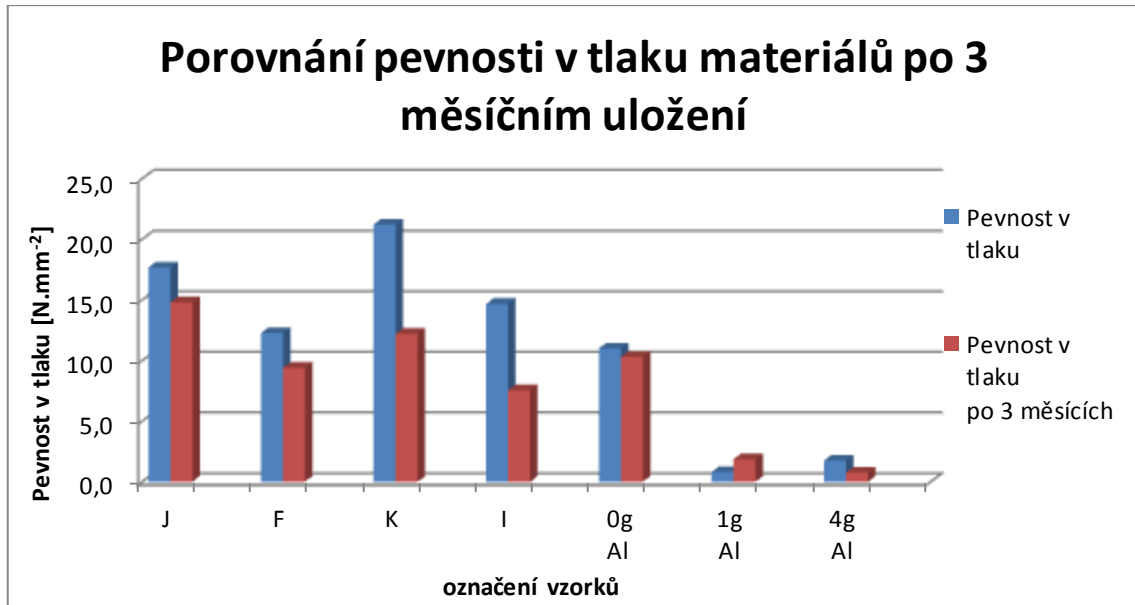
Graf 15 - Porovnání objemové hmotnosti po 28 dnech a po dlouhodobém odležení

Z výsledných hodnot objemových hmotností je patrné, že u receptur pěnobetonů J a K dochází k mírnému zvýšení objemových hmotností oproti porovnávanému vzorku. U zbylých receptur pěnobetonů F a I naopak dochází k mírnému poklesu jejich objemových hmotností. Zvýšená dávka hliníkového prášku dlouhodobě nijak neovlivňuje objemovou hmotnost, naopak u dávky 1g hliníkového prášku dochází k nechtěnému nárůstu objemových hmotností po dlouhodobém uložení.



Graf 16 - Porovnání pevnosti za ohybu po 28 dnech a po dlouhodobém odležení

U všech dlouhodobě odležených vzorků je dobře patrný vzestup pevnosti v tahu za ohybu průměrně o jednu třetinu jejich hodnoty. Receptura pěnobetonu J dosahuje hodnot nad 4 N.mm^{-2} , F a K hodnot nad 3 N.mm^{-2} . Hodnoty receptury I jsou těsně pod hranicí 3 N.mm^{-2} .



Graf 17 - Porovnání pevnosti v tlaku po 28 dnech a po dlouhodobém odležení

Z grafického vyhodnocení je patrné, že dochází k poklesu výsledných pevností v tlaku u směsí po dlouhodobém odležení u všech vzorků. Tento jev je možné vysvětlit částečnou napěňovací, naplynovací reakcí nebo degradací směsí a materiálů jich obsažených za přítomnosti vzdušné vlhkosti při jejich tvorbě a následném uložení. Zkoušené receptury pěnobetonů J, F, K, I poklesly o jednu třetinu oproti jejich referenčnímu standardu. I přes tento pokles lze stanovit výsledné hodnoty obстоjnými v rámci základních kritérií průmyslových podlah.

9. Ekonomické zhodnocení a optimalizace receptur

V předchozích kapitolách bylo vybráno a zhodnoceno nejvhodnější plnivo. V této kapitole byly ekonomicky zhodnoceny vybrané receptury jako celek, byly přepočítány na 1 tunu a následně byl proveden optimalizační výpočet na základě zvolených kritérií. K celkové kalkulaci byly využity průměrné náklady zjištěné od dodavatelů surovin.

9.1.1 Ekonomické zhodnocení receptur

Surovina	Náklady [Kč.t ⁻¹]
Cement	3194
Písek	115
Kamenivo Liaver	10170
Hliníkový prášek	300000
Nehašené vápno	3280
Chlorové vápno	3520
Peroxid vodíku	8600
Aditiva	40000

Tabulka 18 - Ekonomické zhodnocení surovin

Ceny pěnidel Hostapur OSB a Tylovis EP 28 jsou na minimální rozdíl prakticky stejně vysoké a proto u receptur pěnidel nedochází k upřednostňování jednoho druhu na základě daného ekonomického zhodnocení. Náklady na pořízení kameniva Liaver byly stanoveny na základě použitých frakcí a jejich průměrných nákladů.

Surovina	REC F	REC I	REC J	REC K	REC G _{REF}	Al 0,8g	Al 0,9g	Al 0g _{REF}	B7	B8
Cement	1,437	1,437	1,437	1,437	1,437	0,639	0,639	0,639	1,149	1,149
Písek	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104	0,069	0,069	0,069	0,083	0,083
Kamenivo Liaver	0,915	0,915	0,915	0,915	0,915	0	0	0	0	0
Nehašené vápno	0	0	0	0	0	0,656	0,656	0,656	0	0
Chlorové vápno	0	0	0	0	0	0	0	0	0,423	0,423
Peroxid vodíku	0	0	0	0	0	0	0	0	0,86	1,29
Aditiva	0,022	0,382	0,022	0,382	0	0	0	0	0	0
Hliníkový prášek	0	0	0	0	0	0,24	0,27	0	0	0
Cena celkem [Kč]	2,478	2,838	2,478	2,838	2,456	1,604	1,634	1,364	2,515	2,945
Převod na cenu za tunu [Kč.t ⁻¹]	1466	1670	1466	1670	1453	1282	1306	1091	1509	1767

Tabulka 19 - Výpočet a celkové náklady za tunu receptury

Z provedeného výpočtu je zřejmé, že u vybraných receptur pěnobetonů jako nejlevnější varianta vyplývá receptura F a J, které se pro srovnání od referenční receptury G liší v rozmezí 20 korun za tunu vyrobené směsi. U výsledných hodnot receptur plynobetonu na bázi hliníkového prášku je patrná nižší cena i při optimální dávce hliníkového prášku než u zvolených receptur pěnobetonů. Receptury plynobetonů založené na bázi reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku jsou variantou dražší než u plynobetonů na bázi hliníkového prášku. U této technologie výroby plynobetonu výsledné náklady ovlivňuje převážně dávka peroxidu vodíku.

9.1.2 Optimalizace receptur

Pro proces optimalizace bylo zvoleno 5 receptur z odzkoušených receptur pěnobetonů a 5 receptur z plynobetonů, z toho 3 receptury z plynobetonů na bázi hliníkového prášku a 2 receptury z plynobetonů vytvořených reakcí chlorového vápna a peroxidu vodíku.

Číslo	Kritérium	Jednotka
1	Pevnost v tlaku	N.mm ⁻²
2	Pevnost v tahu za ohybu	N.mm ⁻²
3	Tvrdość povrchu	N.mm ⁻²
4	Objemová hmotnost	Kg.m ⁻³
5	Náklady na pořízení surovin	Kč. t ⁻¹
6	Jednoduchost přípravy materiálu	1-3 bodů

Tabulka 20 - Zvolená kritéria

Kritérium jednoduchosti přípravy je hodnoceno na stupnici od 1 do 3, kde 1 bod je nejjednodušší a 3 body je nejsložitější.

Číslo	optimum	REC F	REC I	REC J	REC K	REC G	Al 0,8g	Al 0,9g	Al 0g	B7	B8
1	max	12,3	14,7	17,7	21,2	23,6	4,4	3	11	2,5	3,1
2	max	1,8	2,6	3,2	3,5	3,3	1,4	1,5	0,7	1,2	1,4
3	max	7,7	7,9	7,4	4,8	8,1	5,5	2,6	6,6	2,6	3
4	min	1535	1475	1525	1640	1750	1560	1540	1900	1380	1430
5	min	1466	1670	1466	1670	1453	1282	1306	1091	1509	1767
6	min	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3

Tabulka 21 - Hodnoty daných receptur a požadované optimum

	1	2	3	4	5	6	S_{ij}	R_{ij}	f_i
1	1	1/3	1/5	2	1/3	1/8	0,0056	0,42084	0,04497
2	3	1	1/3	3	1/3	1/6	0,1667	0,74184	0,07927
3	5	3	1	5	4	1/4	75,0000	2,05357	0,21944
4	1/2	1/3	1/5	1	1/4	1/8	0,0010	0,31839	0,03402
5	3	3	1/4	4	1	1/8	1,1250	1,01982	0,10898
6	8	6	4	8	8	1	12288	4,80375	0,51332
Celkem:							9,35821	1,00000	

Tabulka 22 - Saatyho matice

Kritérium	REC F	REC I	REC J	REC K	REC G	Al 0,8g	Al 0,9g	Al 0g	B7	B8
1	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
2	0,03	0,05	0,07	0,08	0,07	0,02	0,02	0,00	0,01	0,02
3	0,20	0,21	0,19	0,09	0,22	0,12	0,00	0,16	0,00	0,02
4	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,00	0,03	0,03
5	0,05	0,02	0,05	0,02	0,05	0,08	0,07	0,11	0,04	0,00
6	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,26	0,26	0,26	0,00	0,00
Celkem:	84,13	84,80	88,11	75,29	91,17	49,66	37,82	54,33	8,98	6,78

Tabulka 23 - Výsledné hodnoty optimalizačního výpočtu

Z optimalizačního výpočtu vyplývá, že nejvhodnější variantou jsou receptury pěnobetonů G, I, J. Receptura G je recepturou referenční pro pěnobeton. V optimalizačním procesu byla umístěna z důvodu srovnání výsledných hodnot s ostatními recepturami pěnobetonů. Proto z výsledků optimalizace vyplývá receptura I a receptura J jako nejlépe hodnocená receptura pěnobetonů. Tyto receptury jsou si v celkovém porovnání fyzikálně-mechanických hodnot velmi podobné, liší se jen nepatrnými rozdíly i přesto, že v receptuře I je obsaženo pěnidlo Hostapur OSB a v receptuře J je pěnidlo Tylovis EP.

Nejhůře hodnocené receptury jsou receptury B7 a B8, což jsou receptury plynobetonů na bázi reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku. Hlavními kritérii snižujícími hodnocení těchto receptur jsou cena a pevnost v tlaku. Pevnost v tlaku byla negativně ovlivněna nutným zvýšením vodního součinitele, který účelně zpomaloval rychlé tuhnutí dané směsi a zlepšoval její zpracovatelnost.

10. Shrnutí a diskuze výsledků

10.1 Etapa I. - teoretické možnosti vylehčení hmot pro podlahové konstrukce

První etapa byla zaměřená na provedení analýzy na trhu průmyslových podlahových konstrukcí, rozřídění dle druhu podlahových konstrukcí, teoretické zjištění jejich možností vylehčení na materiálové bázi a jejich následné rozdělení podle funkčních složek vytvářejících napěňující či naplynující reakci pro dané směsi bez přidání tekutých aditiv. V této etapě byly podrobně teoreticky prozkoumány možnosti přímého vylehčení před jejich praktickou aplikací v dalších etapách.

Dále byla provedena analýza možnosti náhrady či částečné náhrady vhodným plnivem, stanoven vhodný seznam těchto plniv, která by měla mít za následek zlepšení vybraných vlastností a v celkové míře dosažení užitého vylehčení celé receptury. Vybraná plniva byla rozdělena do tří kategorií podle jejich druhu.

10.2 Etapa II. - experimentální tvorba vylehčených hmot plynobetonů a pěnobetonů

Etapa II se v prvním svém kroku zabývala tvorbou vhodných receptur pro tvorbu pěnobetonů. Jako vhodná metoda byla vybrána metoda práškových přísad způsobujících napěnění vytvořených směsí. Jako vhodné přísady byly vybrány napěňující přísady Hostapur OSB a Tylovis EP 28. Na tomto výběru byl vytvořen a později modifikován výčet receptur. Z těchto receptur byla vytvořena škála vzorků, na kterých byly v dalších etapách diplomové práce odzkoušeny fyzikálně-mechanické vlastnosti, vliv a působení množství napěňující přísady a částečné náhrady kameniva v daných recepturách. Z vytvořeného výčtu vhodných plniv bylo vybráno nejvhodnější plnivo Liaver pro aplikaci do navržených receptur pro experimentální tvorbu a odzkoušení daných materiálů. Toto kamenivo bylo vybráno a zhodnoceno pomocí předem stanovených kritérií.

Dále byl vybrán vývoj plynobetonu na bázi reakce hliníkového prášku a nehašeného vápna, kdy z dané reakce se uvolňuje vzdušný vodík do matrice vytvářeného materiálu. Pro návrh vhodné receptury plynobetonu bylo nutné modifikovat zvolenou recepturu vycházející

z předchozích výzkumů fakulty a stanovit optimální dávku hliníkového prášku. Proto jsou zvolené receptury navrženy s přidáním fixního hmotnostního přírůstku hliníkového prášku.

Jako třetí způsob byla zvolena reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku, kde plynem unikajícím do matrice materiálu je vzdušný kyslík. Tento způsob je znám především z teoretické stránky, nikoliv z běžného používání. Proto pro návrh vhodné receptury byl zvolen experimentální způsob tvorby. V návrhu byly zvoleny základní receptury, které byly v dalších částech modifikovány kamenivem Liaver. K těmto recepturám byl přidáván narůstající přírůstek peroxidu vodíku pro zvýšení účinnosti nakypřující reakce do maximální hodnoty, která již negativně neovlivňuje fyzikálně-mechanické vlastnosti.

Z těchto tří druhů technologických postupů byly vytvořeny zkušební vzorky 40x40x160 mm a připraveny vzorky pro ověření dlouhodobé stability vlastností při dlouhodobém uložení. Jako optimální zkušební doba pro dlouhodobé uložení byl zvolen časový horizont tři měsíců. Vzorky byly uloženy v igelitových sáčkách pro zabránění přístupu vzdušné vlhkosti pro simulaci pytlového uložení běžného pro obchodní distribuci. Na těchto vzorcích byly v dalších etapách ověřeny fyzikálně-mechanické charakteristiky daných materiálů po 28 dnech.

10.3 Etapa III. - laboratorní odzkoušení vzorků vytvořených hmot

V této etapě byly odzkoušeny všechny vytvořené laboratorní vzorky 40x40x160 mm po 28 dnech zrání. Na laboratorních zkušebních vzorcích byla zjištěna tvrdost povrchu, objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku.

Jako nejlépe hodnocené receptury pěnobetonů byly po grafickém vyhodnocení zvoleny receptury F, I, J a K. Výsledné fyzikálně-mechanické hodnoty receptur:

Receptura	Průměrná objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pevnost v tahu za ohybu [N.mm ⁻²]	Průměrná pevnost v tlaku [N.mm ⁻²]	Průměrná tvrdost povrchu [N.mm ⁻²]
F	1535	1,8	12,3	7,7
I	1475	2,6	14,7	7,9
J	1525	3,2	17,7	7,4
K	1640	3,5	21,2	4,8
G _{ref}	1750	3,3	23,6	8,1

Tabulka 24 - Výběr nejlépe hodnocených receptur

V porovnání s recepturou G, která je referenční a je proto porovnávacím standardem pro ostatní receptury, dochází k cílenému poklesu objemových hmotností za snížení ostatních fyzikálně-mechanických vlastností. Tyto receptury splňují základní požadavky na pevnost průmyslových podlah. Ostatní laboratorně odzkoušené receptury byly ovlivněny částečnou náhradou kamenivem Liaver. Výsledné hodnoty, obzvláště hodnoty pevnosti v tlaku, jsou pro tyto receptury velmi nízké, až nepřijatelné. Po odzkoušení laboratorních vzorků po dlouhodobém, tříměsíčním uložení bylo zjištěno, že dochází k poklesu u hodnot pevnosti v tlaku zhruba o jednu třetinu. U objemových hmotností u receptury J a K dochází k mírnému zvýšení charakteristik, u receptury I dochází k mírnému poklesu a receptura F se skoro nemění. Pevnosti v tahu za ohybu jsou oproti porovnávaným standardům mírně zvýšeny. Tvrdosti povrchu jsou oproti všem porovnávaným vzorkům nižší. Proto lze z výsledných hodnot vyvodit, že dlouhodobé uložení snižuje fyzikálně-mechanické charakteristiky. Receptury na bázi pěnobetonu lze doporučit pro výrobu a využití v in-situ.

Z laboratorního zkoušení vzorků plynobetonu na bázi reakce hliníkového prášku a nehašeného vápna byla z výsledných hodnot stanovena optimální dávka hliníkového prášku, při kterém vzorky dosahují nejlepších fyzikálně-mechanických vlastností.

Dávka hliníkového prášku	Průměrná pevnost v tahu za ohybu pro konkrétní recepturu[N.mm ⁻²]	Průměrná pevnost v tlaku pro konkrétní recepturu[N.mm ⁻²]	Průměrná objemová hmotnost[kg.m ⁻³]	Průměrná tvrdost povrchu [N.mm ⁻²]
0,7 g Al	0,55	3	1420	5,2
0,8 g Al	1,4	4,4	1560	5,5
0,9 g Al	1,5	3	1540	2,6
0 g Al Ref.	0,70	11,00	1900	6,6

Tabulka 25 - Výsledné hodnoty optimálních dávek hliníkového prášku pro stanovenou recepturu

Oproti referenční receptuře s nulovou dávkou hliníkového prášku dochází k výraznému poklesu pevností v tlaku, a to skoro o dvě třetiny celkové hodnoty. Naopak u pevností v tahu za ohybu dochází k zvýšení těchto hodnot. Objemové hmotnosti se zvyšující dávkou hliníkového prášku klesají až do dosažení minimální hranice, po dosažení této hodnoty opět mírně stoupá při snížení pevnostních charakteristik. Hodnota tvrdosti povrchu je oproti referenčnímu standardu optimální. Z výsledných charakteristik vychází jako nejlépe dávka 0,8 g hliníkového prášku. Tato dávka i přesto, že nedosahuje nejnižších objemových hmotností, dosahuje v porovnání s ostatními recepturami nejlepších pevnostních charakteristik. Avšak v porovnání s laboratorní výrobou vzorků pěnobetonu je zde nutné

upozornit na nutné stanovení přesných a stejných podmínek potřebných pro výrobu. U výroby plynobetonu fungující na bázi hliníkového prášku je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících kvalitu výsledné nakypřovací reakce čerstvé směsi teplota. Proto je nutné zajistit optimální teplotu vstupních surovin a z těchto důvodů není možné doporučit využití jako pytlované směsi pro použití v in-situ, jelikož není možné zabránit působení negativních vlivů a zajištění neměnného průběhu nakypřující reakce. V průmyslové výrobě je tento problém řešen nahříváním vstupních surovin na požadovanou úroveň a tím omezením působení tohoto negativního efektu.

Z laboratorně odzkoušených receptur plynobetonů na bázi reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku bylo stanoveno základní fyzikálně-mechanické chování v závislosti na přidávaných hmotnostních dávkách peroxidu vodíku. Prvním základním krokem bylo stanovit tři receptury, na kterých byly odzkoušeny částečné náhrady běžného kameniva kamenivem Liaver. Základním problémem při reakci chlorového vápna a peroxidu vodíku byl veliký vývin tepla, který způsoboval velmi rychlé zatuhnutí směsi a znemožnění jejího optimálního zpracování. V reakci na vzniklý problém byl zvýšen vodní součinitel. Došlo k omezení vzniku hydratačního tepla, ale zároveň došlo k snížení výsledných pevností. Vhodným krokem pro možnou modifikaci základní receptury je přidání zpomalovačů tuhnutí. Protože se nejedná o v praxi běžně používanou metodu vzniku plynobetonové směsi, výsledné vzorky nebyly porovnávány s referenčním standardem, ale s optimálním výpočtovým standardem.

Z výsledných laboratorních hodnot je patrné, že recepturou s nejlepšími vlastnostmi z testovaných vzorků je receptura B, se zvýšeným obsahem cementu. Z charakteristik výsledných tvrdostí povrchu dosahuje nejvyšších hodnot receptura B a receptury s částečnou náhradou běžného kameniva kamenivem Liaver, E a F. Se zvyšujícím se přídatkem peroxidu vodíku jsou z vyhodnocení zřetelné snižující se hodnoty objemových hmotností. Výjimkou je receptura B, u které je oproti jiným recepturám nižší dávka chlorového vápna schopná lépe reagovat za nakypření směsi. Pevnostní charakteristiky jsou oproti jiným materiálům velmi nízké. Pouze receptura B dosahuje pevnosti v tlaku nad $2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Vzorky, plynobetonu na bázi chlorového vápna, připravované na testování dlouhodobé stálosti, byly označeny jako nevhodné pro dlouhodobé skladování. Po přípravě směsi a jednodenním zrání ve formách, vzorky nedosáhly manipulačních pevností a byly nevratně zničeny. Proto bez nutné modifikace navrhované směsi není tento druh výroby plynobetonu možné využít v běžné praxi pro práci v in-situ. Avšak po úpravách receptury se jeví jako vhodná možnost pro linkovou výrobu.

10.4 Etapa IV – zhodnocení a výběr receptury

V této etapě byl stanoven ekonomický výpočet nákladů na pořízení surovin za jednu tunu. Průměrné náklady obsažené v ekonomickém výpočtu byly zjištěny od dodavatelů daných surovin.

Dalším krokem pro podrobnější zhodnocení používaných receptur je optimalizační výpočet. Do tohoto výpočtu bylo zvoleno šest kritérií: pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, tvrdost povrchu, objemová hmotnost, náklady na pořízení surovin a jednoduchost přípravy. Pro výpočtový postup hodnocení byla zvolena Saatyho matice. Z výsledného optimalizačního výpočtu jako nejlépe hodnocené receptury vyplývají receptury I a J pěnobetonu vzniklé přidáním pěnотvorných přísad. Po celkovém optimalizačním porovnání receptur vyplývá pořadí vhodnosti použitých možností vylehčení. Jako nejvhodnější způsob vyplývá využití směsí pěnobetonů vylehčených přidáním pěnотvorných přísad, druhým způsobem je použití pomocí plynobetonů za přidání hliníkového prášku, poslední možností je využití plynobetonů na bázi reakce chlorového vápna s peroxidem vodíku.

Výčet hodnot kritérií a složení neoptimalnějších receptur						
Receptura	REC I [g]	REC J [g]	Kritérium	Jednotka	REC I	REC J
CEM I 42,5 R	450	450	Pevnost v tlaku	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	14,7	17,7
			Pevnost v tahu za ohybu	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	2,6	3,2
Kamenivo frakce 0-4mm	900	900	Tvrdost povrchu	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	7,9	7,4
			Objemová hmotnost	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1475	1525
Liaver 0-4mm	90	90	Náklady na pořízení surovin	$\text{Kč}\cdot\text{t}^{-1}$	1670	1466
Voda	250	250	Jednoduchost přípravy materiálu	1-3 bodů	1	1
Pěnidlo Hostapur OSB (0,04 ze suché směsi)	0,54		Optimalizační výsledná hodnota:		84,8	88,11
Pěnidlo Tylovis EP 28 (0,04 ze suché směsi)		0,54				
Přísada urychlující tvrdnutí X-SEED 100 (20ml/kg cementu)	9					

Tabulka 26 - Výčet neoptimalnějších receptur

11. Celkové shrnutí

Jako první krok bylo nutné provést analýzu na trhu lehčených hmot, prozkoumání a rozdělení druhů průmyslových podlah využívaných v běžné praxi. Podlahy byly rozděleny do šesti základních kategorií a byl proveden jejich základní popis. Dále byl stanoven výčet možností vylehčování. Z vybraných přímých způsobů vylehčení vyplynuly jako vhodné možnosti vylehčení vnášením unikajícího plynu do matrice materiálu nebo napěnění dané struktury. Z celkového výčtu plynotvorných reakcí byly vybrány možnosti technologie výroby plynobetonu na základě reakce hliníkového prášku s vápnem a reakce chlorového vápna s peroxidem vodíku. Pro výrobu pěnobetonu byl zvolen způsob přidání práškových pěnotvorných přísad.

Pro kombinaci vylehčujícího efektu byl stanoven výčet vhodných plniv nacházejících se na zahraničním a tuzemském trhu, které by se mohly stát náhradou či částečnou náhradou za běžné kamenivo. Plniva byla rozdělena pro potřeby diplomové práce do tří vhodných kategorií. Z výčtu plniv, vyplynula po ekonomickém zhodnocení a po zhodnocení zvolených fyzikálních kritérií, jako nejvhodnější možnost zvolení plniva Liaver.

Experimentální část byla rozdělena na část věnovanou pěnobetonům, plynobetonům reagujícím na bázi hliníkového prášků a vápna, plynobetonům reagujícím na bázi chlorového vápna a peroxidu vodíku a ověření dlouhodobé stálosti při uložení vybraných receptur.

Prvním krokem pro tvorbu pěnobetonů na suché bázi byl návrh vhodných receptur s možnou částečnou náhradou kamenivem Liaver a s pěnicími přísadami Hostapur OSB a Tylovis EP 28. Na vytvořených vzorcích 40x40x160 mm byly po 28 dnech odzkoušeny fyzikálně-mechanické vlastnosti. Z výsledných zkoušek vyplynuly po srovnání hodnot jako nejvhodnější varianty receptury F, J, K a L. Tyto receptury dosahovaly hodnot pevnosti v tlaku vyšších než $10 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, při přijatelných poklesech ostatních vlastností jako je pevnost v tahu za ohybu a tvrdost povrchu. Ostatní receptury byly, kvůli velmi malým pevnostem, pod $5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, vyhodnoceny jako nevhodné.

Pro tvorbu plynobetonu s využitím reakce hliníkového prášku a nehašeného vápna bylo nutné stanovit optimální dávku hliníkového prášku. Po vytvoření zkušebních laboratorních vzorků lišících se fixní dávkou přidaného hliníkového prášku bylo z porovnání vyhodnocených zkoušek stanoveno optimum. Jako nejvhodnější varianta vyplývá dávka 0,8 g a 0,9 g hliníkového prášku. Tato dávka dosahuje oproti referenčnímu vzorku zhruba třetinových pevností v tlaku, což je hodnota $4,4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a $3 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Receptury dosahují

zvýšených pevností v tahu za ohybu a snížení objemových hmotností na hranici okolí 1500 kg.m^{-3} . Oproti referenčnímu vzorku klesá objemová hmotnost zhruba o 400 kg.m^{-3} .

Poslední zvolenou možností je tvorba plynobetonů vznikajících reakcí chlorového vápna a peroxidu vodíku. Návrh receptur spočíval v stanovení tří základních receptur, které byly v dalších krocích modifikovány. Vlivem velkého vývoje tepla souvisejícího s reakcí bylo nutné dané receptury modifikovat o zvýšení vodního součinitele pro zabránění zrychleného tuhnutí směsi. Z výsledných hodnot fyzikálně-mechanických vlastností se jako vhodná projevila pouze receptura B, u které je zvýšen obsah cementu na úkor obsahu chlorového vápna. Nejpříznivějších výsledných hodnot dosahovaly pevnosti v tlaku pod hranici 3 N.mm^{-2} . Jako nejvhodnější varianta byla vyhodnocena varianta B7 a B8. Ostatní receptury nesplňovaly základní požadované charakteristiky.

Pro ověření dlouhodobých vlastností vybraných receptur byly po uplynutí lhůty tři měsíců namíchány a vytvořeny zkušební laboratorní vzorky $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$. Po laboratorním odzkoušení vzorků byly výsledné hodnoty porovnány s jejich referenčními standardy. Z těchto hodnot je patrné, že dochází k poklesu pevnosti v tlaku, a to u všech receptur. Naopak u srovnání pevností v tahu za ohybu je vidět nárůst, také u všech receptur. Objemové hmotnosti se liší podle případu. U receptur pěnobetonů K, J dochází k zvýšení objemové hmotnosti, naopak u ostatních receptur pěnobetonů dochází k mírnému poklesu.

Posledním krokem bylo ekonomické zhodnocení s optimalizačním výpočtem. Z ekonomického zhodnocení vyplývají náklady na pořízení surovin na jednu tunu směsi. Pro další postup bylo zvoleno šest kritérií potřebných k výpočtu optimalizačnímu procesu. Z výsledků optimalizačního procesu vyplynulo pořadí výsledných receptur. Jako nejvhodnější se ukázaly receptury pěnobetonů, z nich receptury I a J. Další hodnotou v žebříčku jsou plynobetony na bázi hliníkového prášku, poslední variantou plynobetonu je chlorové vápno a peroxid vodíku.

12. Závěr

Cílem diplomové práce bylo vyvinout novou lehčenou podlahovinu z odpadních surovin na bázi pěnobetonu a neautoklávaného pórobetonu. Hlavním cílem diplomové práce bylo vyvinout takový materiál, který by bylo možné skladovat ve formě suché směsi připravené k použití jen s přidáním vody v pytlích nebo silech.

Jako první krok byla vypracována analýza trhu lehčených stavebních hmot a to zejména podlah. Podlahové konstrukce byly rozděleny do základních kategorií reprezentujících jejich typ.

Dále byly prozkoumány možnosti přímého vylehčení bez nutnosti přidání tekutých aditiv. Pro potřeby diplomové práce byly zvoleny varianty přímého vylehčení matrice materiálu jako plynobetonů fungujících na bázi hliníkového prášku a vápna, plynobetonů fungujících na bázi chlorového vápna s peroxidem vodíku a pěnobetonu s obsahem pěnotvorných přísad Hostapur OSB a Tylovis EP 28.

Pro možnost kombinovaného vylehčení byl vytvořen výčet vhodných plniv jako úplná či částečná náhrada běžného kameniva. Plniva byla zhodnocena podle ekonomických a zvolených kritérií. Bylo vybráno lehčené kamenivo Liaver.

Pro experimentální část byly navrženy receptury fungující na principu přímého vylehčení, vnášení vzduchu, plynu nebo pěny do matrice materiálu s úplnou či částečnou náhradou běžného kameniva.

V laboratorním prostředí byla provedena tvorba zkušebních vzorků formátu 40x40x160 mm podle předem navržených receptur. Dále byla vytvořena škála laboratorních vzorků určených k ověření vlastností po dlouhodobém skladování. Časový horizont pro dlouhodobé skladování byl určen na dobu tří měsíců. Po ukončení procesu skladování a namíchání uložených vzorků, došlo k odzkoušení zkušebních vzorků v laboratorních podmínkách na fyzikálně-mechanické zkoušky po 28 dnech od dne namíchání směsi.

Ekonomické zhodnocení vycházelo z průměrných nákladů na pořízení surovin od dodavatelů. Receptury byly přepočítány na jednotku koruny za tunu dané směsi. Jako nejlevnější varianta vyplynulo použití hliníkového prášku, následně pěnobetonu a plynobetonu, založeného na reakci chlorového vápna a peroxidu vodíku.

Závěrečným krokem, po provedení optimalizačního výpočtu pomoví Saatyho matice, bylo následné vyhodnocení udávající jako nejvýhodnější volbu použití pěnobetonů, konkrétně receptury I a J. Receptura I dosahuje hodnot pevnosti v tlaku $14,7 \text{ N.mm}^{-2}$, pevnosti v tahu za ohybu $2,6 \text{ N.mm}^{-2}$, tvrdosti povrchu $7,9 \text{ N.mm}^{-2}$ a objemové hmotnosti 1475 kg.m^{-3} .

Výsledné hodnoty receptury J dosáhly pevnosti v tlaku $17,7 \text{ N.mm}^{-2}$, pevnosti v tahu za ohybu $3,2 \text{ N.mm}^{-2}$, tvrdosti povrchu $7,4 \text{ N.mm}^{-2}$ a objemové hmotnosti 1525 kg.m^{-3} . Receptury se liší ve složení receptur pouze v použití aditiv (pěnotvorných přísad) a v celkových nákladech na pořízení surovin, kde receptura I je oceněná na 1670 Kč.t^{-1} a receptura J na 1466 Kč.t^{-1} .

Literatura a použité zdroje

- [1] SVOBODA, Pavel. *Průmyslové podlahy a podlahy v objektech pozemních staveb*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 111 s. ISBN 978-80-8076-054-0.
- [2] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2004, 471 s. ISBN 80-807-6007-1.
- [3] PYTLÍK, Petr. *Vlastnosti a užití stavebních výrobků*. Brno: VUTIUM, 1998, 399 s. ISBN 80-214-1123-6.
- [4] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- [5] DROCHYTKA R., MATULOVÁ P., *Lehké stavební látky*, Vysoké učení technické v Brně 2006
- [35] KAPČUK, Pavel. *Vývoj nových lehčených stavebních hmot pro průmyslové podlahy*. Brno, 2012. 63 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
- [36] POGORZELSKI, J., & URBAN, L., *Plynobetony a plynosilikáty ve stavebnictví*, Praha, 1962, Státní nakladatelství technické literatury.
- [6] www.imaterialy.cz
- [7] www.ceskestavby.cz
- [8] www.sircontec.sk
- [9] www.koostav.cz
- [10] www.heidelbergcement.cz
- [11] www.basf-cc.cz
- [12] www.ua.all.biz
- [13] www.ua.all.biz/cs/enterprises/by_product/?category=2795®ion=23
- [14] www.jetchem.cz
- [15] www.fce.vutbr.cz/veda/
- [16] www.sciencedirect.com
- [17] www.liaver.cz
- [18] www.poraver.com
- [19] www.refaglass.cz
- [20] www.geocell-schaumglas.eu
- [21] www.betonsserver.cz

- [22] www.perlit.cz
- [23] www.liapor.cz/cz/
- [24] www.podlahydf.cz/
- [25] www.ceskestavby.cz/
- [26] www.torkret.cz
- [27] www.trigaservice.cz
- [28] www.cz.123rf.com
- [29] www.eutit.cz
- [30] www.casopisstavebnictvi.cz
- [31] www.cz.all.biz
- [32] www.bvgroup.cz
- [33] www.lehm-bau-shop.de
- [34] www.acousticvision.com.au

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 - Průmyslová podlaha [24]	16
Obrázek 2 - Betonová podlaha [25]	17
Obrázek 3 - Pancéřová podlaha [26]	17
Obrázek 4 - Teracová podlaha [27]	18
Obrázek 5 - Dřevěná podlaha [28]	18
Obrázek 6 - Čedičová průmyslová podlaha [29]	19
Obrázek 7 - Vylehčení ve skladbě konstrukce [30]	20
Obrázek 8 - Hliníkový prášek [foto:autor]	23
Obrázek 9 - Struktura pórobetonu [31]	24
Obrázek 10 - Stroj pro výrobu pěny na stavbě [25]	27
Obrázek 11 - Pěna z pěnidla Sika SB2 [32]	28
Obrázek 12 - Přísada HOSTAPUR OSB [foto:autor]	28
Obrázek 13 - Pěnotvorná přísada Tylovis EP 28 [foto:autor]	29
Obrázek 14 - Úletový popílek do betonu [15]	31
Obrázek 15 - Struska [foto:autor]	31
Obrázek 16 - Cenoféry (mikrosféry) [14]	32
Obrázek 17 - Skelný recyklát [15]	33
Obrázek 18 - Kamenivo Liaver [17, 33, 34 úprava: autor]	34
Obrázek 19 - Granulát Poraver [18]	34
Obrázek 20 - Plnivo Refaglass připravené pro průmyslovou podlahu [19]	35
Obrázek 21 - Plnivo Geocell [foto:autor]	35
Obrázek 22 - Různé frakce betonového recyklátu [21]	36
Obrázek 23 - Plnivo Vermikulit [foto:autor]	37
Obrázek 24 - Expandovaný perlit [foto:autor]	38
Obrázek 25 - Granulát Liapor [foto:autor]	38
Obrázek 26 - Pevnost v tahu za ohybu [foto:autor]	39
Obrázek 27 - Höpplerův konzistomer [foto:autor]	40
Obrázek 28 - Pevnost v tlaku [foto:autor]	40
Obrázek 29 - Střásací stolek [foto:autor]	41
Obrázek 30 - Čerstvá směs [foto:autor] Obrázek 31 - Směs po nakynutí [foto:autor]	50
Obrázek 32 - 30% peroxid vodíku a chlorové vápno [foto:autor]	56
Obrázek 33 - Čerstvá směs chlorového vápna a peroxidu vodíku [foto:autor]	60
Obrázek 34 - Shluky vápenatých produktů [foto:autor]	66

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 - Náklady na pořízení surovin	42
Tabulka 2 - Hodnocení výběru plniva	43
Tabulka 3 - Návrh receptur pěnobetonů	44
Tabulka 4 - Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek pěnobetonů po 28 dnech.....	45
Tabulka 5 - Zpracovatelnost pěnobetonů	46
Tabulka 6 - Složení receptury hliníkového plynobetonu	50
Tabulka 7 - Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek hliníkového prášku po 28 dnech.....	51
Tabulka 8 - Navrhnutá receptura A	57
Tabulka 9 - Navrhnutá receptura B, se zvýšeným obsahem cementu	58
Tabulka 10 - Navrhnutá receptura C, se zvýšeným obsahem chlorového vápna	58
Tabulka 11 - Navrhnutá receptura D	58
Tabulka 12 - Navrhnutá receptura E, se zvýšeným obsahem cementu a částečnou náhradou kameniva.....	59
Tabulka 13 - Navrhnutá receptura F, se zvýšeným obsahem chlorového vápna a částečnou náhradou kameniva.....	59
Tabulka 14 - Objemová hmotnost receptur chlorových plynobetonů	60
Tabulka 15 - 1/2 Výsledky fyzikálně- mechanických zkoušek chlorových plynobetonů.....	61
Tabulka 16 - 2/2 Výsledky fyzikálně- mechanických zkoušek chlorových plynobetonů.....	62
Tabulka 17 - Výsledky fyzikálně- mechanických zkoušek po dlouhodobém odležení	68
Tabulka 18 - Ekonomické zhodnocení surovin	72
Tabulka 19 - Výpočet a celkové náklady za tunu receptury	73
Tabulka 20 - Zvolená kritéria	74
Tabulka 21 - Hodnoty daných receptur a požadované optimum.....	74
Tabulka 22 - Saatyho matice	75
Tabulka 23 - Výsledné hodnoty optimalizačního výpočtu.....	75
Tabulka 24 - Výběr nejlépe hodnocených receptur.....	77
Tabulka 25 - Výsledné hodnoty optimálních dávek hliníkového prášku pro stanovenou recepturu.....	78
Tabulka 26 - Výčet nejoptimálnějších receptur.....	80

Seznam použitých grafů

Graf 1 - Zpracovatelnost směsi pěnobetonů.....	46
Graf 2 - Tvrdost povrchu pěnobetonu	47
Graf 3 - Pevnost v tahu za ohybu pěnobetonů.....	48
Graf 4 - Pevnost v tlaku pěnobetonů	48
Graf 5 - Objemová hmotnost pěnobetonů	49
Graf 6 - Tvrdost povrchu hliníkových plynobetonů	52
Graf 7 - Objemové hmotnosti hliníkových plynobetonů.....	53
Graf 8 - Pevnost v tahu za ohybu hliníkových plynobetonů	54
Graf 9 - Pevnost v tlaku hliníkových plynobetonů.....	55
Graf 10 - Tvrdost povrchu chlorových plynobetonů	63
Graf 11 - Objemová hmotnost chlorových plynobetonů.....	64
Graf 12 - Pevnost v tlaku chlorových plynobetonů	65
Graf 13 - Pevnost v tahu za ohybu chlorových plynobetonů	66
Graf 14 - Porovnání tvrdosti povrchu po 28 dnech a po dlouhodobém odležení.....	69
Graf 15 - Porovnání objemové hmotnosti po 28 dnech a po dlouhodobém odležení	70
Graf 16 - Porovnání pevnosti za ohybu po 28 dnech a po dlouhodobém odležení	70
Graf 17 - Porovnání pevnosti v tlaku po 28 dnech a po dlouhodobém odležení.....	71

Seznam použitých norem

- ČSN EN 744505 Podlahy - Společná ustanovení
- ČSN EN 12390-3 Zkoušení zatvrdlého betonu – Pevnost v tlaku zkušebních těles
- ČSN EN 12390-7 Zkoušení zatvrdlého betonu – Objemová hmotnost zatvrdlého betonu
- ČSN 72 2071 Popílek pro stavební účely – Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení
- ČSN EN 196 Metody zkoušení cementu
- ČSN EN 1097 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva
- ČSN EN 13055 Pórovité kamenivo
- ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu
- ČSN EN 13318 Potěrové materiály a podlahové potěry- Definice
- ČSN EN 13813 Potěrové materiály a podlahové potěry- Potěrové materiály – Vlastnosti a požadavky
- ČSN EN 13892 – 1 Zkušební metody potěrových materiálů – Část 1: Odběr vzorků, zhotovení a ošetřování těles
- ČSN EN 13892 – 2 Zkušební metody potěrových materiálů – Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku
- ČSN EN 13892 – 6 Zkušební metody potěrových materiálů – Část 6: Stanovení tvrdosti povrchu
- ČSN EN 1015-3 Stanovení konzistence čerstvé malty s použitím střešacího