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

VYUŽITÍ RYCHLE OBNOVITELNÝCH SUROVIN VE VÝPLŇOVÝCH HMOTÁCH

UTILIZATION OF QUICKLY RENEWABLE MATERIALS IN THE FILLING MATERIALS

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
ING. ŠÁRKA KEPRDOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
doc. Ing. JIŘÍ BYDŽOVSKÝ, CSc.

BRNO 2016

Abstrakt
Stavebnictví je velice dynamicky se rozvíjející průmyslové odvětví, které klade stále vyšší požadavky na vlastnosti používaných stavebních materiálu i z nich budovaných konstrukcí. Dlouhodobě se v této souvislosti objevují tendence používání stavebních materiálů vyrobených z přírodních rychle obnovitelných zdrojů surovin. Tyto tendence jsou způsobeny přirozenou reakcí na moderní přetechnizovanou společnost a také snahou k ekologičtějšímu přístupu ve výstavbě. Přírodními materiály z obnovitelných zdrojů se v tomto smyslu rozumí technologicky zušlechtěné organické hmoty rostlinného původu. Disertační práce je zaměřena na výzkum a následný vývoj výplňových hmot pro svislé a vodorovné konstrukce na bázi rychle obnovitelných surovin. Stěžejní rychle obnovitelnou surovinou použitou pří výrobě výplňových hmot je technické konopí. Jakožto rychle obnovitelná surovina s velmi dobrými vlastnostmi velmi podobným dřevní hmotě. Dále byl výzkum zaměřen na druhotné suroviny, které z části nahrazují pojivovou složku výplňových hmot. Výsledné výplňové hmoty disponují dobrými fyzikálně-mechanickými i tepelně-technickými vlastnostmi.

Klíčová slova
Výplňové hmoty, přírodní rychle obnovitelné suroviny, technické konopí, druhotné suroviny, fyzikálně-mechanické a tepelně-technické vlastnosti.

Abstract
Construction is a very dynamically developing industry that is placing ever greater demands on the properties of used building materials and structures built on them. In this context, there is a long-term trend to use construction materials made from natural quickly renewable raw materials. These tendencies are caused by natural reaction to the overly technological modern society, as well as efforts towards a greener approach in construction. In this sense, the natural materials from renewable sources means technologically processed organic material of plant origin. Dissertation focuses on the research and subsequent development of filling materials for vertical and horizontal structures based on quickly renewable materials. Pivotal quickly renewable raw material used in the production of filling material is technical hemp. Technical hemp is quickly renewable raw material with very good properties very similar to wood. Furthermore, the research focused on secondary raw materials, which partly replace the binder of the filling material. The resulting filling material has good physical-mechanical and thermo-technical characteristics.

Keywords
Filling materials, quickly renewable natural raw materials, technical hemp, secondary raw materials, physico-mechanical and thermo-technical characteristics.

Bibliografická citace VŠKP

Ing. Šárka Keprdová *Využití rychle obnovitelných surovin ve výplňových hmotách.* Brno, 2016. 156 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 7. 2016

.....

podpis autora
Ing. Šárka Keprdová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Bydžovskému, CSc. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této práce a zaměstnancům Ústavu technologie stavebních hmot a dílců za odbornou pomoc při provádění laboratorních zkoušek.

OBSAH

1. ÚVOD 8
2. PŘÍRODNÍ MATERIÁLY VE STAVEBNICTVÍ 9
2.1. DŘEVO 11
2.1.1. DRUHY DŘEVIN 11
2.1.2. STAVBA DŘEVA 13
2.1.3. FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI 15
2.1.4. MATERIÁLY NA BÁZI DŘEVA 16
2.2. SLÁMA 16
2.2.1. VLASTNOSTI SLÁMY 17
2.2.2. STAVEBNÍ VYUŽITÍ SLÁMY 18
2.3. KONOPÍ 21
2.3.1. DRUHY KONOPÍ 22
2.3.2. CHARAKTERISTIKA 24
2.3.3. HISTORIE KONOPÍ 25
2.3.4. PĚSTOVÁNÍ A SKLIZEŇ 27
2.3.5. ZPRACOVÁNÍ KONOPÍ 29
2.3.6. EKONOMIKA PĚSTOVÁNÍ 31
2.3.7. LEGISLATIVA PĚSTOVÁNÍ 32
2.3.8. KONOPÍ Z HLEDISKA EKOLOGIE A VYUŽITÍ 33
2.3.8.1. NESTAVEBNÍ VYUŽITÍ 35
2.3.8.2. STAVEBNÍ VYUŽITÍ 37
2.3.8.2.1. KONOPNÉ TERMOIZOLAČNÍ MATERIÁLY 37
2.3.8.2.2. KONOPNÉ STAVEBNÍ BLOKY 41
2.3.8.2.3. DALŠÍ VÝROBKY 44
3. VÝPLŇOVÉ MATERIÁLY 47
3.1. HRÁZDĚNÉ ZDIVO 47
3.1.1. HRÁZDĚNÉ STAVBY V SOUČASNÉ DOBĚ 48
3.1.2. HRÁZDĚNÉ STAVBY S VYUŽITÍM KONOPNÉHO PAZDEŘÍ 49
3.1.2.1. TRADICAL® HEMP LIME PRODUKTY 50
3.1.2.2. HEMPCRETE 52
4. POJIVOVÁ SLOŽKA VÝPLŇOVÝCH HMOT 54
4.1. CEMENT 54
4.1.1. SUROVINY PRO VÝROBU PORTLANDSKÉHO SLÍNKU 55
4.1.2. VÝPAL PORTLANDSKÉHO SLÍNKU 55
4.1.3. DRUHY A VLASTNOSTI CEMENTU 56
4.2. VÁPNO 59
4.3. DRUHOTNÉ SUROVINY 60

4.3.1. POPÍLKY 60
4.3.1.1. KLASICKÉ POPÍLKY 61
4.3.1.2. FLUIDNÍ POPÍLKY 62
4.3.2. STRUSKA 63
5. CÍL PRÁCE 65
6. METODIKA PRACÍ 66
6.1. PŘEHLED PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK 70
6.1.1. STANOVENÍ VLASTNOSTÍ VSTUPNÍCH SUROVIN 70
6.1.1.1. PŘÍRODNÍ OBNOVITELNÉ MATERIÁLY 70
6.1.1.2. DRUHOTNÉ SUROVINY 74
6.1.2. STANOVENÍ VLASTNOSTÍ VYROBENÝCH VZORKŮ VÝPLŇOVÝCH HMOT 76
6.1.3. ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ 80
6.2. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ VÝPLŇOVÝCH HMOT 81
7. VÝSLEDKY JEDNOTLIVÝCH ETAP, VYHODNOCENÍ 84
7.1. VYHODNOCENÍ I. ETAPY „STUDIUM PROBLEMATIKY“ 84
7.2. VYHODNOCENÍ II. ETAPY „ZKOUŠENÍ VLASTNOSTÍ VSTUPNÍCH SUROVIN“ 86
7.2.1. PŘÍRODNÍ RYCHLE OBNOVITELNÉ MATERIÁLY 86
7.2.1.1. STANOVENÍ ZÁKLADNÍCH VLASTNOSTÍ SUROVIN A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ 86
7.2.1.2. PŘÍPRAVA VÝLUHU A JEHO NÁSLEDNÉ ZKOUŠENÍ 93
7.2.2. DRUHOTNÉ SUROVINY 100
7.3. VYHODNOCENÍ III. ETAPY „NÁVRH A ZÁKLADNÍ ZKOUŠENÍ RECEPTUR“ 104
7.3.1. 1. ETAPA – ZÁKLADNÍ RECEPTURY 105
7.3.2. 2. ETAPA – MINERALIZACE PLNIVA 109
7.3.3. 3. ETAPA – OPTIMALIZACE POJIVOVÉ SLOŽKY 113
7.4. VYHODNOCENÍ IV. ETAPY „VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ, OPTIMALIZACE RECEPTURY 120
7.4.1. ZHODNOCENÍ POZNATKŮ III. ETAPY 120
7.4.2. NÁVRH OPTIMALIZOVANÝCH RECEPTUR 121
7.4.3. ZKOUŠENÍ VLASTNOSTÍ OPTIMALIZOVANÝCH RECEPTUR, VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK 122
7.5. VYHODNOCENÍ V. ETAPY „CELKOVÉ SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ“ 130
8. DISKUZE VÝSLEDKŮ 133
9. ZÁVĚR 142
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 144
CITOVANÉ NORMY 149
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK 151
SEZNAM OBRÁZKŮ 152
SEZNAM TABULEK 155

1. ÚVOD

Historie stavebnictví sahá hluboko do počátků věku člověka a stále patří a patřit bude mezi nejrozšířenější odvětví lidského snažení měnit planetu Zemi. Stále se rozvíjí, hledají se nové, šetrnější technologie, znovu se využívají materiály na přírodní bázi a vznikají nové materiály, které kombinují kladné vlastnosti dvou a více různých materiálů, přičemž nově vzniklý materiál může být levnější a ekologicky šetrnější.

V poslední době se stále více objevují tendence používání stavebních materiálů vyrobených z přírodních obnovitelných zdrojů surovin. Tyto tendence jsou způsobeny přirozenou reakcí na moderní přetechnizovanou společnost a také snahou k ekologičtějšímu přístupu ve výstavbě. Přírodními materiály z obnovitelných zdrojů se v tomto smyslu rozumí technologicky zušlechtěné organické hmoty rostlinného původu. Pokud je použitá surovina zároveň vedlejším produktem jiné výroby, můžeme ji charakterizovat jako druhotnou surovinu, je možno tedy hovořit o racionálním využívání odpadů. Nejpoužívanější přírodní obnovitelnou surovinou je bezesporu dřevo. Ovšem mezi přírodní takzvaně rychle obnovitelné zdroje surovin můžeme zařadit např. konopí, slámu, rákos, len, kokosová vlákna, bambus, aj. Většina dosavadních aplikací materiálů s obsahem rychle obnovitelných surovin byla realizována jen v malém měřítku, většinou na základě přímé iniciativy investora stavby, což je způsobeno především v důsledku všeobecné nedůvěry vůči těmto materiálům, plynoucí z tlaku výrobců „tradičních“ stavebních materiálů. Výzkumy týkající se aplikací těchto hmot ukazují, že jsou tyto výrobky ve většině případů schopny konkurovat běžně užívaným surovinám podobného typu. Charakteristické jsou pro tyto materiály výborné tepelně-izolační, zvukově-izolační a difuzní vlastnosti, které zaručují kvalitní pohodu bydlení. [1]

Mezi perspektivní obnovitelné suroviny z hlediska širokého využití ve stavebních materiálech se jeví technické konopí. Znovu objevená surovina, která byla v minulosti využívána snad ve všech odvětvích lidské činnosti. Postupným technickým rozvojem lidstva byla však vytlačena do ústraní např. lnem a jinými průmyslově vyráběnými surovinami. Konopí má ve většině případů téměř stejné vlastnosti jako dřevo, ale s několika podstatnými výhodami. Výtěžnost konopí je 4x vyšší než dřevní hmoty, ke zpracování není potřebná náročná a velká mechanizace, hlavní výhodou je jeho rychlá obnovitelnost, na sklizeň nemusíme čekat roky, ale je otázkou jedné sezóny. Ovšem na druhou stranu musíme říci, že v některých aplikacích použití dřevní hmoty nelze nahradit žádnou rychle obnovitelnou surovinou, např. konstrukční prvky střech či stropů.

2. PŘÍRODNÍ MATERIÁLY VE STAVEBNICTVÍ

Přírodními materiály z obnovitelných zdrojů se v tomto smyslu rozumí technologicky zušlechtěné organické hmoty rostlinného původu. Průzkumy týkající se využívání stavebních hmot vyrobených z přírodních obnovitelných surovin ukázaly, že tyto materiály většinou vykazují o něco méně příznivé mechanicko-fyzikální vlastnosti než výrobky se surovinami anorganickými. Na druhé straně bylo také prokázáno, že tyto nedostatky mohou být v praxi vyváženy jinak vysokou úrovní ostatních užitných vlastností. [1]

Jejich vláknitý charakter a nízká tepelná vodivost přispívají k lepším tepelně-izolačním schopnostem. Přírodní materiály rostlinného původu poskytují oproti běžným silikátovým materiálům vyšší hodnoty měrné tepelné kapacity c [$J.kg^{-1}.K^{-1}$], proto zabudování takových materiálů do stavby ovlivňuje tepelně-akumulační schopnost stavebních konstrukcí. Dále najdou využití zejména u vnějších lehkých konstrukcí. Přírodní materiály rostlinného původu jsou obecně propustné pro vodní páru a mohou akumulovat jisté množství vlhkosti sorpcí ze vzduchu. Vlastností rostlinné hmoty a materiálů z ní vyrobených je schopnost absorbovat vlhkost do vnitřního pórového systému při zvýšené vlhkosti vzduchu a při snížení vlhkosti vzduchu ji naopak pozvolna uvolňovat do okolního prostředí. Tento mechanismus příznivě ovlivňuje vlastnosti mikroklimatu uvnitř objektu z hlediska vlhkosti vzduchu hlavně v zimním období, kdy může docházet k dlouhodobému snížení vlhkosti vzduchu uvnitř objektu. Zároveň je nutná zvýšená pozornost při montáži těchto materiálů a dodržení podmínek a doporučení výrobce materiálů na bázi přírodních surovin. V neposlední řadě poskytují materiály na bázi rostlinných vláken dobré zvukově-izolační vlastnosti, jak z hlediska vzduchové neprůzvučnosti, tak i akustického útlumu. Konkrétní vlastnosti však přímo závisejí hlavně na struktuře a objemové hmotnosti použitého materiálu.[1]

Nevýhodou většiny rostlinných materiálů je vyšší hořlavost a určitá vlhkostní citlivost. Nadměrná dlouhodobá vlhkost může zapříčinit biologickou korozi, tedy degradaci působením bakterií, plísní či hub na materiál. Proto by tyto materiály, zabudované ve stavební konstrukci, měly být vždy spolehlivě odděleny od zdrojů vlhkosti anebo musí být při navlhčení zajištěna možnost jejich rychlého vysychání. Při správném návrhu skladby a provedení stavby by však s vlhkostí ve stěně neměly vznikat problémy. Hořlavost se dá snížit přísadami retardujícími hoření. Hořlavost můžeme ovlivnit také nanesením vhodné nehořlavé povrchové úpravy (omítka nebo obklad). Požární odolnost,

stejně jako vlhkostní charakteristiky, můžeme ovšem primárně příznivě ovlivnit aplikací v kompozitních materiálech s užitím anorganických pojiv, které také tyto přírodní materiály stabilizují a snižují náchylnost vůči biologické degradaci. [1]

Přírodní stavební materiály můžeme rozdělit podle mnoha hledisek. Jednou z možností je rozdělení dle rychlosti růstu. Takto bychom dělili přírodní materiály na obnovitelné a rychle obnovitelné.

Největším a nejpoužívanějším obnovitelným materiálem je bezesporu dřevní hmota. Takto označena je z jednoho prostého důvodu a to, že jeho obnovitelnost je značně pomalá. Doba, po kterou musíme čekat, než lze kvalitní dřevní hmotu získat, je několik desítek let. ***Dřevo*** je používáno ve stavebnictví již odnepaměti v různých podobách a pro různé účely. Při výrobě a zpracování řeziva vzniká z prvotního dřevitého materiálu ve fázi opracování (řezání, broušení, hoblování) na konstrukční výrobky daných rozměrů a rovinatosti povrchu značné množství částicových (partikulárních) odpadů. Ty mají stejnou materiálovou bázi jako vyráběný materiál, a tudíž i stejně cenné látkové vlastnosti. Některé typy těchto zhodnocených odpadů lze často s úspěchem použít pro výrobu nových stavebních materiálů. Jejich využití je možné například pro výrobu tepelně izolačních materiálů.

Nejznámějším zástupcem tzv. rychle obnovitelných surovin je bezesporu ***sláma***. Sláma vzniká jako produkt při pěstování obilí. Lze ji většinou získat jako odpadní produkt zemědělství, proto její využívání ve stavebnictví můžeme chápat jako zužitkování odpadní suroviny. Použití slámy ve stavebnictví zažívá v poslední době tzv. renesanci. Využívala se ve stavebnictví již odedávna. Tradiční bylo použití slámy například v doškových střechách, k výrobě nepálených cihel "vepřovic", navíc přes zimu na půdě uskladněná sláma stavení tepelně izolovala.

V současném moderním stavitelství představuje slámy významnou roli. Na trhu se objevují výrobky pro stavební účely ze slámy nebo s jejím použitím. I přes rychlý vývoj a nové poznatky o mechanicko-fyzikálních vlastnostech slámy a prvků z ní, je její použití nadále spojováno především s experimentální výstavbou. [2], [3]

Další významnou rychle obnovitelnou surovinou, která se v dnešní době dostává do popředí zájmů po mnohých letech v ústraní, je ***technické konopí***. Technické konopí je velmi perspektivní surovinou, která si našla svoje uplatnění ve všech odvětvích průmyslu. Je bezezbytku zužitkovatelné a dá se využít v prakticky všech průmyslových oblastech. Všechny výrobky jsou bezodpadové - dobře rozložitelné v přírodě.

2.1.DŘEVO

Dřevo patří k nejstarším stavebním materiálům, používáno bylo již od pravěku. V současné době zaznamenávají dřevěné konstrukce celosvětově opět velký rozvoj. Hlavními důvody tohoto vývoje jsou výhodné konstrukční vlastnosti dřeva, zejména lehkost, snadná opracovatelnost a dobré izolační vlastnosti. Stále více jsou využívány i dobré vlastnosti lepených dřevěných prvků a kompozitních materiálů na bázi dřeva. Svůj podíl na stoupající oblibě dřeva mají také požadavky na ochranu životního prostředí, protože právě dřevo je jedním z mála stavebních materiálů, které jsou schopny se přirozeně obnovovat. [2]

Dřevo má ale i své stinné stránky. Podléhá živočišným a biologickým škůdcům, atmosférickým vlivům, je hořlavé, mění svůj tvar s vlhkostí, což klade značné nároky na údržbu a ošetřování. [4]

Norma ČSN EN 844-1 [80] rozlišuje pojem dřevo a dříví. Dřevo definuje jako substanci mezi dření a kůrou stromu nebo keře obsahující lignin a celulózu. Dříví je definované jako dřevo v podobě stojících nebo pokácených stromů, nebo ve formě jejich prvního zpracování.

2.1.1. DRUHY DŘEVIN

Rostliny, u kterých převážná část pletiv, především v nadzemních osách (kmen a větve) a kořenech je lignifikováno, se nazývají dřeviny. Lze je dělit podle různých hledisek. Botanicky se dělí na jehličnaté a listnaté, obě tyto skupiny pak lze dělit na měkké a tvrdé, přesná hranice mezi nimi ale není dána. S ohledem na makroskopickou stavbu dřeva se rozlišují dřeviny bělové a jádrové. Další dělení je např. podle původu na domácí a dovezené. Exotické dřevo se u nás používá na speciální účely. [2]

a) Listnaté dřeviny

Listnaté dřeviny se dělí na měkké, většinou bělové, mezi něž patří lípa, osika, olše a jírovec, nebo jádrové k nim zařadíme topol a vrbu. Do skupiny tvrdých listnáčů bělových patří buk, habr, javor a bříza, mezi jádrové potom dub, jasan, jilm, akát a většina ovocných dřevin. Rostou 120 až 150 let. Dosahují výšky 20 ~ 25 m (dub až 60 m) a průměru kmene až 1,5 m (dub až 3 m). Ve stavebnictví se nejčastěji používá dřevo dubové nebo bukové.

Dřevo dubové je tvrdé, pevné, těžké, houževnaté a trvanlivé. Dřevo bukové je měkčí a ne tak houževnaté. Ostatní dřeviny jsou používány spíše dekorativně. [4]

b) Jehličnaté dřeviny

Obecně lze říci, že jehličnaté dřeviny rostou rychleji, proto je jehličnaté dřevo měkčí, méně trvanlivé, ale také levnější. Rostou 80 až 100 let, dosahují výšky 25 až 40 m a průměru kmene až 2 metry. Ve stavebnictví se používá nejčastěji smrk, jedle, borovice, k dekoračním účelům je to pak modřín.

Smrkové dřevo je bílé až nažloutlé, dobře štípatelné, poměrně měkké a lehce zpracovatelné, lehké, pružné, vhodné k lepení, mírně smolnaté, mívá pevně zarostlé suky. Trvanlivost smrkového dřeva uloženého na vzduchu bez styku s půdou je 50 až 75 let, ve vlhku rychle hnije. Používá se na prakticky všechny druhy stavebního řeziva – jako konstrukční dřevo i na stavebně truhlářské výrobky. Smrkové dřevo se používá nejčastěji, je poměrně lehké a má pryskyřičné dřevo s dlouhými vlákny, u nás je také nejvíce zastoupeno – více než polovina všech dřevin je právě smrk.

Jedle má podobné vlastnosti jako dřevo smrkové. Dřevo má z hlediska pravidelnosti růstu lepší jakost, ale horší zpracovatelnost než dřevo smrkové. V suchu je jedlové dřevo velmi trvanlivé, méně odolné je v exteriéru. Vysoce trvanlivé je ve vodě.

Borovice má dřevo měkké, ale tvrdší než smrk, lehké až středně těžké, křehčí a málo pružné. Má velký obsah pryskyřice, proto je velmi trvanlivé i ve vlhku, zejména ve vodě. Dřevo je bílé barvy se žlutočerveným jádrem.

Modřín má středně těžké dřevo, poměrně měkké, ovšem tvrdší než smrk, či borovice. Barva je žlutobílá s červenohnědým jádrem, má výbornou trvanlivost. [2] [4]

Tab. 1: *Vybrané vlastnosti dřeva [4]*

Vlastnost	***Jednotka***	***Dřevo měkké***	***Dřevo tvrdé***
měrná hmotnost	$kg.m^{-3}$	1 540	
objemová hmotnost	$kg.m^{-3}$	400 ~ 600	600 ~ 700
nasákavost hmotnostní	%	80 ~ 140	60 ~ 90
nasákavost objemová	%	40 ~ 55	35 ~ 55
pevnost v tlaku ve směru vláken	MPa	47 ~ 55	60 ~ 65
pevnost v tahu ve směru vláken	MPa	80 ~ 105	90 ~ 135
pevnost v ohybu ve směru vláken	MPa	45 ~ 130	55 ~ 170
modul pružnosti	MPa	10 000 ~ 11 800 tah 10 500 ~ 13 000 tlak	
modul pružnosti ve smyku	MPa	55 ~ 70	

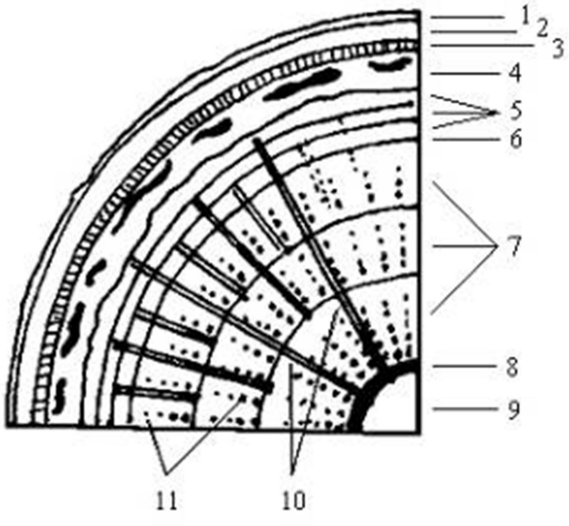
Vlastnost	*Jednotka*	*Dřevo měkké*	*Dřevo tvrdé*
součinitel tepelné vodivosti	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0,13 ~ 0,21	0,17 ~ 0,25
měrná tepelná kapacita	$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$	2,1 ~ 2,7	
součinitel délkové teplotní roztažnosti	$10^{-6}\ K^{-1}$	3,5 ~ 5,4	
tvrdost dle Janky	–	250 ~ 350	650 ~ 800
rychlost šíření zvuku	$m.s^{-1}$	3 600 ~ 4 100	

2.1.2. STAVBA DŘEVA

Makroskopická stavba

Předmětem makroskopické stavby dřeva je struktura dřeva viditelná pouhým okem. Makroskopická stavba je významným prvkem určování stavby dřeva, rozlišení vad, jakostního třídění a má vliv na vlastnosti, zejména mechanické a fyzikální a na zpracování dřeva.

Mezi hlavní znaky makroskopické stavby dřeva řadíme letokruhy, jádro, běl, vyzrálé dřevo, suky, dřeňové paprsky, pryskyřičné kanálky, cévy, jarní a letní dřevo. Doplňkovými makroskopickými znaky pak jsou barva, lesk, textura.



1 - pokožka
2 – korek
3 – prvotní kůra
4 – základní pletivo
5 – lýko
6 – mízové pletivo
7 – letokruh
8 – dřeňová korunka
9 – dřeň
10 – dřeňové paprsky
11 – cévy

Obr. 1: *Příčný řez kmenem dřeva [1]*

Anizotropie dřeva, tj. různé vlastnosti v různých směrech, je důvodem pro popisování struktury dřeva ve třech rovinách a směrech. Rozlišujeme tedy tři základní řezy dřevem:

- příčný (transverzální, čelní) - vedený rovinou kolmou na podélnou osu kmene,
- radiální (poloměrový) - vedený rovinou rovnoběžnou s podélnou osou kmene, která touto osou prochází,
- tangenciální - vedený rovinou rovnoběžnou s podélnou osou kmene, která touto osou neprochází.

Mikroskopická stavba dřeva

Předmětem popisu mikroskopické stavby dřeva jsou rozměry, uspořádání a složení buněk. Každá z nich má buněčnou stěnu a tato stěna uzavírá uvnitř otvor, který se nazývá lumen. Charakteristickým skladebným prvkem jehličnatých dřevin jsou tracheidy, které tvoří až 95 % objemu dřevní hmoty. Jsou to buňky 2 až 5 mm dlouhé, tloušťka stěn činí 2 až 3 μm nebo 5 až 7 μm podle toho, zda jde o buňky tzv. jarní či letní. U listnatých dřevin jsou to hydrocyty, které tvoří až 75 % objemu dřevní hmoty.

Ve dřevě jsou mimo tyto buňky ještě další dva základní typy buněk a nespočet přechodových.

Struktura a složení dřeva

Dřevo se skládá hlavně z celulózy (cca 50 %), hemicelulózy (cca 22 %) a ligninu (cca 22 %), které tvoří buněčné stěny. Zbylých 6 % jsou látky vytvářející vnitřek buněk a patří k nim pryskyřice, tuky, vosky, třísloviny, barviva, alkaloidy a látky minerální. [2]

Chemicky se všechny druhy dřeva skládají ze stejných prvků a to přibližně ve stejném množství. Organické látky, tvořící převážnou část dřeva, obsahují kolem 50 % uhlíku, 43 % kyslíku, 6 % vodíku a 0,3 % dusíku. Zbytek (cca 0,7 %) tvoří látky minerální obsahující draslík, sodík, vápník, fosfor, hořčík aj. [2]



Obr. 2: *Třísky ze smrkového dřeva*

2.1.3. FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva se liší nejen podle druhu dřeviny, ale i v rámci jednoho druhu, liší se i vlastnosti dřeva z jednoho stromu podle toho, ze které části pochází.

Mechanické vlastnosti dřeva ovlivňují viditelné charakteristiky dřeva – suky, šířka letokruhů, odklon vláken.

Barva dřeva – čím je dřevo tmavší, tím obsahuje víc pryskyřic a třísloviny.

Hustota dřevní hmoty – cca 1 500 $kg.m^{-3}$.

Objemová hmotnost – závisí na druhu dřeva a jeho vlhkosti. S rostoucí vlhkostí vzrůstá. Objemová hmotnost dřeva v suchém stavu u běžných dřevin se pohybuje od 400 do 700 $kg.m^{-3}$.

Vlhkost – absolutně suché dřevo se získá sušením do konstantní hmotnosti při 103 ± 2 ºC v odvětrávané sušárně. Přirozeně vyschlé dřevo není úplně suché, jeho vlhkost se mění v závislosti na teplotě a vlhkosti vzduchu. Čerstvě poražené dřevo má vlhkost 40 až 170 %, dřevo proschlé má vlhkost obvykle nižší než 20 %.

Sesychání a bobtnání – je důležité pro technologické zpracování dřeva, tyto procesy probíhají v každém směru vláken jinak. Dřevo seschne v podélném směru cca o 0,2 %, v radiálním směru cca o 5 % a v tečném směru cca o 15 %.

Pevnost – je schopnost materiálu vzdorovat silovým účinkům zatížení. U dřeva je různá ve směru vláken, v radiálním a tangenciálním směru.

Modul pružnosti – roste s objemovou hmotností a klesá s vlhkostí dřeva. Při namáhání tahem, tlakem a ohybem ve stejném směru vláken se od sebe liší jen nepatrně, proto se udávají jako jedna hodnota. Modul pružnosti kolmo k vláknům je asi 10 ~ 20 krát nižší než rovnoběžně s vlákny.

Ostatní vlastnosti

Tepelná vodivost – je malá a zvětšuje se s objemovou hmotností, vlhkostí a teplotou dřeva. Ve směru vláken je dřevo dvakrát vodivější než kolmo na vlákna.

Teplotní roztažnost – je malá, kolmo na vlákna je asi 5 krát větší než ve směru vláken.

Akustické vlastnosti – dřevo má vynikající akustický útlum a ozvučnost, proto se používá při výrobě hudebních nástrojů. Rychlost zvuku ve vzduchu je přibližně 10 krát

menší než ve dřevě ve směru vláken a přibližně 3 krát menší než ve vodě. Měření rychlosti šíření zvukových vln se využívá v nedestruktivním zkušebnictví.

Elektrické vlastnosti – dřevo v suchém stavu je elektricky nevodivé, se vzrůstající vlhkostí se však vodivost prudce zvyšuje.

Trvanlivost – závisí na prostředí, ve kterém je dřevo použito, a na druhu dřeva. Dřeviny s temnějším jádrem jsou trvanlivější než dřeviny se světlým nebo nevýrazným jádrem. [2]

2.1.4. MATERIÁLY NA BÁZI DŘEVA

Při použití dřeva v podobě masivního řeziva mohou být zužitkovány pouze mohutnější stromy a i z nich jenom některé jejich části. Navíc během růstu stromu vznikají ve dřevě různé nepravidelnosti a vady, které nelze v masivních prvcích použít. Pokud se však dřevní hmota rozdělí na menší částice a ty se opět spojí, lze tyto vady a nepravidelnosti potlačit a navíc lze využít i menší části stromů (např. tenké větve apod.) Tímto způsobem se vyrábí celá řada materiálů na bázi dřeva, které mohou mít lepší vlastnosti než masivní dřevo. Jejich výhodou je vysoce efektivní využití dřevní hmoty, převážně nízká objemová hmotnost (kolem 500 $kg.m^{-3}$) při vysoké pevnosti, snadná opracovatelnost a spojování, objemová stálost a vyšší požární odolnost a odolnost proti biologickým škůdcům. K materiálům na bázi dřeva patří:

- stavební desky (překližované desky a vláknité desky, třískové a OSB desky),
- lepené lamelové dřevo,
- vrstvené dřevo,
- zhuštěné dřevo,
- modifikované dřevo,
- kompozity kombinující dřevo s jinými materiály (cementotřískové desky, aj.). [2]

2.2.SLÁMA

Sláma vzniká jako produkt při pěstování obilí, lze ji většinou získat jako odpadní produkt zemědělství, proto její využívání ve stavebnictví můžeme chápat jako zužitkování odpadní suroviny. Sláma se v českých zemích používá od nepaměti (písemné zmínky se datují do roku 1350). O tom, že je sláma kvalitní materiál, který v přijatelných podmínkách

dokáže dlouho plnit svou funkci, svědčí stavební průzkumy historických objektů. I po staletích si v nich stébla zachovala svou barevnost a kvalitu.

Vynález koňmi tažených strojů pro balení slámy umožnil její hojné využití v zemích s velkou produkcí obilí. Následné rozšíření parního stroje s sebou přineslo možnost dobře stlačit seno nebo slámu do hranatého tvaru svázaného provázkem nebo drátem, což vedlo k použití balíků slámy jako stavebního materiálu. Dodnes existují staré a stále funkční slaměné objekty, které dokládají možnosti tohoto materiálu. [4]

V moderním stavebnictví představuje sláma v současnosti významnou sekci v oblasti alternativních přístupů. Na trhu se objevují výrobky pro stavební účely ze slámy nebo s jejím použitím. I přes rychlý vývoj a nové poznatky o mechanicko-fyzikálních vlastnostech slámy a prvků z ní je její použití nadále spojováno především s experimentální výstavbou. [2, 3, 5, 6]

Osevní plochy obilovin v rámci EU-27 činily v období 2013/2014 (54,5 mil. ha), což je nepatrný pokles v porovnání s léty 2012/2013 (58 mil. ha) a 2011/2012 (56,5 mil. ha). V České republice se z dlouhodobého pohledu osevní plocha pěstovaných obilovin výrazně neliší, stále osciluje kolem výměry 1 500 tis. ha. Podle soupisu osevních ploch ČSÚ a Agrární komory ČR k 30. 6. 2015 činila celková osevní plocha obilovin u nás 1 403 tis. ha, oproti předchozí sezóně došlo k poklesu o 8 tis. ha. Tyto plodiny vyprodukují okolo 6 miliónů tun slámy, která je ze 70 % využita v zemědělství, zbývajících 30 % představuje přebytek. Proto je sláma vhodnou alternativou pro další její využití například ve stavebnictví. [7, 8]

2.2.1. VLASTNOSTI SLÁMY

Žlutá až zlatistá, dobře vysušená sláma je zdravotně nezávadná. Neobsahuje pyly, které způsobují různé alergie. Příznivou vlastností slámy je, že při svém růstu absorbuje CO_2. Vnější povrch se vyznačuje voskovitou, vodu odpuzující vrstvou, ale i přes to je nutno materiál před vlhkostí chránit. Při zanedbání tohoto opatření dochází k vývoji plísní a zvýšení tepelné vodivosti. Vlhkost nad 20% nesmí být dosažena ani krátkodobě. Na stěnu zhotovenou ze slámy má vliv také vlhkost, kterou obsahuje vzduch. Difuzí je transportována do konstrukce, v níž může dojít ke kondenzaci vodní páry.

Často je hlavním důvodem, který brání použití slámy, její hořlavost. Lisovanou slámu lze porovnat po stránce hořlavosti s telefonním seznamem. Jednotlivá stébla hoří dobře, ovšem balík slámy hoří špatně. Slaměné balíky se řadí do E třídy reakce na oheň

s hořlavostí B2, což znamená normálně hořlavé. Pozornost před požárem je nutno udržovat během výstavby, kdy by měl platit zákaz kouření a provádění prací s otevřeným ohněm.

U slámy se nedá součinitel tepelné vodivosti jednoznačně stanovit, a to kvůli jejímu přírodnímu charakteru. Tepelná vodivost závisí na obsahu vlhkosti, objemové hmotnosti, kvalitě slisování a na uspořádání stébel. Při objemové hmotnosti pohybující se mezi 90 až 180 $kg.m^{-3}$ kolísá tepelná vodivost mezi hodnotami 0,044 až 0,060 $W.m^{-1}.K^{-1}$, tyto hodnoty jsou při nízkém obsahu vlhkosti, za určitých podmínek může λ dosáhnout až hodnoty 0,115 $W.m^{-1}.K^{-1}$.

Sláma vykazuje velmi dobré zvukově izolační vlastnosti. Způsobuje to schopnost slámy pohlcovat zvuk a také její elasticita. Stěna z oboustranně omítnutých balíků má vyšší vzduchovou neprůzvučnost než obdobně těžké konstrukce z jiných materiálů. [1,9]

Nevýhodou ve srovnání s konvenčními stavebními materiály mohou být v některých případech horší statické vlastnosti, snadnější napadnutelnost biotickými škůdci, náročnější projekční příprava a nutnost dodržování vyšší technologické kázně při realizaci. [10]

2.2.2. STAVEBNÍ VYUŽITÍ SLÁMY

Stavění ze slaměných balíků

Jako jistou alternativu pro současnou výstavbu lze využít slaměné balíky. Slaměné balíky se začaly vyrábět kvůli lepší skladovatelnosti a manipulaci asi před sto lety. V té době se z nich také začaly stavět první domy na jihu Spojených států a na Ukrajině, některé z nich stojí dodnes. Balíky je možno bez dalších úprav přímo použít pro stavbu. Užití slaměných balíků je výhodné zejména po ekologické stránce. Sláma je vynikající materiál pro ekologicky a ekonomicky příznivé stavění, neboť vyniká těmito vlastnostmi: nízký prostup tepla srovnatelný s minerální vatou (proměnlivý dle tloušťky a hustoty balíku), dobrá manipulace, únosnost, stabilita, ohnivzdornost stěny s oboustranným dřevěným bedněním a hliněnou omítkou je 90 minut. Slaměný balík dobře přijímá a odpařuje případnou zkondenzovanou vodu na rozdíl od minerální vaty. Dobrá je přilnavost omítek jak moderních, tak i tradičních hliněných. V neposlední řadě je to cena, která se obvykle pohybuje v rozmezí 100-200 $Kč/m^3$.

Po dožití stavby je sláma z balíků jednoduše a nezávadně likvidovatelná a můžeme ji kompostovat. Neupravená sláma má vysokou vlhkostní citlivost a sklony k degradaci účinkem vlhkosti (hniloba, plíseň). Při správném návrhu a provedení stavby by však s vlhkostí ve stěně neměly být problémy. Konstrukční vrstva slámy musí být vždy

spolehlivě oddělena od všech zdrojů vlhkosti a souvisle uzavřena další materiálovou vrstvou, např. omítkou nebo obkladem, které mj. eliminují její hořlavost. Přesto je z tohoto důvodu použití balíků vhodné spíše pro malé stavby.

Stavby ze slámy se staví v zásadě dvojím způsobem: s nenosnými a nosnými stěnami.

Nenosná (výplňová) konstrukce: Slaměné balíky je možné použít nejrůznějším způsobem. Jako výplň dřevěného či jiného skeletu, jako dodatečnou izolaci zděné stavby, jako izolaci stropu či střechy. Balíky musí být vždy spolehlivě odděleny od všech zdrojů vlhkosti a těsně uzavřeny další konstrukcí, například omítkou nebo obkladem.

Nosná konstrukce: Myšlenka nosné konstrukce byla a stále je vůdčí ve Spojených státech. Balíky musí být stlačeny minimálně na 90 $kg.m^{-3}$ lépe na 120 $kg.m^{-3}$, propojeny svislými prvky a ztuženy věncem. Použití balíků jako nosných prvků značně uvolňuje prostor pro architektonické vyjádření. [3]

Stavební panely ze slámy tzv. EKOPANELY

Hlavní surovinou pro výrobu slaměných panelů je pšeničná sláma. Jádro desky tvoří slisovaná sláma. Povrch panelů je opatřen kartonem z recyklovaného papíru pojeným k slaměnému jádru přírodním lepidlem. Do lisované slámy se přidávají přísady proti hlodavcům a také zlepšující další vlastnosti panelů. Lisování slámy do kompaktní podoby desky probíhá ve speciálním tvářecím lisu za vysokého tlaku a teploty. Všechny materiály používané k výrobě desek jsou plně hygienicky nezávadné, ekologicky čisté a mají svůj původ v obnovitelných přírodních zdrojích.

Slaměné desky mohou být užity pouze pro zhotovení nenosných částí konstrukcí budov. Možnost použití slaměných desek ve stavebnictví je poměrně široké. Mezi nejrozšířenější aplikace patří interiérové příčky, stropní podhledy, řešení půdních vestaveb obytných podkroví, opláštění dřevěných skeletů apod. Při použití jako opláštění skeletu však nemohou plnit statickou funkci plošného ztužení rámů skeletu. Obecně je lze často použít místo sádrokartonových desek, OSB desek nebo dřevotřískových desek. Zajímavá je aplikace slaměných desek při řešení obytných podkroví. U podkrovních prostor bývají totiž časté problémy s tepelnou stabilitou v letním období. Díky tepelně akumulačním schopnostem slaměných panelů lze tyto problémy přinejmenším zmírnit. [11]



Obr 3: *Řez Ekopanelem. [11]*

Za pozornost stojí použití slaměných panelů při výstavbě montovaných staveb s dřevěným skeletem. V České republice již bylo provedeno několik realizací takových staveb rodinných domů, přičemž zkušenosti z jejich realizací jsou dobré. Nosnou konstrukci obvodových stěn zde tvoří dřevěný skelet, který je z obou stran opláštěný slaměnými panely, prostor mezi panely je vyplněn tepelnou izolací. Povrch panelů se upravuje jako běžné SDK desky, tj. malbami, nátěry, tapetováním, nástřiky, stěrkovými omítkami či obklady. Slaměné panely se v těchto stavbách používají také pro vnitřní dělící stěny, příčky a podhledy. [11]



Obr 4: *Stavba montovaného rodinného domu. Dřevěná konstrukce skeletu opláštěná slaměnými panely. [11]*

U objektů tvořených popsanou konstrukcí a materiály lze očekávat vysokou úroveň některých užitných vlastností, neboť dříve zmíněné výhodné vlastnosti přírodního organického materiálu se promítnou do vlastností celého objektu.

Díky montované konstrukci je proces výstavby velmi rychlý a není do stavby objektu vnesena vlhkost, jako je tomu u zděných či betonovaných konstrukcí. To vede oproti budovám vznikajícím mokrým procesem k jistým úsporám na vytápění v prvních letech obývání stavby a nedochází k problémům vlivem zvýšené zabudované vlhkosti. Vnější stěny objektů mají velmi dobré tepelně-izolační vlastnosti dané dvěma slaměnými deskami a výplní z tepelně izolačního materiálu.

Tepelně akumulační vlastnosti dřeva a slámy dávají vnitřnímu prostředí objektu relativně dobrou tepelnou stabilitu v zimním i v letním období. Potom nedochází v létě přes den k rychlému přehřívání vnitřního prostředí v domě, ani k rychlému vychládání budovy při přerušení vytápění v zimním období. Díky vlastnostem slámy lze v objektu předpokládat vhodný vlhkostní režim vnitřního vzduchu.

Ekopanely se vyrábí ve dvou základních šířích 800 a 1200 mm. Délky jsou připravovány dle požadavků zákazníka v rozmezí 1250 – 3200 mm. Průměrná hmotnost ekopanelů je 19 – 23 $kg.m^{-2}$ (plošná hmotnost) a 379 $kg.m^{-3}$ (objemová hmotnost). [3], [5], [11], [12]

2.3.KONOPÍ

Je starou kulturní rostlinou, původem ze střední Asie. První zmínky o konopí, jeho vlastnostech a využívání, pochází ze starých svitků z Indie a Číny okolo roku 600 před naším letopočtem. V Evropě se začalo pěstovat okolo roku 400 před naším letopočtem. Prvotní využití měla konopná pryskyřice, dále pak konopné vlákno k výrobě papíru. Později se přišlo na jeho dobré účinky v lékařství a především veliké pole působnosti ve stavebnictví.

Historie pěstování konopí v České republice by se dala rozdělit do několika etap. Začátek pěstování konopí se datuje koncem 18. století, až do počátku 20. století se konopí hojně pěstovalo jak u nás tak na Slovensku. Jeho pěstování bylo následně vytlačeno levnou dovozovou bavlnou. Další etapa pěstování konopí začala rokem 1995, avšak dle dostupných údajů ministerstva zemědělství ČR se od roku 2007 osevní plochy technického konopí pětinásobně zmenšily. Hlavním důvodem je pokles cen konopného vlákna, který nastal v důsledku hospodářské krize. Zatímco v roce 2007 dosahovaly plochy konopných

polí více jak 1500 ha, v roce 2008 se snížily až na 518 ha. V roce 2009 bylo vyseto konopí pouze asi na 300 ha zemědělské půdy. Tato hodnota osevních ploch oscilovala stabilně, až do roku 2014 kdy byl hluboký pokles na 127 ha. V loňském roce osevní plocha konopí opět vzrostla až na 427 ha. [8]

Stejně jako v České republice se snížila pěstitelská plocha konopí setého i v zemích EU. Při porovnání plochy osevu touto zemědělskou plodinou v letech 2011 a 2012 v rámci EU zjistíme, že v roce 2012 osev zabíral již pouze 10 544 ha, což je o 3 456 ha méně než v roce 2011. Hlavními producenty této zemědělské plodiny jsou zejména Francie, Velká Británie, Německo, Polsko. Osevní plochy se v roce 2012 zvýšily pouze ve Velké Británii a Německu. Dalšími významnými evropskými zeměmi, v nichž se konopí pěstuje pro vlákno, jsou především Rusko a Ukrajina.

Vývoj obchodu s konopnými produkty roste a poptávka po nich se neustále zvyšuje. Zájem je jak o surovinu především konopné vlákno, tak o hotové produkty. V současné době konopí využívá především papírenský a automobilový průmysl. Dále se z konopí vyrábějí tepelné izolační rohože používané ve stavebnictví. Dalšími produkty technického konopí jsou textilie, stále populárnější konopná kosmetika i konopné potraviny. Konopí, především konopné pazdeří, lze užít i jako palivo.

V zemích EU je pěstování technického konopí podporováno a konopné materiály jsou mezi spotřebiteli propagovány. Důvodem je tendence nahrazovat ve větší míře umělá vlákna, jejichž likvidace je z hlediska životního prostředí stále více problematická. Po lnu je konopí druhou nejrozšířenější přadnou rostlinou mírného pásma. [4]

2.3.1. DRUHY KONOPÍ

Konopí seté (Cannabis sativa L.)

Neboli konopí technické druh, který nás nejvíce zajímá, je teplomilná plodina náročná na vodu, půdu, živiny i agrotechniku. Patří do čeledi konopovitých. Je to dvoudomá, nebo i jednodomá prastará přadná a kulturní plodina. Rostliny dorůstají do značné výšky (až 4 m), jsou málo rozdvojeny a mají řidší listoví, 3 ~ 30 mm silný stonek má v lýkové části 13,5 ~ 19,5 % vlákna, které zvyšuje pevnost stonku. Potlačuje růst plevele, má rekultivační a protierozní schopnosti, odčerpává z půdy nečistoty, jedovaté látky a těžké kovy. Při jeho pěstování nejsou třeba ani pesticidy, ani herbicidy, které zatěžují životní prostředí. Obsah psychoaktivních látek je velmi nízký (do 0,3 %), mnohdy se vůbec nevyskytují.

Rozeznáváme tři formy konopí setého:

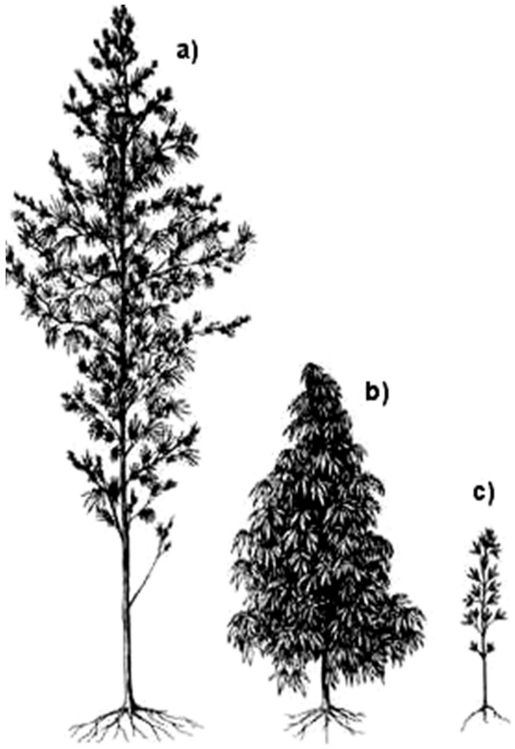
- *severní:* je v průměru 0,6 ~ 0,8 m vysoké, dozrává za 60 ~ 70 dní. Dává malý výnos stonků i semen, která jsou drobná. U nás se nepěstuje.
- *jižní (typ vegetativní):* 3 ~ 4 m vysoké, dozrává za 130 ~ 180 dní. Dává velký výnos vláken, malý výnos semen. Vlákna jsou dlouhá a jemná.
- *přechodný typ:* je 1,70 ~ 2,50 m vysoké, dozrává za 90 ~ 120 dní Má střední vlastnosti obou předchozích forem. Dává dobrý výnos vláken i semen.

Konopí indické (Cannabis indica)

Rostliny jsou nízké (do 1,2 m) a velmi husté, stonek není tolik vláknitý, jsou silně rozdvojeny a mají velmi husté listí. Jeho pěstování je zakázané pro jeho vysoký obsah psychoaktivních látek zvaných tetrahydrocannabinoly (THC). Druh má vysoké omamné účinky, neboť obsah THC je v suché hmotě vyšší než 0,3 %. [13]

Konopí rumištní (Cannabis ruderalis)

Rostliny jsou velmi malé (600 mm), mají tenký, slabě vláknitý stonek, listoví není příliš husté, listy jsou poměrně velmi velké. Je to plevelný druh rostoucí volně na rumištích a skládkách bez významnějších omamných účinků. [13, 14]



Obr 5: *Druhy konopí: a) Konopí seté, b) Konopí indické, c) Konopí rumištní. [15]*

2.3.2. CHARAKTERISTIKA

Technické konopí je jednoletá dvoudomá teplomilná rostlina z čeledi Cannabaceae. Je to rostlina s tenkým dlouhým, přímým, rychle dřevnatějícím a slabě rozvětveným stonkem, s dlanitě složenými zoubkovanými listy, které se rozbíhají do 3-9 úzkých výběžků o délce 7-15 cm a s malými, oválnými nažkovými plody. Hlavní stonek dosahuje délky 3-5 m a průměru 30 mm. Samčí rostliny jsou vyšší a štíhlejší, mají světlejší listy a šedozelený vrchol. Dozrávají o 4-6 týdnů dříve než samičí rostliny. Samičí rostliny jsou nižší, silnější, více olistěné a tmavší. V normálním porostu je asi 53 % samčích a 47 % samičích rostlin. Konopí má kulovitý kořen sahající do hloubky až 40 cm, na hlubokých půdách až do 2 metrů. Stonek dorůstá průměrně kolem 2 m výšky (ale i 4 m). V prvních fázích růstu je měkký, dužnatý, později odspodu dřevnatí. Obsahuje 13,5 až 19,5 % vlákna. Listy jsou střídavé, dlanité, tří až třináctičetné s krátkými stopkami. Plod je vejčitá jednosemenná nažka od 8 do 26 g (v průměru 20 g). Semena brzy ztrácí klíčivost (třetím rokem o 30 až 40 %). Konopí je cizosprašné (větrosnubné). Kvete v červnu až srpnu, plody dozrávají v září až říjnu. [15, 16] Pěstuje se všude v mírném pásmu s výjimkou půd trvale zamokřených nebo trvale přesušených. Při zpracování je využitelná celá rostlina a nevzniká žádný odpad. Nejvyšší obsah a nejkvalitnější vlákno dávají stonky zušlechtěných odrůd, a to především stonky tenké a dlouhé, pocházející ze sklizně v období plného květu. Nové odrůdy dosahují výtěžnost vlákna na úrovni lnu. Získaná vlákna jsou celulózové povahy, která se od ostatních druhů textilních vláken liší nejen anatomickou stavbou, ale i chemickým složením a mnoha fyzikálními vlastnostmi. [15]



Obr 6: *Pole technického konopí [16]*

Konopí je cenná zemědělská plodina, je vynikající alternativou dřeva pro stavební účely (od stavebního řeziva po překližku a dřevotřísku), která v některých vlastnostech dřevo dokonce i předčí. Výnosy z pěstování konopí jsou více jak 4x vyšší, jeho pěstování je méně náročné a zpracování nevyžaduje tak mohutnou mechanizaci. Je důležité si uvědomit, že u nás je povoleno pěstovat výhradně konopí seté, které pro malý obsah THC (tetrahydrokanabinolů) do 0,3 % není možné zneužívat jako omamnou látku (konopí indické má obsah THC vyšší než 7 %). Konopí je přírodní materiál tvořený převážně celulózou (44–55 %), hemicelulózou (16–18 %), ligninem (4–28 %) a pektiny (4–18 %). Zbylých 6–7 % tvoří pryskyřice, popeloviny a proteiny. Jakožto organický materiál, vykazuje konopí značnou nasákavost (80–100 %) a velice nízkou sypnou (80 $kg.m^{-3}$) a měrnou (1500 $kg.m^{-3}$) hmotnost. [18]

2.3.3. HISTORIE KONOPÍ

Využívání konopí je známo několik tisíc let. Konopí se využívalo na výrobu lan, rybářských sítí a tkanin. Staré šatstvo a sítě se používaly při výrobě papíru, takže se stal velice trvanlivý, že se dochoval dodnes v hrobech datovaných 100 let př.n.l. Další zprávy o konopí dokumentují znalost pěstování konopí nejen kvůli vláknu, ale i na semena. Semena konopí byla spolu s rýží, ječmenem, prosem a sójou nejstarším používaným zrním.

Jako potrava bylo konopí používáno až do 1. či 2. století př.n.l., kdy bylo nahrazeno chutnějšími a produktivnějšími obilninami.

Do Evropy přinesli konopí severní cestou 2800 let př.n.l. Skotové a konopné vlákno se na čas stalo hlavní plodinou v historii téměř každé evropské země. Pylové analýzy zařazují domestifikaci konopí do r. 400 př.n.l. v Norsku, Anglii a Německu, ve Švédsku do roku 150 př.n.l. atd. Řekové a Římané taktéž konopí používali hlavně na lana a plachtoví.

Historické prameny se shodují v tom, že od časů více než 1000 let př.n.l. až do roku 1883 bylo konopí nejpoužívanější zemědělskou plodinou a nejdůležitější průmyslovou plodinou na světě pro tisíce produktů a podniků vyrábějících většinu vláken, papíru, látek, světelného oleje, kadidel a léčiv, zrovna tak jako hlavního zdroje rostlinných bílkovin pro potřeby lidí a zvířat. Jako potrava bylo konopí hojně používáno až do 2. století před naším letopočtem, kdy začalo být nahrazováno obilninami. Pěstování konopí se především nejvíce rozvíjelo v evropských přímořských státech, které konopí ve velké míře zpracovávaly pro vlákno. Vyráběly z nich plachty a lana pro své námořní lodě.

S Kryštofem Kolumbem přeplulo konopí Atlantik, jako oblečení a také jako plachtovina. Konopná látka na sebe upozornila brzy svými dobrými vlastnostmi: na těle lehká a vzdušná, odolná proti mokru a vysoce trvanlivá. Obyvatelé Ameriky později nazvali tuto rostlinu “Hemp” a pro svou vlajku použili právě tuto látku.

Konopí se tedy rozšířilo v průběhu několika generací z Číny do celého světa. Do třicátých let dvacátého století se využívalo jako užitková rostlina pro výrobu všech druhů textilií a oděvů, bot, ložního prádla, plachtoviny, lan, provazů a také knih, biblí, map, papírových peněz, akcií, cenných papírů, novin a malířských pláten. Z konopného semenného oleje se vyráběly prakticky všechny barvy, laky i olej na svícení. Semena s vysokým obsahem rostlinných bílkovin byla jedním z hlavních zdrojů potravy člověka. Konopný papír se dodnes ve světě používá např. na bankovky v Kanadě, na lepší vydání Bible, jako kvalitní cigaretový papír atd. Třicátá léta a vynalezení stroje na mechanickou sklizeň konopí předpovídala této rostlině skvělou budoucnost.

V roce 1619 byly v některých Amerických státech zavedeny první marihuanové zákony „nařizující" všem farmářům pěstovat technické konopí, a to až do poloviny 18. století. Dokonce v Anglii bylo tolik ceněné britské občanství podle Dekretu Koruny udělováno těm cizincům, kteří pěstovali konopí, a pokuty byly často ukládány těm, kteří jej pěstovat odmítali.[27]

Konopí bylo legálním platidlem ve velké části Ameriky od roku 1631 až do počátku 19. století, vláda takto povzbuzovala americké farmáře pěstovat ještě více konopí. Lidé mohli platit daně konopím v celé Americe po více než 200 let.

Příchod průmyslové revoluce posunul konopí na místo menší důležitosti ve světovém obchodu následkem nedostatku mechanizované sklízecí a lámací technologie potřebné pro masovou produkci.

V roce 1916, zemědělský bulletin 404 amerického ministerstva zemědělství předpovídal, že jakmile bude vynalezen vytírací a sklízecí stroj, konopí se opět stane největší americkou plodinou. To se stalo o 22 let později, kdy časopis Popular Mechanics právě takové zařízení představil. Očekávaný boom se však nekonal. Velké světové společnosti měly v konopí velkého konkurenta, a pokud by došlo k jeho většímu rozšíření, s největší pravděpodobností by přišly o většinu svých zisků. Díky politickým tlakům a ovlivňování médii se jim podařilo konopí odstranit z trhu a zařadit mezi ilegální plodiny kvůli jejím psychotropním účinkům. Výzkumy stále potvrzují absurditu tohoto rozhodnutí.[28]

O pozvolný návrat konopí se zasloužil v posledních letech současný trend zdravé výživy a hledání nových ekologických průmyslových surovin. Stejně jako ostatní trendy v této oblasti, nastal také návrat konopí v USA, nebo spíše v Kanadě, která je velkou základnou pěstování lnu a konopí. Pěstitelé tam hrdě označují semínko jako "nejvýživnější potravinu planety". Když prozkoumáme jeho složení a nutriční hodnoty tak jim můžeme dát za pravdu. [13, 15, 19, 21]

2.3.4. PĚSTOVÁNÍ A SKLIZEŇ

Pro pěstování konopí mohou být využity pouze odrůdy, které mají obsah omamných látek nižší než 0,3 % v jakékoli části rostliny. V současné době se nejvíce vysévají odrůdy Benico a Ferimon. [25]

Konopí je plodinou teplejších oblastí a je možné jí pěstovat do nadmořských výšek kolem 450 m.n.m. Konopí je vhodnou plodinou pro obnovu odlesněných, vyčerpaných a kontaminovaných pozemků. Svými kořeny vytahuje z půdy těžké kovy a ukládá je ve stonku. Během několika sezon tak dokáže doslova vyčistit kontaminovanou půdu. Navíc na ni neklade žádné zvláštní nároky a nevyžaduje tolik hnojení jako jiné plodiny. Je jednou z mála rostlin, které se mohou pěstovat i po sobě. [27, 28]

Má poměrně rychlou vegetační dobu, během 100-120 dnů dosahuje běžně tří metrové výšky a má nahoře husté listoví. Seje se později, kolem poloviny dubna až

začátkem května, kdy teplota půdy dosahuje 8-10 °C. V začátku růstu vyžaduje konopí větší množství vody, až 2x více než např. pšenice nebo oves, později je však schopné odolávat přechodnému suchu. Tímto růstem vzniká vlhké klima, které má pozitivní účinky na půdní floru. Půda nevysychá a svými hlubokými a jemnými kořeny zlepšuje konopí kvalitu půdy. Už jen tím, že konopí roste, půdu obohacuje a čistí. Je dobrou předplodinou i pro náročné polní plodiny, protože zanechává půdu v dobrém stavu. Za normálních okolností nevyžaduje konopí po výsevu žádnou zvláštní péči. Plevel se v těsném porostu udusí a tím je konopí znatelně jednodušší než například len. Výzkum ukázal, že konopí má na hektar za rok nejmenší nároky na práci. Kořeny konopí navíc mohou zabránit jevům vznikajícím po odlesnění (erozím půdy, zanášení koryt řek, apod.). Konopí v podstatě nepodléhá žádným chorobám ani škůdcům. Pouze někdy porosty na semeno při dozrávání navštěvuje ptactvo. [17]

Konopí pěstované na využití stonku a semena se sklízí v okamžiku, kdy jsou samčí rostliny v plném květu a zbavují se pylu nebo po pylovém spadu, nebo když začnou opadávat listy.

Nejslabším článkem celého pěstování je sklizeň. Technologie sklízení konopí je specializovaná oblast, která vyžaduje komplexní představu o konečném produktu. Největší problém při sklizni způsobují houževnaté stonky, které jsou běžnými sklízecími mechanizmy neskliditelné. Proto se používají upravené kombajny a žací stroje. Pořízení těchto strojů je pro běžného zemědělce značně ekonomicky náročné, neboť úzká specializace neumožňuje jejich další využití. Nejvýhodnějším strojem pro kombinovanou sklizen je kombajn DEUTZ FAHR – TOP LINER, který má vpředu nesenou upravenou řezačku. Tento stroj sklízí semeno a pomačkané stonky vrací v neuspořádaném stavu zpět na pole k narosení. Na poli vyrosené a proschlé stonky se lisují do běžných balíků jako sláma. [7, 15, 19, 20]



Obr 7: *Kombajn DEUTZ FAHR – TOP LINER pro kombinovanou sklizeň konopí. [15]*



Obr 8: *Sklízecí stroj typ Clipper s žacími lištami [21]*

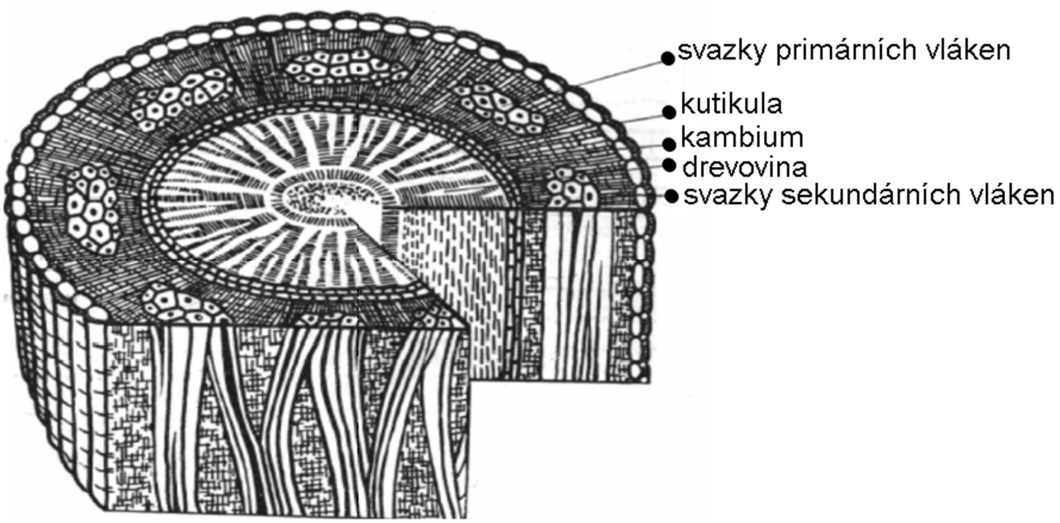
2.3.5. ZPRACOVÁNÍ KONOPÍ

Pro zpracování stonků se dnes běžně využívá moderní tzv. vytřásací metoda. Technologický postup této metody je následovný: vyrosené, slisované balíky konopné slámy jsou ze skladového prostoru dopraveny k tírenské lince. Zde se vkládají na posuvný příjmový dopravník, následně se na rozvolňovači balíků odstraní provazy a uvolněné, rozbalené balíky postupují k zařízení, které se nazývá kalandr, kde dochází k rozvolňování

stonků. Dále pak následuje zařízení, zvané „vytřáska“, která odstraňuje dřevitý odpad stonku, tzv. pazdeří. Následuje lamačka, kde probíhá lámání stonku a opět následuje „vytřáska“. Na konci této tírenské linky je buben, kde dochází k rozvolňování konopného vlákna a uvolnění zbytkového pazdeří. Linka se staví dle požadavku na čistotu vlákna pro další zpracování.

Produkty ze zpracování:

- Vlákno: vláknitá část rostliny využitelná pro výrobu textilních výrobků, lan, izolací a dalších materiálů s využitím přírodních vláken.
- Pazdeří: vzniká jako odpad při získávání konopného vlákna. Svojí povahou je velmi podobné dřevěným pilinám a hoblinám, proto je i využití pazdeří ve stavebnictví velmi podobné využití dřevěných pilin a hoblin. [7, 20]



Obr 9: *Řez konopným stonkem [12]*

a) 

b) 

c) 

d) 

Obr 10: *Technické konopí: a) v růstu [16]; b), c) různé frakce konopného pazdeří; d) vlákno.*

2.3.6. EKONOMIKA PĚSTOVÁNÍ

Pro ekonomické zhodnocení pěstování konopí setého je potřeba vycházet z komplexního využití celé rostliny. Mít na zřeteli pozitivní vliv na životní prostředí a postupný vzestupný ekonomický profit podle toho, jak rychle se budou rozšiřovat osevní plochy a jak budou konopné suroviny a produkty dále zpracovávány a využity. Pěstování konopí vyžaduje promyšlenou kooperaci pěstitelů, prvotního i koncového zpracovatele v regionu. V Evropě bývá iniciátorem v poslední době uživatel, např. automobilový, papírenský nebo stavební průmysl, který u svých dodavatelů objednává a často financuje konečné zpracování.

U nás se daří prosazovat záměr, aby se v jednotlivých regionech pěstovalo konopí seté v okruhu max. do 70–100 km, tím se omezí zbytečné převážení suroviny na velké vzdálenosti a ušetří se i pohonné hmoty. Zároveň je důležité, aby zde uprostřed tohoto pomyslného kruhu vznikala zpracovatelská centra, která by sdružovala pěstitele a zpracovávala konopný stonek z dané lokality pro své potřeby. Současně zde vzniká i přidružená výroba a je potřeba, aby postupně vznikaly zpracovatelské a odbytové

organizace, případně družstva, která by zajišťovala odbyt a vznik lokálních trhů, tak aby i tok finančních prostředků zůstával v jednotlivých regionech. Pro ekonomické zhodnocení je potřeba vycházet z celkových průměrných variabilních a fixních nákladů jednotlivých pěstitelů.

Průměrné výnosy na 1 ha:

Stonek 6 – 7 t/ha (až 12 t/ha), z toho 0,5 – 1,2 t vlákna a 1,5 – 4,0 t pazdeří, semeno 0,7 – 1,4 t/ha.

Cena rosených stonků se pohybuje od 2 700 Kč – 3000 Kč/t.

Cena vlákna se pohybuje mezi 11 Kč – 17 Kč/kg.

Cena volně loženého pazdeří se pohybuje mezi 1 500 Kč – 4 500 Kč/t.

Cena semena se pohybuje od 19 Kč – do 25 Kč/kg. [7]

2.3.7. LEGISLATIVA PĚSTOVÁNÍ

Do roku 1996 se mohlo konopí seté bez rozporu s naší legislativou normálně pěstovat. Situace se zkomplikovala přijetím zákona č. 92/1996 Sb. o odrůdách, osivu a sadbě pěstovaných rostlin, který s účinností od 30. 8. 2003 nahradil zákon č. 219/2003 Sb. o odrůdách, osivu a sadbě pěstovaných rostlin, ve znění pozdějších předpisů. Ustanovení nově přijatého zákona upravují podmínky pro registraci odrůd a pro obchodování s rozmnožovacím materiálem tak, aby vyhovovaly požadavkům výše zmíněných směrnic i po vstupu České republiky do EU. Do jisté míry zákon omezuje pěstování konopí tím, že stanoví požadavky na rozmnožovací materiál uváděný do oběhu. V současné době existuje od 1. 1. 1999 nový zákon č. 167/98 „O návykových látkách“, který upravuje pěstování máku a konopí:

§ 2 Pojmy - *Pro účely tohoto zákona se rozumí* ***konopím*** *kvetoucí nebo plodonosný vrcholík rostliny z rodu konopí (Cannabis) nebo nadzemní část rostliny z rodu konopí, jejíž součástí je vrcholík.*

§ 15 Zákazy - *Zakazuje se získávat* ***konopnou pryskyřici*** *4) a látky ze skupiny tetrahydrokanabinolů z rostliny konopí (rod Cannabis).*

§ 24 Pěstování konopí a koky. Zakazuje se za *a) pěstovat druhy a odrůdy rostliny konopí (rod Cannabis), které* ***mohou*** *obsahovat více než* ***0,3 %*** *látek ze skupiny tetrahydrokanabinolů,*

§ 29 Ohlašovací povinnost osob pěstujících mák setý nebo konopí. *Osoby pěstující mák setý nebo* ***konop****í na celkové ploše větší než* ***100 m^2*** *jsou povinny předat hlášení místně*

příslušnému celnímu orgánu podle místa pěstování, písemně nebo v elektronické podobě podepsané zaručeným elektronickým podpisem podle zvláštního právního předpisu
*a) do konce května 1. výměru pozemků, které byly v příslušném kalendářním roce oseté **mák**em setým nebo **konopím**, včetně názvu použité registrované odrůdy, 10g) čísla parcely, názvu a čísla katastrálního území, 10h) 2. odhad výměry pozemků, na nichž bude pěstován **mák** setý nebo **konopí** v příštím kalendářním roce,*
*b) v průběhu vegetace a sklizně údaje o výměře pozemků a způsobu zneškodnění **máku** setého, **makoviny** nebo **konopí**, včetně názvu použité registrované odrůdy, 10g) čísla parcely, názvu a čísla katastrálního území, 10h) a to nejpozději do 5 dnů před provedením jejich zneškodnění,*
*c) do konce prosince příslušného kalendářního roku 1. výměru pozemků, které byly oseté **mák**em setým nebo **konopím**, výměru pozemků, ze kterých byl sklizen **mák** setý nebo **konopí**, včetně názvu použité registrované odrůdy, 10g) čísla parcely, názvu a čísla katastrálního území, 10h) 2. množství sklizené **makoviny**, **konopí**, semene **máku** setého a semene **konopí**.* [15, 19, 22, 23]

2.3.8. KONOPÍ Z HLEDISKA EKOLOGIE A VYUŽITÍ

Podle závěrů českých i zahraničních odborníků je technické konopí ideální ekologickou rostlinou, jedním z hlavních představitelů alternativního zdroje surovin a energie.

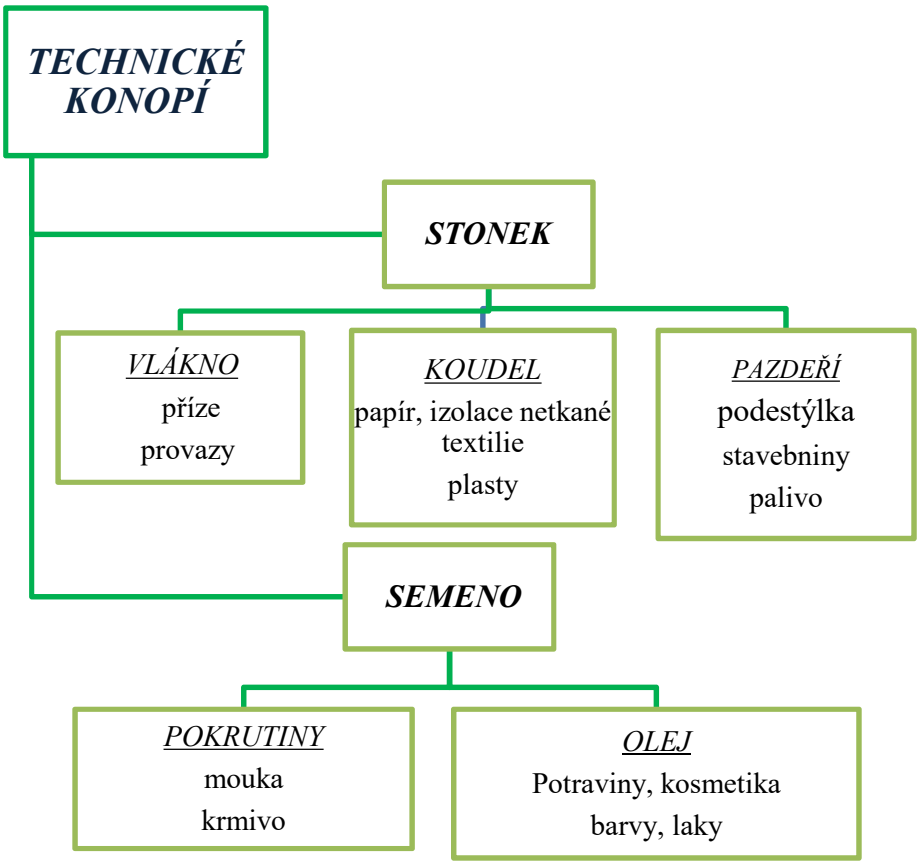
Oproti výrobě z konvenčních materiálů je výroba z konopných surovin šetrnější k životnímu prostředí a splňuje bezezbytku požadavky kladené na trvale udržitelnou produkci. Získané výrobky se vyznačují vysokou trvanlivostí a zároveň 100% biodegrabilitou.

Konopí seté, tzv. technické konopí, je všestranně využitelná ekologická plodina. Uvádí se, že dokáže nahradit i ropu. Z konopí se dá vyrobit až 25 tisíc stoprocentně recyklovatelných výrobků. Konopí je zdaleka nejefektivnější obnovitelný přírodní zdroj. Základní využitelnou surovinou je stonek (vlákno, pazdeří), semeno a květy. Stonek obsahuje rostlinnou buničinu tzv. dřevitou část vhodnou pro výrobu biopaliv - peletek, briket, benzínu, dřevěného uhlí, methanolu i elektřiny. Celulózu i hemicelulózu ve dřeni lze přeměnit na alkoholová paliva – dále pak na methanol, ethanol a plynný metan. Ve světě se konopné suroviny využívají v oblasti potravinářství, v chemickém a textilním průmyslu, v lékařství, kosmetice atd. V ČR se konopí seté pěstuje hlavně pro produkci

krátkého vlákna k technickému využití, pro netkaný textil, papírenský a automobilový průmysl a také pro stavební účely. [15, 20]



Obr 11: *Ukázka všech produktů z konopí použitelné pro stavební využití [24]*



Obr 12: *Schéma využití technického konopí [26]*

2.3.8.1. NESTAVEBNÍ VYUŽITÍ

Textilní zboží

Konopné látky se vyrábějí již po staletí. Z konopného plátna se v historii vyráběly plachty, lana, oděvy, pleny, ložní prádlo i bytový textil. Vlákno z konopí je pevné, vzdušné a trvanlivé. Svou schopností odvádět pot se konopné textilie podobají moderním syntetickým termo-materiálům. Jsou hladké na omak, odolávají teplu a mohou zadržet až 95 % nebezpečného UV záření. Jsou antistatické, což usnadňuje jejich údržbu. Díky tomu, že vlákna neobsahují bílkoviny, jsou oděvy přirozeně chráněny před napadením moly. Obsah kyslíku zase nedovoluje tvoření anaerobních bakterií a přítomnost oleje pomáhá tlumit kožní plísňová onemocnění. [13, 15, 25]

Potravinářství

Potraviny z konopí jsou ceněné jako zdroj kvalitních bílkovin a pro svůj vyvážený poměr nenasycených mastných kyselin a vlákniny. Olej zvyšuje obranyschopnost organismu, pomáhá snižovat tělesnou hmotnost zrychlením látkové výměny a tlumí příznaky hyperaktivity. Konopný esenciální olej se získává z květů konopí a má nezaměnitelnou vůni. Vyrábí se destilací bez nežádoucího THC. Využívá se jak v lékařství a kosmetice tak i v potravinářském průmyslu pro přípravu čajů, nealkoholických nápojů, ale i piva dále pak např. při výrobě cukrovinek. [19, 21]

Papírenský průmysl

Konopný papír se běžně používal až do padesátých let 20. století a jeho produkce představovala 70 – 90 % světové produkce papíru vůbec. Používal se hlavně na cenné dokumenty např. ústavy, bankovky, deklarace apod. I v současné době se konopí využívá jako zdroj vlákna pro výrobu papíru, kterou provozuje pouhých dvanáct papíren na světě.

Výroba konopného papíru má mnoho pozitiv. Díky mnohonásobně větší pevnosti konopného vlákna je možné konopný papír recyklovat vícekrát než běžný dřevitý papír, což je nedocenitelná vlastnost z pohledu potřeby zavádění nových technologií a obnovitelných zdrojů. [15, 20] Výroba papíru z konopí je mnohem šetrnější než ze dřeva. Tento výrobní proces používá pouze cca 20 % znečišťujících chemikálií obsahujících síru k narušení lepivého ligninu, který váže vlákna buničiny. Nepoužívá se silně znečišťující chlorové bělidlo, jako při výrobě papíru z dřevěné buničiny, jež je v bělícím procesu nahrazeno peroxidem vodíku. Abychom vyrobili buničinový papír, musí být veškerý lignin narušen. Konopná buničina obsahuje 4 % ligninu, zatímco stromy 18 ~ 30 %. Takto

konopí poskytuje 4x více buničiny s několikanásobně menším znečištěním životního prostředí. Navíc je konopný papír daleko trvanlivější a výroba neporovnatelně levnější a jednodušší. [13]

Chemický průmysl

V chemickém průmyslu dnes nalézá konopí uplatnění při výrobě mýdel, barev, laků, mazadel, mazacích olejů, brusných past a fermeži, ale i při výrobě tiskařských barev. Konopný olej je tak univerzální, že z něj lze produkovat plastické hmoty podobně jako z ropy. V praxi vykazuje vyšší pružnost a odolnost vůči tlaku oproti plastům syntetickým navíc jsou tyto materiály biologicky odbouratelné a šetrné k životnímu prostředí. Lze z nich vyrobit nepřeberné množství lisovaných výrobků, např. instalační materiály potřebné při stavbě domu, které se jinak běžně dělají z PVC, jako například potrubí a mnoho dalších materiálů. [15, 25]

Automobilový průmysl

Problém s recyklací autovraků je v poslední době velice aktuální, a proto jsou vlastnosti výrobků z konopného vlákna pro náhradu některých částí automobilů velmi vhodné. S touto myšlenkou přišel už Henry Ford ve 20. letech, který použil konopí pro výrobu interiéru i karosérie svého vozu. Výrobky z konopí mají totiž vynikající vlastnosti, jsou lehké a mají výborné mechanické vlastnosti. Mohou být využity v brzdových a spojkových obloženích. Dále k výrobě laminátů pro karosérie, potahů, palubních desek, výplní dveří a dalších částí vozů. Již běžně je dnes využívají automobilky Mercedes-Benz, BMW a Ford. [15]

Energetika

Odpad průmyslového zpracování konopných stonků – pazdeří je výhodnou surovinou pro výrobu briket nebo pelet. Výhřevnost konopí dosahuje až 18 MJ/kg a je tedy v průměru o 20 % vyšší než u běžného hnědého uhlí. Hoření je čistší než u fosilních paliv. Při spalování hnědého uhlí vzniká až 18 % popela oproti 1 – 4 % popela ze spálené biomasy. Účinnost spalování dosahuje u moderních kotlů spalujících biomasu až 89 %. Pazdeří může byt používáno i v procesu pyrolytické destilace tj. zplynování. [21, 23]

Léčiva a kosmetika

Četné výzkumy prokázaly, že konopný olej působí díky vysokému obsahu nenasycených mastných kyselin, hydratačním a antibakteriálním vlastnostem na pokožku a vlasy lépe než ostatní běžně dostupné rostlinné oleje jako je olivový, avokádový nebo

mandlový. Dnes je konopný olej základní surovinou při výrobě mýdel, krémů, šamponů, sprchových gelů, balzámů na rty, vůní do koupelí a léčivých mastí. [19, 21]

2.3.8.2. STAVEBNÍ VYUŽITÍ

2.3.8.2.1. KONOPNÉ TERMOIZOLAČNÍ MATERIÁLY

Tepelné izolace z konopného vlákna

Konopné vlákno se vzhledem ke svým fyzikálním a mechanickým vlastnostem velmi dobře hodí pro výrobu tepelně-izolačních vláknitých desek. Tyto desky se vyrábějí na speciální výrobní lince, kde je konopné vlákno kráceno na požadovanou délku a potom následně smícháno s cca 15% přídavkem polyesterových vláken a dalších příměsí, především soli kyseliny borité, které mají zaručit požární odolnost a odolnost vůči biologickému napadení. Přídavek polyesterových vláken dává konopným izolačním deskám požadovanou pružnost a stabilitu. Konopné desky se lisují za tepla na požadovanou objemovou hmotnost, která se většinou pohybuje v rozmezí od 30 do 100 $kg.m^{-3}$.

Součinitel tepelné vodivosti desek z konopných vláken se pohybuje v rozmezí hodnot okolo 0,040 $W.m^{-1}K^{-1}$ v závislosti na objemové hmotnosti. Obecně platí, že hodnota součinitele tepelné vodivosti klesá spolu se vzrůstající objemovou hmotností materiálu (dochází k omezení přenosu tepla vlivem proudění vzduchu v pórové struktuře materiálu). Vláknité konopné desky jsou velmi dobře propustné pro vodní páru. Faktor difuzního odporu konopných desek se pohybuje v rozmezí 2–6 v závislosti na objemové hmotnosti materiálu a jeho vlhkostním obsahu. Schopnost materiálu absorbovat vzdušnou vlhkost přispívá k udržení optimální hladiny relativní vlhkosti v interiéru stavebních konstrukcí (pozitivní účinek na lidské zdraví). Požární odolnost izolačních desek je většinou zvýšena přídavkem solí, přičemž reakce těchto izolačních desek na oheň je nejčastěji klasifikována třídou E. Tepelně-izolační desky vykazují také velmi dobré akustické vlastnosti. Vysoká hodnota zvukové pohltivosti je dána zvýšenou pórovitostí konopného vlákna oproti např. vláknu skleněnému nebo minerálnímu.

Tepelně-izolační desky je možné aplikovat v exteriéru i interiéru stavebních konstrukcí. Desky se nejčastěji osazují do lehkých ocelových nebo dřevěných rámů nebo je možné je při vyšší objemové hmotnosti aplikovat přímo na povrch stavební konstrukce (ETICS). [27, 30, 31]



Obr 13: *Konopné termoizolační rohože. [26]*

Tepelné izolace z konopného pazdeří

Pazdeří vzniká jako vedlejší produkt při získávání vlákna ze stonku konopí. Svojí povahou je velmi podobné dřevěným pilinám a hoblinám, proto je i využití pazdeří ve stavebnictví velmi podobné využití dřevěných pilin a hoblin. Částice pazdeří lze využít například do směsí, v nichž jsou využity jako plnivo, a pojí se klasickými anorganickými pojivy – cementem a vápnem. Nicméně vzhledem ke skutečnosti, že pazdeří obsahuje vysoký podíl ligninu, který zpomaluje tvrdnutí cementu, využívají se často také alkalicky aktivovaná pojiva, jako je například vysokopecní struska aktivovaná vodním sklem. Samotné pazdeří se před použitím krátí na požadovanou délku a dále se čistí od velmi jemných podílů, prachových částic a různých dalších nečistot. Ze zavlhlé směsi se lisováním a vibrolisováním vyrábí izolační desky.

Součinitel tepelné vodivosti desek z konopného pazdeří se pohybuje v rozmezí hodnot 0,05 – 0,15 $W.m^{-1}K^{-1}$ v závislosti na objemové hmotnosti, která se pohybuje v rozmezí 250 – 500 $kg.m^{-3}$. V případě desek z pazdeří se tepelná vodivost materiálu spolu s objemovou hmotností zvyšuje. [31]

Vzhledem k přídavku anorganického pojiva jsou desky z pazdeří odolné vůči biologickému napadení. Co se týče vlhkosti, lze desky z pazdeří označit jako citlivější na prostředí se zvýšenou relativní vlhkostí vzduchu. Jejich výhodu lze vidět především při použití v interiérech objektů, kde fungují jako vlhkostní zásobník v zimním období. V období, kdy je relativní vlhkost zvýšená, dokážou tyto materiály přebytečnou vlhkost absorbovat, a naopak v době, kdy je vnitřní relativní vlhkost nízká, umějí absorbovanou

vlhkost zpětně uvolnit a relativní vlhkost prostředí tak zvýšit. Faktor difuzního odporu desek z pazdeří se pohybuje v rozmezí 3–8 v závislosti na objemové hmotnosti.

Desky z pazdeří lze podobně jako desky z konopného vlákna použít pro vnější i vnitřní zateplení. Vzhledem ke skutečnosti, že tyto desky vykazují oproti deskám z konopného vlákna lepší mechanické vlastnosti, dají se tyto výrobky velmi dobře použít při kontaktním zateplení.

Příkladem takových desek jsou výrobky francouzské firmy HESTIA, která vyrábí tvarovky o rozměrech 30 x 70 x 10 cm. Hrany desek jsou profilovány na pero a drážku, což výrazně usnadňuje jejich montáž. K povrchovým úpravám je možno použít běžných omítek. [26, 30, 32]



Obr 14: *Konopné termoizolační desky HESTIA. [32]*

Konopná podlahová izolace - MEHABIT

MEHABIT je vysoce odolná izolace. Tento materiál vyrábí německá společnosti MEHA, jenž se zabývá výrobou izolačních materiálu z obnovitelných zdrojů. Jedná se o směs konopného pazdeří, které je impregnováno vrstvou přírodního asfaltu.

Impregnace konopí asfaltem plní dvě základní funkce. Jednak chrání konopí před vlhkostními vlivy a pod tlakem umožňuje jednotlivým kusům obaleného pazdeří do sebe zaklesnout a vytvoří tak dobře izolující stabilní desku.

Výhodou tohoto materiálu je schopnost vytvořit bezespárovou izolační vrstvu, která odolává vysokým dynamickým a smykovým namáháním. Dalším kladem je nízká objemová hmotnost, což při aplikaci má jen velmi malý vliv na statiku konstrukce. Součinitel tepelné vodivosti takto vytvořených vrstev se pohybuje okolo 0,060 $W.m^{-1}K^{-1}$ v závislosti na objemové hmotnosti, která se pohybuje kolem 150 $kg.m^{-3}$.

Aplikace této izolační vrstvy je možná do jakýchkoliv konstrukcí. Lze jí použít do konstrukcí obytných, průmyslových či sportovních objektů. Doporučená montážní výška izolační vrstvy je od 10 do 200 mm. Běžně se dodává pytlovaná o objemu 100 litrů.

Směs lze aplikovat na různé druhy podkladů. Na betonové či dřevěné podlahy. Postup při aplikaci je následující. Napytlovaná směs se rovnoměrně rozprostře v požadované výšce na připravený podklad. Buď volně na podklad, nebo mezi připravené latě, které slouží jako rošt pro podlahový záklop. Potom se vrstva pečlivě zhutní dusadly, aby byla kompaktní a vyplnila všechny místa podkladu. Instalační vedení, které vede skrze podlahu, jako například topení či elektřina, není potřeba zvlášť dále fixovat. Na tuto vrstvu se poté natáhne fólie nebo papírová lepenka (z recyklovaného konopného papíru). Tím zabráníme pronikání hurd z vrchních vrstev násypu. Jako další vrstvu pokládáme roznášecí desky (OSB, dřevotřískové desky atd.). Posledním krokem je položení finální vrstvy podlahy. Tyto vrstvy mohou tvořit například plovoucí podlahy, parkety, koberce, linoleum, korek apod. [33]



Obr 15: *Izolační hmota MEHABIT. [33]*

Konopné tepelně-izolační zdící tvarovky

Další možné využití pazdeří je pro výrobu stěnových tvarových dílců s vloženou tepelně-izolační vrstvou. Tato technologie výroby je zatím jen ve stádiu výzkumu a mohla by být výbornou náhradou za cementodřevěné již běžně používané dílce.

Jedná se o tvárnice určené pro suché zdění, které jsou vyrobeny z odpadních částí technického konopí, silikátového pojiva (cementu) a vody. Takto vzniklá směs se v ocelové formě vibrolisu tvaruje do dutinové tvárnice a po vyzrání se její povrch frézuje na přesný tvar. Následně je do jejich dutin aplikována tepelně izolační vrstva z EPS. Vzhledem ke skutečnosti, že konopná izolační hmota vykazuje až o 60 % lepší tepelně izolační vlastnosti oproti dřevocementu srovnatelných mechanických vlastností, dochází při použití konopí k eliminaci tepelných mostů ve zdivu, které tvoří žebra a stěny tvarovek. Při své velikosti je lehká, mrazuvzdorná a odolná proti ohni. Stavební stěnové díly jsou velmi šetrné k životnímu prostředí, a to jak při výrobě, tak při samotném stavění. Stavební materiál potřebný pro hrubou stavbu zdí se omezí pouze na tvárnice, beton a malé množství výztuže, což je velice dobré pro rychlý a jednoduchý systém výstavby.

Tvarovky slouží jako ztracené bednění pro výplňový beton a jako nosič vložené tepelné izolace a omítek. Zdící tvárnice jsou použitelné pro výstavbu jakéhokoliv stavebního objektu, od rodinných domů přes nízkoenergetické bytové domy, průmyslové stavby a stavby občanské vybavenosti na vnitřní, vnější stěny i stropní tvarovky. Velké uplatnění by mohly mít při tvorbě protihlukových barier u silničních a železničních staveb. [34]



Obr 16: *Konopná termoizolační zdící tvarovka [34].*

2.3.8.2.2. KONOPNÉ STAVEBNÍ BLOKY

Jílovo – konopné stavební kameny

Již delší dobu je v zahraničí i u nás prověřována možnost využití výrobků z nepálené hlíny v moderním stavitelství. V historii měly výrobky na této bázi tzv. „vepřovice“ širokou uplatnitelnost při stavbě různých typů domů, hospodářských staveb a chlévů.

V současnosti je již průmyslově vyráběna řada výrobků pro různé aplikace. Jsou to např. stabilizované prvky (cihly, tvarovky) pro zdění svislých nosných i výplňových konstrukcí. Všechny průmyslové výrobky na bázi nepálené hlíny mají deklarovány základní fyzikálně-mechanické vlastnosti a je možné s nimi pracovat jako s jakýmkoliv jiným stavebním materiálem. [29] Ovšem při jejich použití je nutné počítat s jistým omezením na základě jejich specifických vlastností především nízkých pevností v tlaku, které obvykle umožní využít tyto materiály pro jednopodlažní stavby nebo jako nenosný výplňový materiál u vícepodlažních budov.

Jedna německá firma přišla na trh s výrobky z jílu a konopného pazdeří. Jílovo - konopné cihly jsou vyráběny ručně, postaru, a tak vzniká výborný ekologický stavební materiál. Použití cihel je vhodné pro odbornou sanaci při tvorbě vnitřních zdí a následného tepelného utěsnění. Používají se pro zlepšení tepelné izolace vnější konstrukce zdiva, k obnovení klenutí a jako vnitřní izolace přímo ve spojení zdí nebo při výstavbě vícevrstvé zdi. Její použití pro nosné konstrukce není vyloučené.

Vzhledem k izolačním vlastnostem konopí nepotřebuje zdivo žádnou další izolační vrstvu a navíc je možné pokrýt ho omítkou bez mezivrstvy. [6, 15]

Jílovo-konopný stavební kámen je složen ze 75 % jílu a 25 % konopného pazdeří. Výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti jsou: Objemová hmotnost: 600-800 $kg.m^{-3}$, součinitel tepelné vodivosti: 0,17 $W.m^{-1}K^{-1}$ a pevnost v tlaku 0,6 $N.mm^{-2}$. [6]



Obr 17: *Jílovo – konopné stavební kameny. [15]*

CHANVRIBLOC

Chanvriblock jsou výrobky francouzské firmy CHANVRIBLOC. Tyto izolační bloky jsou vyrobené z konopného pazdeří, hydraulického vápna a vody. Namíchaná směs se za studena lisuje a následně suší za běžných klimatických podmínek, což výrazně šetří

spotřebu energie při výrobě. Bloky se vyrábí v rozměrech 100, 150, 200, 300 x 300 x 600 mm. [35]

Bloky mají příznivé vlastnosti. Jsou dobrým izolantem, což se odráží ve spotřebě tepla pro vytápění. Tepelný odpor činí při 20 cm tloušťce 2,5 m^2K/W. Objemová hmotnost se pohybuje kolem 300 $kg.m^{-3}$. Stavby si udržují v průběhu ročních období ideální tepelný komfort. Ten zaručuje přirozené a zdravé klima a taktéž zabraňují tvorbě plísní. Jsou odolné vůči mrazu, hmyzu i hlodavcům.[35]

Oblast aplikace je rozmanitá. Stěny zděné z těchto bloků umožňují izolace v tloušťce stěny, aniž by bylo nutné přidat další izolační vrstvy. Dají se z nich stavět stěny, které plní funkci výplňového zdiva dřevěných, ocelových či betonových skeletů občanské nebo průmyslové výstavby. Izolační stěny v exteriérech a interiérech, příčky nebo akustické stěny. [35]



Obr 18: *Stavba rodinného domu při použití chanvriblocu. [35]*



Obr 19: *Chanvribloc B15. [35]*

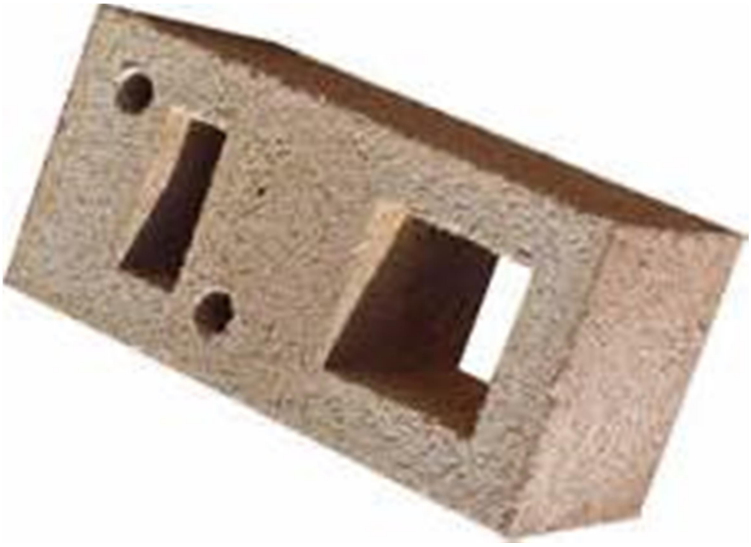
Vyzdívání těchto stěn se provádí klasickým způsoben na vápennou maltu, která se aplikuje speciální zubatou stěrkou. Bloky jsou poměrně lehké, což umožňuje dobrou manipulaci při stavbě. Délkové úpravy bloku lze dělat manuálně či elektrickou pilou. Interiérové a exteriérové úpravy povrchů pak běžnými omítkovými systémy nebo hliněnými omítkami. [35]

EASYCHANVRE

Easychanvre je zajímavé spojení konopných děrovaných tvarovek s dřevěnou rámovou konstrukcí. Tvárnice jsou vyrobeny z 51 % vzdušného vápna, 11 % hydraulického vápna a 38 % konopného pazdeří. Namíchaná směs se zastudena lisuje a následně 3 týdny suší v přirozeném klimatickém prostředí.

Výrobní program zahrnuje škálu produktů od podlahy až po strop. Výhodou tohoto sytému je jeho variabilnost. Otvory v tvarovkách slouží jako propojení systému skeletu, ale také pro vedení elektřiny či vodovodního potrubí. Rozměry tvarovek jsou 300 x 300 x 600 mm. Jejich nízká objemová hmotnost, která se pohybuje kolem 350 $kg.m^{-3}$ zajišťuje vysokou izolační schopnost a snadnou manipulaci při výstavbě. [36]

Celý konstrukční systém tedy spočívá ve vytvoření skeletu z dřevěných hranolů a latí, na který se pak pouze zjednodušeně tvarovky nasouvají a dozdívají vápennou maltou. Vznikne tak velice odolná stabilní konstrukce s výbornými tepelně izolačními, akustickými a dalšími vlastnostmi pro ideální bydlení. [36]



Obr 20: *Easychanvrebloc. [36]*

2.3.8.2.3. DALŠÍ VÝROBKY

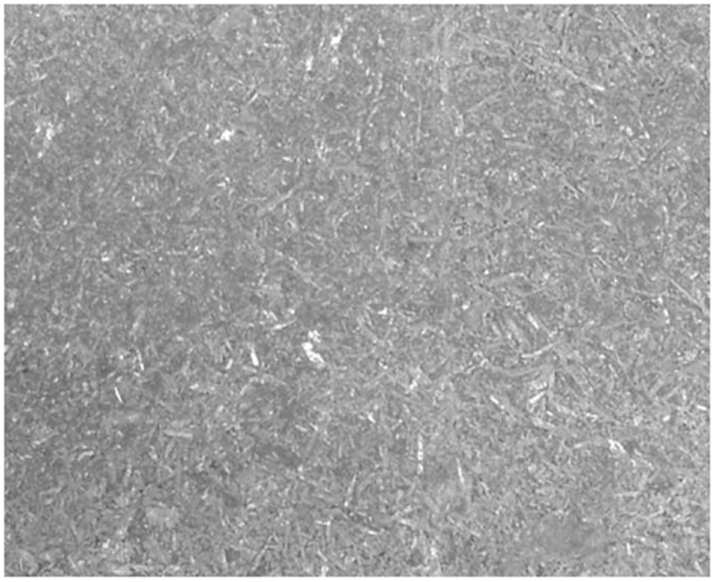
Cementokonopné desky

Velice zajímavou alternativou, která je taktéž zatím ve stádiu výzkumu, je použití konopí pro výrobu cementokonopných desek. Běžně se dnes vyrábějí cementotřískové desky CETRIS ze směsi dřevěných třísek, cementu a dalších příměsí a přísad na úpravu konečných vlastností.

Cementotřískové desky jsou stavební prvky, které slučují výhodné vlastnosti dřeva a cementu, a právě to je určuje k všestrannému stavebnímu použití. Tyto desky se uplatňují všude tam, kde se využijí jejich výjimečné vlastnosti a to jak v interiéru, tak i v exteriéru, především jako podlahové a fasádní systémy, stěnové a střešní systémy, ztracené bednění, podhledy, protipožární systémy a další. Mezi hlavní přednosti desek patří jejich pevnost, pružnost, snadná opracovatelnost, nízká hmotnost, hygienická nezávadnost, ekologičnost, možnost povrchových úprav a jiné výhodné vlastnosti.

Konopí by tedy mohlo sloužit jako plnohodnotná nebo i částečná náhrada dřeva. Desky s použitím konopí si mohou v blízké době najít na trhu své místo. Vzhledem k nízké ceně a menší náročnosti zpracování, při které není na konopí třeba tak mohutná mechanizace jako na dřevo. Snadněji se také suší, třískuje a hlavně je rychleji obnovitelné.

Z prováděného výzkumu a zkoušení tohoto materiálu vyplývá, že cementokonopné desky dosahují v porovnání s cementotřískovými deskami srovnatelných pevnostních charakteristik. [37]



Obr 21: *Povrch cementokonopné desky. [37]*

Omítkové systémy

Konopné pazdeří je vhodnou složkou také do omítkových systémů jak pro exteriéry tak interiéry. Omítky jsou složeny z konopného pazdeří, vápna a křemičitého písku. Mimo dekorativního charakteru plní funkci tepelně-izolační i akustickou. Jsou ideální pro rekonstrukce starých objektů, ale i novostaveb.

Způsob aplikace je buď strojně, kde se využívá podobného systému stříkání vrstev omítky jako u hrázděného zdiva, nebo klasický ruční způsob jako u obyčejných omítek. [38]

Konopný filc

Konopný filc se nejvíce používá jako zvuková izolace do plovoucích podlah, mezi stěny příček nebo jako izolace pod střešní krytinu. Vyrábí se v tloušťkách od 3 do 10 mm ve formě rolí nebo pásků. Konopný filc působí prodyšně. Jeho schopnost vázat na sebe vlhkost z okolního vzduchu a znovu ji odpařovat při suchém vzduchu, zlepšuje klima bydlení a chrání dřevěné podlahy před výkyvy vlhkosti.

Vypichované konopné rouno slouží jako podklad pod plovoucí parketové a laminátové podlahy. Konopné filcové pásy se využívají jako oddělovací a dělící pásy v jednodušších příčkových stavbách, při pokládání různých dřevěných vrstev na sebe a u dřevěných podlah. [26]



Obr 22: *Role konopného filcu. [26]*

Konopná koudel

Slovem koudel se označují odpadová vlákna oddělená při sekundárním zpracování. Konopnou koudelí se vyplňují dutiny např. mezi trámy, zdmi nebo dutiny u oken a dveří. Osvědčila se také u střešních oken v oblasti utěsnění okenního rámu, aby se zamezilo škodám způsobeným kondenzací vody. [26]

3. VÝPLŇOVÉ MATERIÁLY

Pod pojmem výplňový materiál si lze představit celou řadu výrobků na stavebním trhu. Může se jednat o jakýkoliv materiál, kterým se vyplňuje rámová konstrukce u obvodového či vnitřního zdiva, stropní nebo i střešní konstrukce. Může se jednat o deskový materiál na různé surovinové bázi nebo můžeme hovořit např. i o lehkém betonu bez samonosné funkce. Rámová konstrukce může být výplňovým materiálem zcela přikryta nebo může být přiznána jako tomu je u většiny staveb s hrázděným zdivem, na které se zaměříme blíže, jelikož aplikace rychle obnovitelné suroviny do tohoto typu materiálu se jeví jako velice perspektivní.

3.1. HRÁZDĚNÉ ZDIVO

Hlavním znakem řady hrázděných staveb je viditelná dřevěná nosná kostra stavby a výplň mezi dřevěnou konstrukcí tvoří cihelná vyzdívka, hlína, směs hlíny a slámy a plev, konopného pazdeří či stonků nebo i prasečích chlupů apod. Hrázděné stavby jsou velice rozšířeny. Četné hrázděné stavby stojí ve východní a střední Evropě, ale také v Anglii, severním Německu, Dánsku, Nizozemsku a především Francii. U severských staveb je hrázděná soustava vytvořena velice pravidelně a tvoří většinou poměrně hustou síť obdélníků a čtverců, včetně oken jako integrované části konstrukčního systému. Také ve Francii vykazují hrázděné stavby podobně důsledně vytvořenou konstrukční strukturu, ale forma projevu a proporce jsou změněné. Ve Francii je především zdůrazněná konstrukční logika, dekorační elementy slouží ke zdůraznění celé struktury.

Hrázděné stavby se vyvinuly zvláště v regionech, v nichž dřevo nebylo k dispozici v takovém množství, jaké je potřebné například pro srubové stavby. Až od poloviny 19. století se stavěly hrázděné stavby, jejichž hlavní nosná konstrukce (a tedy i vyzdívka) zůstala viditelná. Později se hrázděné stavby celé omítaly, aby napodobovaly masivní stavby z kamene a zdiva. Věřilo se, že se tak domy stanou bezpečnější proti požáru. [39, 40]



Obr 23: *Hrázděná stavba [42]*

3.1.1. HRÁZDĚNÉ STAVBY V SOUČASNÉ DOBĚ

Klasické hrázděné stavby s nosnou konstrukcí viditelnou z venkovní strany se dnes u novostaveb téměř nepoužívají. Výztužná vzpěrná konstrukce hrázděných staveb byla nahrazena vývojem nových materiálů na bázi dřeva a deskových materiálů, tak i výrobními metodami s ekonomicky i konstrukčně zajímavými alternativami. Tesařství ovšem stále zná hrázděné stavby se vzpěrami a příčkami. Pro různá použití např. pro zemědělství nebo pro jednoduché jednopodlažní až dvojpodlažní účelové stavby jsou dřevěné hrázděné stavby stále hospodárné, ovšem s obloženou nosnou konstrukcí.

Způsob stavby hrázděním je náročnější na spotřebu materiálu než běžné rámové dřevostavby. Ze statických důvodů je třeba použít masivnější profily, což se pozitivně promítá do požární bezpečnosti objektu. Jednou z největších výhod tohoto systému je silný estetický výsledek. Hrázděná konstrukce nenapodobitelným způsobem oživí všechny místnosti domu. Aby tomu tak skutečně bylo, je třeba dokonalé řemeslné zpracování všech detailů. Jen málokterý tesař dokáže takovou stavbu v nejvyšší kvalitě realizovat, což přináší zvýšení pořizovacích nákladů. [42]

Další vlastnosti hrázděných staveb jsou obdobné jako u ostatních dřevostaveb. Nízká tepelná akumulace, nižší zvuková izolace, ale na druhou stranu rychlá výstavba bez

mokrých procesů a těžké stavební techniky, čistota práce a minimalizace úklidových prací. Materiál použitý pro stavbu je čistě přírodní a plně recyklovatelný.

Charakteristické znaky hrázděných staveb

- nosná kostra může být oboustranně obložena, podle tradičního vzoru však zůstává zvenku viditelná;
- patrová výstavba;
- čisté spoje dřeva s čepy, zapuštěními a plátováním;
- nosné prvky vykazují větší a spíše čtvercové průřezy;
- jednoduchá montáž. [39, 40]

3.1.2. HRÁZDĚNÉ STAVBY S VYUŽITÍM KONOPNÉHO PAZDEŘÍ

V současnosti se stavby hrázděného typu budují především ve Francii, kde bylo postaveno více než 700 domů. Stavba domu z konopí se zahajuje klasickými základy z betonu, na něž se postaví dřevěná rámová kostra budoucího domu, ve kterém jsou rozvedeny veškeré instalace elektřiny, vody atd. Několik pilotních programů na totožném principu probíhá po celém světě. Příkladem může být i anglický projekt „The renewable house“, který ve větší míře financuje anglické ministerstvo energetiky a změny klimatu DECC, aby mohlo demonstrovat, jak výhodné a především využitelné přírodní zdroje pro výstavbu takovýchto domů jsou.[42]

Systém je postaven na smíchání pazdeří Chanvribat, které je odpadem vzniklým při zpracování konopí na vlákno, a speciálního vápenného pojiva Tradical® PF 70 (Tradical 70) je průmyslově připravené pojivo složené ze vzdušného bílého hašeného vápna (CL 90, EN 459, 75 %), hydraulických pojiv (15 %) a pucolánů (10 %). Receptura pro průmyslovou přípravu pojiva Tradical® PF 70 byla vyvinuta na základě podrobných rozborů vzorků omítek a zdících malt, odebíraných specialisty spol. Strasservil (Lhoist – BCB Balthazard & Cotte Batiment, Francie) z historických objektů na území celé Evropy a ve spolupráci s odborníky památkové péče Francouzské republiky na konci 60. let min. století. Na základě těchto poznatků byla vyvinuta speciální pojiva pro přípravu vápenných malt, v největší možné míře se blížících svými vlastnostmi maltám historickým. Výrobcem pojiva Tradical® PF 70 je spol. Lhoist – BCB Balthazard & Cotte Batiment, Francie, EU, pojivo je vyráběno v souladu s francouzskými národními normami. [38]

Aplikaci této směsi je možno provádět dvěma způsoby, buďto za sucha nebo mokra. Při suchém způsobu, který je sice technologicky náročnější, ale méně pracný, složky se nasypou do míchacího zařízení, kde dojde ke smíchání složek, které se následně pneumaticky pomocí hadice dopravují na určené místo. Těsně před vyústěním se připouští voda a vzniklá směs se do konstrukce stříká, konstrukce je z vnitřní strany zabedněna až do požadované tloušťky. Přebytečný materiál se stáhne latí jako při klasickém omítání. Nastříkaná hmota dosáhne do 2 hodin tuhosti, která dovolí odstranit bednění.

Mokrý způsob, který je manuálně náročnější, spočívá ve smísení složek v jednoduchých gravitačních nebo bubnových míchačkách. Směs pojiva a pazdeří musí být dokonale promíchána. Následně se dávkuje voda a směs se promíchává do dokonalého homogenního stavu. Směs se pak hutní po vrstvách cca 30 cm do rámové konstrukce, která je z obou stan opatřena bedněním. Po 2 hodinách je směs zatuhlá a můžeme jí odbednit a pokračovat ve vyšším segmentu.

Směsi s nižším dávkováním pojiva nebo i bez pojiva se aplikují do podlahových nebo stropních konstrukcí, kde slouží jako izolační vrstva.

Vzniklé stěny jsou bez jakýchkoliv spár, jsou pevné, s dobrými izolačními vlastnostmi. Omítají se buď klasickou, hliněnou omítkou nebo se směsí konopného pazdeří. [1, 15, 40]

3.1.2.1. TRADICAL® HEMP LIME PRODUKTY

Největším výrobcem stavebních produktů z technického konopí je firma BCB pocházející z Francie. Na trhu s přírodními materiály se nachází již dlouhou řádku let, vyrábí především pojiva pro rekonstrukce historických hrázděných objektů.

Tradical ® Hemp, produkty z konopí: kombinace konopných vláken a vzdušného vápence vytváří novou generaci vysoce výkonných a stálých konstrukčních materiálů.

Tradical ® HF je ztužující plnivo poskytující dobré tepelné a akustické vlastnosti. izolace pro konopné produkty.

Tradical® HB je speciálně navržené, patentované vzdušné pojivo na bázi vápence využívané k výrobě hempcrete produktů vysoké kvality a trvanlivosti.

Tradical® HB musí být smíšený s Tradical® HF v doporučených poměrech (v závislosti na aplikaci). Není zapotřebí měření dávek komponent nebo dalších přísad. Poměr mísení konopí a pojiva je určován podle způsobu užití v konstrukci (zdi, střechy, podlaha) a od toho se odvíjejících potřebných tepelně-technických a mechanických parametrů.

Výplně zdí

Objemová hmotnost 330 $kg.m^{-3}$

Tepelná vodivost λ=0.09 $W.m^{-1}.K^{-1}$

Pevnost po 90 dnech 0.9 MPa

Podlahové výplně

Objemová hmotnost 375 $kg.m^{-3}$

Tepelná vodivost λ=0.11 $W.m^{-1}.K^{-1}$

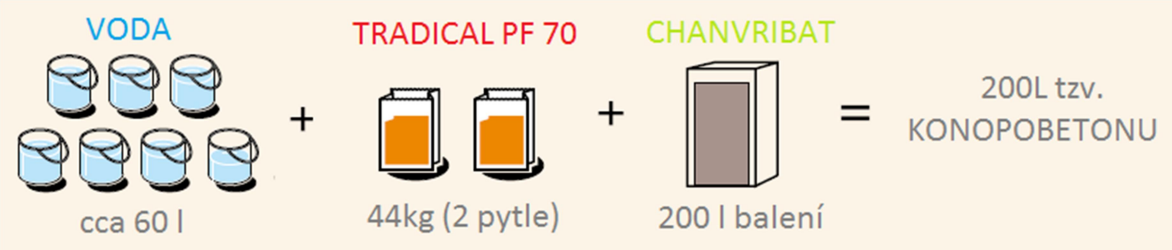
Pevnost po 90 dnech 1,1 MPa [38, 41, 43]

CHANVRIBAT + TRADICAL PF70

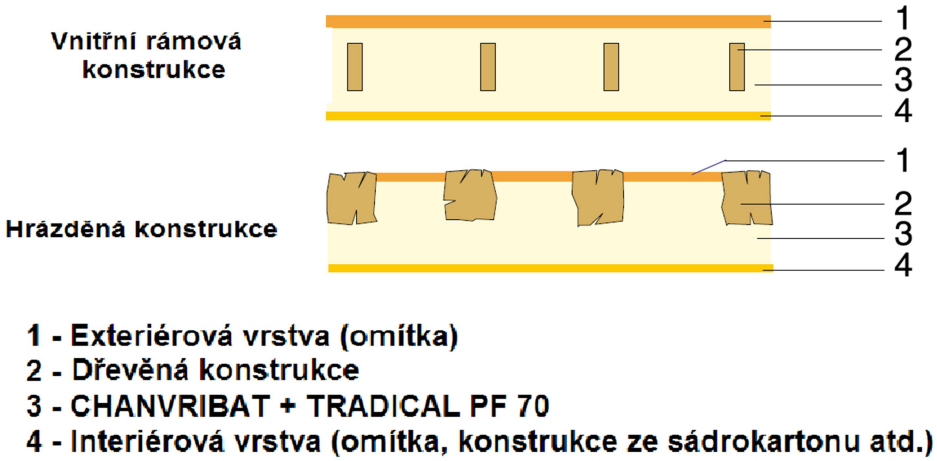
Chanvribat (konopné pazdeří) ve spojení s Tradicalem PF70 umožňuje připravit: lehké izolační betony nebo malty vysoké kvality pro hrázděné stavby, které umožňují zhotovení výplní a izolací zdí s dřevěným skeletem. Mohou být rovněž použity pro výstavbu zdí se skeletem (nosnou zdí) zapuštěným do zdiva nebo zdí, u nichž zůstává dřevěná struktura zvenku viditelná. Jsou tedy obzvlášť vhodné pro renovaci domů z hrázděného zdiva jako náhrada za původní lepenice nebo u i novostaveb. Navíc díky jejich propustnosti vodních par je umožněno trvalé vysychání dřevěných dílů konstrukce. Ve všech případech jsou schopny zajistit dostatečnou izolaci bez nutnosti další vyzdívky. Dále je možno připravit v různém dávkování hmoty jako:

- omítky izolačního charakteru, které dodávají zdivu akustickou korekci a dovolují dosáhnout rozmanitého dekoračního vzhledu omítek, navíc způsobují zlepšení týkající se povrchového tepla a tedy komfortu bydlení;
- lehké izolační betony vhodné pro aplikaci do podlahových desek;
- lehké izolační maltové směsi pro střešní izolace. [38, 41, 43]

Na obrázku 24 je znázorněna nejběžněji používaná skladba jednotlivých položek směsi.



Obr 24: *Dávkování směsi pro hrázděná zdiva [38, 41]*



Obr 25: *Schéma skladby konstrukce [38, 41]*



Obr 26: *Pracovníci při aplikaci výplňové hmoty [44]*

3.1.2.2. HEMPCRETE

Hempcrete je ekologicky šetrná alternativa betonu. Skládá se ze směsi konopí, vápna, písku, sádry a cementu, může být použit podobným způsobem jako beton. Je pružnější, méně lámavý a odolný proti hnití či škůdcům. [21, 44]

Výrobou a distribucí Hempcrete se zabývá celá řada výrobců především ve Francii a Holandsku, kde je nejvíce objektů postavených právě z tohoto materiálu. Také je tam

nejvíce pěstitelů konopí v Evropě. V naší republice se výrobou konopného betonu na různé pojivové bázi zabývá jen několik málo firem, jedná se spíše o zapálené jedince, kteří chtějí opět zavádět ekologičtější průběh stavby a použití přírodních materiálů do stavebního odvětví. [45, 46, 47] Vlastnosti těchto betonů jsou značně variabilní dle druhu a množství použitého pojiva.

4. POJIVOVÁ SLOŽKA VÝPLŇOVÝCH HMOT

Termínem pojiva označujeme látky, které lze upravit do tekuté formy a které pak z této formy přechází relativně snadno do formy pevné. V důsledku tohoto procesu mají schopnost spojit nesoudržná zrna nebo kusy jiných látek v soudržnou hmotu.

V průběhu zpevňovacího procesu rozeznáváme dvě stádia a to tuhnutí a tvrdnutí. Ve fázi tuhnutí ztrácí tekutá nebo kašovitá forma svou původní zpracovatelnost a postupně nabývá charakteru pevné látky. V následující fázi tvrdnutí získává takto vzniklá pevná látka vyšší pevnost, která je potřebná při praktickém využití pojiva ve stavební funkci.
Pojiva založená na anorganické bázi ve stavebnictví převažují. Podle stálosti ve vodném prostředí se dělí na pojiva vzdušná a pojiva hydraulická. Základem většiny anorganických pojiv jsou práškovité látky minerálního původu, které se do kašovité podoby převádějí smísením s vodou. Jejich hlavní složka se získává tepelným zpracováním vhodné přírodní horniny nebo minerální směsi. S ohledem na tradiční použití k přípravě malt se někdy označují jako maltoviny. [2]

4.1.CEMENT

Je hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachová svoji pevnost a stálost také ve vodě. Cement podle ČSN EN 197-1 [81], označován jako cement CEM, musí při odpovídajícím dávkování a smíchání s kamenivem a vodou umožnit výrobu betonu nebo malty zachovávající po dostatečnou dobu vhodnou zpracovatelnost. Po předepsané době musí mít předepsanou pevnost a dlouhodobou objemovou stálost. [81]

Hydraulické tvrdnutí cementu CEM probíhá hlavně v důsledku hydratace vápenatých křemičitanů. Na hydrataci se v průběhu tvrdnutí mohou podílet i jiné chemické sloučeniny např. hlinitany. Celkový obsah aktivního oxidu vápenatého (CaO) a aktivního oxidu křemičitého (SiO_2) musí být v cementu CEM nejméně 50 % hmotnosti, je-li obsah těchto oxidů stanoven podle ČSN EN 196-2 [82]

Portlandský slínek

Portlandský slínek se vyrábí pálením nejméně do slinutí přesně připravené surovinové směsi (surovinové moučky, těsta nebo kalu) obsahující prvky, obvykle vyjádřené jako oxidy CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 a malá množství jiných látek. Surovinová směs, těsto nebo kal musí být v důsledku jemného mletí a dobrého míchání homogenní.

Portlandský slínek je hydraulická látka, která musí sestávat nejméně ze dvou třetin hmotnosti z křemičitanů vápenatých ($3CaO.SiO_2$ a $2\ CaO.SiO_2$). Ve zbytku jsou pak obsaženy slínkové fáze obsahující hliník a železo a jiné sloučeniny. Hmotnostní podíl $(CaO) / (SiO_2)$ nesmí být menší než 2,0. Obsah oxidu hořečnatého (MgO) nesmí být větší než 5 % hmotnosti. [81]

4.1.1. SUROVINY PRO VÝROBU PORTLANDSKÉHO SLÍNKU

Suroviny používané pro výrobu slínku se mohou rozdělit do tří hlavních skupin:

Suroviny základní – tvoří největší část směsi, můžeme je rozdělit do dvou skupin:

- Vápenec: příliš čisté vápence nejsou vhodné (zhoršená reaktivita při výpalu) vhodné jsou měkké a dobře melitelné
- Zeminy: s obsahem SiO_2, Al_2O_3 (hlinitokřemičitany) a Fe_2O_3 (ale nemusí ho být dostatek), např. hlíny, jíly, břidlice

Nesmí obsahovat škodliviny *MgO* (nesmí být víc jak 5 % ve vzniklém slinku), *sírany* (nesmí být víc jak 2 % v surovině a 3 % ve slinku), *fosfáty* (P_2O_5 do 0,15 % v surovině dobře, pokud víc je retardérem), *alkálie* (působí jako tavidla, přispívají ke zhoršení výpalu).

Suroviny korigující (surovinový dodatek) – používají pro zvýšení obsahu některých oxidů, např. oxidu vápenatého (vysokoprocentní vápenec), oxidu železitého (železná ruda, kyzové výprašky), oxidu hlinitého (bauxit,…) nebo oxidu křemičitého (křemelina, Si-látka, spongilit, křemičitý písek,…).

Příměsi – jsou to suroviny přidávané jen v malém množství zlepšující průběh výpalu či kvalitu slinku, např. intenzifikátory (fluoridy, fosfáty, kyzové výpalky), mineralizátory (fluoridy, sádrovce) a legující (fosfáty). [48]

4.1.2. VÝPAL PORTLANDSKÉHO SLÍNKU

Reakce probíhající při výpalu surovinové směsi lze rozdělit podle významu na reakce hlavní a vedlejší. Reakce hlavní jsou ty, při kterých vznikají pouze důležité slinkové minerály. Při reakcích vedlejších ve slínku vznikají méně důležité nebo nežádoucí sloučeniny. Dochází k nim při obsahu nečistot v surovinách nebo při nesprávném postupu výroby slínku. Reakce hlavní probíhají v pěti stádiích, které se vzájemně překrývají. Jedná se o:

Předehřívací stádium: probíhá při teplotách 20 – 750°C. Do teploty 100°C odchází vlhkost ze suroviny, při teplotě 200°C odchází volně vázaná voda, poté do teploty 500°C

krystalická voda. Při 573°C nastává krystalizační přeměna nízkoteplotního β-křemene na vysokoteplotní α-křemen. Do teploty 750°C se tvoří C_2F a CA (substitucí) po této teplotě dochází k pozvolné kalcinaci.

Kalcinační stádium: probíhá do teploty 1200°C. V tomto stádiu dochází k masivnímu rozkladu $CaCO_3$. Tvoří se další slinkové minerály C_2F, CA, C_2S (adičně).

Stádium suchého slinování: teploty 1200 – 1300°C. Tady probíhají topochemické reakce, zrna se spojují nasucho, kromě alitu vzniká belit (C_2S), trikalciumaluminát a browmillerit (C_4AF).

Stádium taveninového slinování: teploty 1300 – 1450°C. Zde vzniká tavenina a všechny slinkové minerály především alit. (Vysrážení alitu probíhá ze reakce: $C_2S + CaO \rightarrow C_3S$)

Stádium chlazení: probíhá velmi intenzivně. Čím je chlazení rychlejší, tím lepší mají cementy vlastnosti (např. lepší pevnosti, rychlejší nárůsty pevností a snadnější mletí).

Výpal se provádí v šachtových nebo rotačních pecích. Šachtové pece můžeme rozdělit na kontinuální a periodické. Rotační pece jsou kontinuální krátké nebo dlouhé. Dále můžeme rozdělit výpal dle způsobu výroby na mokrý (do procesu jde kal, nevýhoda velká spotřeba tepla) nebo suchý (méně nákladný, menší spotřeba tepla) způsob. V současné době je výpal prováděn v mnoha různých pecních systémech. Každá cementárna má svůj vlastní způsob sestavení pecního uspořádání a používá jiný způsob předehřívání, pálení, chlazení a následné úpravy slínku. [2, 48]

4.1.3. DRUHY A VLASTNOSTI CEMENTU

Cement se vyrobí semletím portlandského slínku s regulátorem tuhnutí (CEM I) a případně s využitím dalších složek (CEM II až CEM V). Přehledné složení a znační takto vzniklých cementů je na obrázku 27.

Hlavní druhy	Označení 27 výrobků (druhy cementu pro obecné použití)		Složení (poměry složek podle hmotnosti)[a]															Doplňující složky
			Hlavní složky															
			Slinek		Vysokopecní struska	Křemičitý úlet	Pucolány		Popílky			Kalcinovaná břidlice	Vápenec					
							přírodní	přírodní kalcinované	křemičité	vápenaté								
			K		S	D[b]	P	Q	V	W		T	L		LL			
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100		-	-	-	-	-	-		-	-		-		0-5	
CEM II	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80-94		6-20	-	-	-	-	-		-	-		-		0-5	
		CEM II/B-S	65-79		21-35	-	-	-	-	-		-	-		-		0-5	
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90-94		-	6-10	-	-	-	-		-	-		-		0-5	
	Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80-94		-	-	6-20	-	-	-		-	-		-		0-5	
		CEM II/B-P	65-79		-	-	21-35	-	-	-		-	-		-		0-5	
		CEM II/A-Q	80-94		-	-	-	6-20	-	-		-	-		-		0-5	
		CEM II/B-Q	65-79		-	-	-	21-35	-	-		-	-		-		0-5	
	Portlandský poplikový cement	CEM II/A-V	80-94		-	-	-	-	6-20	-		-	-		-		0-5	
		CEM II/B-V	65-79		-	-	-	-	21-35	-		-	-		-		0-5	
		CEM II/A-W	80-94		-	-	-	-	-	6-20							0-5	
		CEM II/B-W	65-79		-	-	-	-	-	21-35		-	-		-		0-5	
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T	80-94		-	-	-	-	-	-		6-20	-		-		0-5	
		CEM II/B-T	65-79		-	-	-	-	-	-		21-35	-		-		0-5	
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	80-94		-	-	-	-	-	-		-	6-20		-		0-5	
		CEM II/B-L	65-79		-	-	-	-	-	-		-	21-35		-		0-5	
		CEM II/A-LL	80-94		-	-	-	-	-	-		-	-		6-20		0-5	
		CEM II/B-LL	65-79		-	-	-	-	-	-		-	-		21-35		0-5	
	Portlandský směsný cement[c]	CEM II/A-M	80-94	<--------					6-20		-------->						0-5	
		CEM II/B-M	65-79	<--------					21-35		-------->						0-5	
CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35-64		36-65	-	-	-	-	-		-	-		-		0-5	
		CEM III/B	20-34		66-80	-	-	-	-	-		-	-		-		0-5	
		CEM III/C	5-19		81-95	-	-	-	-	-		-	-		-		0-5	
CEM IV	Pucolánový cement[c]	CEM IV/A	65-89		-	<----------			11-35	---------->		-	-		-		0-5	
		CEM IV/B	45-64		-	<----------			36-55	---------->		-	-		-		0-5	
CEM V	Směsný cement[c]	CEM V/A	40-64		18-30	-	<----------		18-30	---------->		-	-		-		0-5	
		CEM V/B	20-38		31-50	-	<----------		31-50	---------->		-	-		-		0-5	

[a] Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek.
[b] Obsah křemičitého úletu je omezen do 10 %.
[c] Hlavní složky v portlandském směsném cementu CEM II/A-M a CEM II/B-M, v pucolánovém cementu CEM IV/A a CEM IV/B a ve směsném cementu CEM V/A a CEM V/B mimo slínku musí být deklarovány v označení cementu (viz příklad v kapitole 8).

Obr 27: *27 výrobků skupiny cementů pro obecné použití [81]*

Pro praktické užití cementů je nutné provádět stanovení vlastností cementů. Tyto zkoušky jsou stanoveny normovými předpisy. Základním stanovením vlastností cementů je chemický rozbor. Tento zahrnuje určení ztráty žíháním, obsah síranů, chloridů, alkálií a obsah kyselinou nerozložitelných podílů. Další zkoušky pak určují fyzikální a mechanické vlastnosti cementů.

a) fyzikální vlastnosti

Měrná hmotnost cementu (hustota) - závisí jak na způsobu výroby, tak na množství a měrné hmotnosti příměsí. U portlandských cementů se pohybují hodnoty od 3 100 do 3 200 $kg.m^{-3}$.

Objemová a sypná hmotnost - portlandský cement má objemovou hmotnost 3 050 ~ 3 150 kg.m^{-3}, pro výpočty se užívá hodnota 3 100 kg.m^{-3}. Sypná hmotnost volně loženého cementu je 900 ~ 1 300 kg.m^{-3}, pytlovaného nebo uloženého v silech 1 200 ~ 1 700 kg.m^{-3}. [50]

Počátek a doba tuhnutí - zjišťují se Vicatovým přístrojem, počátek je min. 45 až 75 minut podle druhu a třídy cementu, obvykle 3 až 5 hodin, doba tuhnutí max. 12 hodin, bývá 4 až 6 hodin. Doba tuhnutí se prodlužuje s rostoucím obsahem vody a zkracuje se zvýšením tepoty.

Objemová stálost - prokazuje se zkouškou podle Le Chateliera, cementová kaše se nechá 24h hydratovat a pak se podrobí 3 hodinovému vaření ve vodě. Rozdíl měřících tyčinek před a po vaření nesmí být větší než 10 mm, často bývá pouze 1 mm. Cementový kámen nesmí vykazovat žádné nepřiměřené objemové změny, trhliny a odštěpky.

Měrný povrch cementu - souvisí s velikostí částic (bývají od 1 do 250 μm). Čím větší měrný povrch cement má, tím rychleji a úplněji hydratuje, jeho výroba je však energeticky náročnější. Cementový kámen má větší smrštění a pro smáčení zrn je potřeba větší množství vody. U běžných cementů se měrný povrch pohybuje v mezi 270 – 350 m^2.kg^{-1}.

Hydratační teplo - je tepelným projevem hydratace, závisí na obsahu jednotlivých slinkových minerálů. Portlandské cementy uvolní za 28 dní teplo 330 - 550 kJ.kg^{-1}. [50]

b) mechanické vlastnosti

Normalizovaná pevnost - patří k nejdůležitějším vlastnostem zatvrdlé cementové malty. Je to pevnost v tlaku stanovená po 28 dnech hydratace.

Počáteční pevnost - je pevnost v tlaku stanovovaná po 2 nebo po 7 dnech.

Obě hodnoty musí vyhovovat požadavkům daným normou ČSN EN 197-1 [81]. Pevnost cementů je ovlivněná řadou faktorů jako například mineralogické složení, vodní součinitel, jemnost mletí, podmínky hydratace atd.

Tab. 2: *Fyzikálně-mechanické požadavky na cementy [81]*

Pevnostní třída	***Pevnost v tlaku [MPa]***				***Počátek tuhnutí [min]***	***Objemová stálost (rozepnutí) [min]***
	Počáteční pevnost		***Normalizovaná pevnost***			
	2 dny	***7 dnů***	***28 dnů***			
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5R	≥ 10	-				
42,5 N	≥ 10	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5R	≥ 20	-				
52,5 N	≥ 20	-	≥ 52,5		≥ 45	
52,5R	≥ 30	-				

Použití portlandských cementů je velmi velké, vzhledem k široké škále produktů. Používají se v prvé řadě do betonů všeho druhu, dále jsou to malty pro zdění, omítkové malty, výroba pórobetonů a suchých omítkových směsí. Jde o jeden z nejvíce využívaných stavebních materiálů.

4.2.VÁPNO

Vzdušné vápno je typickým představitelem vzdušných pojiv a zároveň patří k nejdéle používaným pojivům vůbec. Technicky vzato je vápno názvem pro oxid vápenatý (CaO) s různým podílem oxidu hořečnatého (MgO), vyráběný pálením poměrně čistých, vysokoprocentních nebo dolomitických vápenců pod mez slinutí. [50]

Norma ČSN EN 459–1 [83], definuje vzdušná vápna takto: „vápna, sestávající převážně z oxidu vápenatého nebo hydroxidu vápenatého, tvrdnoucí pomalu na vzduchu reakcí s atmosférickým oxidem uhličitým; obvykle netvrdnoucího pod vodou a nemající hydraulické vlastnosti“; sem patří buď nehašená vápna, nebo hašená vápna.

Výroba vzdušného vápna probíhá ve dvou stupních. Nejprve se pálením rozemletých vápenců, dolomitických vápenců nebo dolomitů připraví pálené vápno (ozn. jako vápno nehašené). Z chemického hlediska je pálené vápno tvořeno převážně oxidem vápenatým (CaO) vzniklým dekarbonatací uhličitanu vápenatého:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \quad (1)$$

Dekarbonatace uhličitanu vápenatého začíná probíhat již od teploty 600°C. Ve výrobních zařízeních (pecích – výhradně kontinuálně pracující šachtové pece) se provádí při teplotě 900 – 1100°C, aby celý proces probíhal dostatečně rychle.

Dekarbonatace uhličitanu hořečnato-vápenatého (dolomitu) probíhá podobně. Postačí však nižší teplota.

$$CaCO_3.MgCO_3 \rightarrow CaO + MgO + 2CO_2 \quad (2)$$

Před použitím se pálené vápno hašením převádí na hydroxid vápenatý. Silně exotermickou hydratační reakcí vzniká z oxidu vápenatého hydroxid vápenatý a zároveň dochází k rozpadu původních zrn oxidu na řádově menší zrnka hydroxidová.

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad (3)$$

[2]

Hašení vápna

Provádí se dvěma způsoby:

- Mokrý způsob: hašení spočívá ve skrápění vrstvy páleného vápna vodou v ploché otevřené nádobě zvané hasnice. (Na 100 kg páleného vápna se při hašení dávkuje

240 – 320 litrů vody.) Vzniklé vápenné mléko se nechává odležet v tzv. odležovací jámě, ve které ztratí vsáknutím přebytečnou vodu a vznikne vápenná kaše.

- Suchý způsob: se uskutečňuje ve speciálním mísícím zařízení (nazývaném hydrátor). V tomto zařízení se na oxid vápenatý působí vodou dávkovanou v přibližně dvojnásobku stechiometrického množství. (Na 100 kg páleného vápna se při hašení přidává asi 65 až 70 litrů vody). Přebytečná voda přesahující teoretickou spotřebu odchází ve formě vodní páry. Výsledným produktem je práškovitý vápenný hydrát, který je skladovaný až 6 měsíců a z něhož se vápenná kaše připraví přidáním potřebného množství vody.

Použití vzdušného vápna

Vzdušné vápno, jako levné a osvědčené stavební pojivo, stále hraje významnou roli i přesto, že podíl zdících a omítkových malt připravovaných z vápenného hydrátu přímo na stavbě výrazně klesl.

Na převážně vápenné bázi se vyrábí průmyslově celá řada maltových směsí. V mnoha dalších prefabrikovaných maltových výrobcích je vzdušné vápno přítomné alespoň jako menšinová složka pojiva. Vzdušné vápno se přidává do cementu pro zdění.

Velké množství vápna se spotřebovává při výrobě vápenopískových cihel a autoklávovaného pórobetonu. Vápno také hraje velkou roli v nátěrech, buďto při klasickém nátěru používaném v případě staročeských chalup nebo u památkových staveb, kde splňuje náročné požadavky památkářů. [2, 50]

4.3. DRUHOTNÉ SUROVINY

Využití druhotných surovin ve stavebních materiálech se jistě neděje pouze pro snížení ekologické zátěže, ale hlavně pro ekonomickou výhodnost a také pro vlastnosti některých druhotných surovin, jež příznivě ovlivňují některé výsledné parametry materiálu (výrobku). Z předchozích výzkumů vyplynulo, že je možné vyvinout velmi kvalitní materiály, obsahující významnou složku druhotné suroviny, s vlastnostmi, které zvýší jejich konkurenceschopnost oproti výrobkům využívajících přírodních surovin. Mezi nejznámější a nejpoužívanější průmyslové suroviny patří například popílky či strusky.

4.3.1. POPÍLKY

Popílky jsou tuhé, nerostné zbytky po spalování práškového hnědého či černého uhlí, získávané z kouřových plynů zachycováním v odlučovačích.

Podle způsobu vzniku dělíme popílky na popílky klasické, vzniklé při klasickém spalování, a popílky fluidní, vzniklé při spalování uhlí ve fluidních kotlích.

4.3.1.1. KLASICKÉ POPÍLKY

Popílky z „klasického“ způsobu spalování paliva při teplotách cca 1200 až 1600 °C se vyznačují obsahem hlavně β - křemene a mullitu ($3Al_2O_32SiO_2$). Popílky obsahují sklovitou fázi, jejíž množství je zpravidla vyšší než 50%, která zásadním způsobem ovlivňuje reaktivitu popílků s CaO, nebo cementem, jak za normální, tak zvýšené teploty (autoklávování). Obsah SO_3 je obvykle pod 1 %, jelikož síran vápenatý se při teplotách nad 1150 °C rozkládá. Je-li přítomné volné vápno, obvykle do 2 %, je ostře pálené, a tedy nereaktivní. Mullit se zúčastňuje reakce pouze ve velmi malé míře, výhradně za hydrotermálních podmínek.

Popílek sám o sobě není hydraulický, to znamená, že není schopen reagovat s vodou. Je-li však mísen s hydroxidem vápenatým – např. z cementu – reaguje a vytváří stejné produkty jako při reakci cementu s vodou. Tato reakce se liší dle typu a druhu popílku a je označována jako pucolanita. V popílku, který byl skladován delší dobu ve vlhku, může být pucolánový účinek porušen. [55]



Obr 28: *Vzorek vysokoteplotního popílku (vlevo) a detail totožného vzorku (vpravo)*

Dle ČSN EN 197-1 [81] je možno vyrábět cementy s přísadou křemičitého nebo vápenatého popílku. V ČR se prakticky vápenatý popílek nevyskytuje. Křemičitý popílek je jemný prášek převážně z kulatých sklovitých částic s pucolánovými vlastnostmi. Musí sestávat hlavně z aktivního SiO_2 a Al_2O_3. Mineralogicky má asi 90 % popílku amorfní podobu, zbytek je pak podoby krystalické. Chemické složení se u jednotlivých popílků do jisté míry liší, závisí na druhu a kvalitě uhlí a na podmínkách spalování.

Využití vysokoteplotního popílku v cementových kompozitech není žádnou výjimkou. V současnosti dochází ke zpracování mnoha tun tohoto typu popílku v široké škále stavebních výrobků. O vlivu popílku na cementové malty je pojednáno např. [51], ale i v nesčetném počtu dalších publikací. Je tedy nasnadě se zabývat i modifikací pojiva výplňových hmot. V úvahu přichází dvě varianty. V první řadě by bylo vhodné ověřit, jak se projeví přídavky popílku představující jednak příměs, a dále pak jako parciálního substituentu cementového pojiva při použití popílků již z ověřených zdrojů, tj. takové, které vykazují dobré vlastnosti z hlediska hydratačního procesu, a dále i trvanlivosti cementové matrice. V dalším by bylo vhodné experimentálně ověřit i vliv popílků, které se vyznačují poněkud zhoršenými parametry, tj. zvýšenou variabilitou chemického složení, obsahem některých nežádoucích prvků, vysoké ztráty žíháním atd.

4.3.1.2. FLUIDNÍ POPÍLKY

Vedlejším produktem fluidního spalování jsou pevné látky o různé granulometrii, resp. velikosti částic. Proto rozeznáváme popílky zpravidla dvojího druhu: popílek z prostoru ohniště (označovaný ložový) a popílek získaný z úletu (někdy se označuje cyklónový, filtrový apod.). Vlastnosti obou těchto popílků se výrazně liší - jak v chemickém a mineralogickém složení, tak i ve fyzikálních vlastnostech (granulometrie, hustota, měrný povrch, sypná hmotnost), i když pocházejí z téhož technologického procesu fluidního spalování a odsiřování. Jedná se především o směs popela z původního paliva, nezreagovaného odsiřovacího činidla (CaO s případnými zbytky $CaCO_3$), síranu vápenatého $CaSO_4$, produktů reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. Vzhledem k tomu, že teploty spalování jsou při fluidních procesech nižší než při klasickém spalování, je nezreagovaný CaO přítomen ve formě tzv. měkce páleného vápna (15 až 35 %), a je tedy reaktivní a má poměrně vysoký obsah SO_3 (7 až 18 %), jenž může způsobit v pojivu vznik ettringitu ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$). [10] Pro fluidní popílky je též charakteristický nízký obsah taveniny. Z hlediska zvýšené variability vlastností včetně chemického složení těchto popílků, nedochází k jejich využívání v takové míře, jako je tomu u vysokoteplotních popílků.

- *Ložový popílek* - hrubý popel a struska se zrny o velikosti do pěti centimetrů tvoří přibližně jednu čtvrtinu odpadu. Tato část se zachycuje ve spodní partii ohniště pod spalovací komorou. [52]
- *Filtrový popílek* - obsah popílku ve spalinách, např. za elektrárenským kotlem, je v průměru asi 30 g/m^3 spalin. Aby se popílek nedostával do ovzduší a neznečišťoval

je, zachycujeme jej ve speciálních filtrech. Při výrobě elektřiny jsou k zachycení popílku nejčastěji používány tzv. elektrostatické odlučovače, které umí zachytit více než 99 % popílku. [53]



Obr 29: *Vzorek popílku z fluidního spalování (vlevo) a detail totožného vzorku (vpravo)*

V roce 2012 bylo v členských státech EU 15, využito 0,6 mil. tun z celkově vyprodukovaných 0,9 mil. tun popílku. Oproti klasickému popílku a vysokopecní strusce je tedy evidentní, že se nejedná o příliš zužitkovávanou surovinu a bylo by, tudíž vhodné maximalizovat její obsah ve vsázce sklosilikátů.

Na rozdíl od vysokoteplotního popílku skýtá popílek z fluidního spalování potenciální alternativní zdroj, kde lze očekávat již nižší míru pucolánové aktivity. Na straně druhé je, ale zřejmé, že v případě zužitkování tohoto typu popílku, jako druhotné suroviny pro modifikaci pojiva výplňových hmot se bude jednat o finančně výhodnější surovinu, čímž by došlo k výraznějšímu snížení nákladů na výrobu cementových kompozitů s plnivem na bázi přírodních surovin. O skutečnosti, že popílek z fluidního typu spalování lze ve stavebnictví (pro výrobu stavebních hmot a prvků) využívat, svědčí zavedení příslušných technických norem, které tuto problematiku řeší. Stejně jako v případě vysokoteplotního popílku, i s fluidními popílky bylo značně experimentováno v oblasti stavebních materiálů, o čemž svědčí kupř.[54].

4.3.2. STRUSKA

Struska, přesněji řečeno mletá vysokopecní granulovaná struska, je vedlejším produktem při výrobě surového železa ve vysoké peci. Všechny nečistoty obsažené v železné rudě a v koksu přecházejí do vysokopecní strusky. Protože tyto nečistoty mohou při určité kombinaci zvyšovat teplotu tavení směsi, což je neekonomické, jsou do vsázky přidávány korigující příměsi, takže nakonec zůstává chemické složení nečistot ve velmi

dobře definované oblasti na SiO_2-CaO-Al_2O_3 fázovém diagramu, která koresponduje s jednou nebo druhou nižší teplotou tavení v tomto fázovém diagramu. Po chemické stránce má tedy struska zcela konstantní složení, kterému věnují pozornost i metalurgové, protože jakákoliv odchylka od něj znamená výrazné zvýšení spotřeby energie a zvýšení ceny. [9]

Roztavená struska má mnohem nižší specifickou hmotnost, kolem 2 800 $kg.m^{-3}$, než surové železo, které má asi 7000 $kg.m^{-3}$, takže roztavená struska plave vždy na povrchu roztaveného železa a může být vypuštěna odděleně. Struska může být chlazena dvěma rozličnými způsoby. Předně, může být ponechána, aby pomalu chládla, přičemž krystalizuje zejména ve formě melilitu a pevných roztoků ackermanitu a gehlenitu. Tímto způsobem vzniká krystalická vysokopecní struska, která může být použita jako kamenivo do betonu, asfaltu nebo jinak, ale prakticky nemá hydraulické vlastnosti a nemůže být použita jako náhrada cementu, ani v případě, že by byla jemně pomleta. Ovšem jestliže je struska po vypuštění z pece skrápěna vodou, tuhne ve skelném stavu a pak se mohou vyvinout její hydraulické vlastnosti. „Hašení“ strusky může být provedeno třemi různými způsoby a to:

- Vypuštěním do velkého vodního bazénu, kde se dezintegruje do drobných částic jako hrubý písek. Pak se označuje jako granulovaná struska.
- Hašením přímo tekoucí vodou jakmile vytéká ven z vysoké pece do metalurgické stoky. Také v tomto případě získává podobu hrubého písku a je označována jako granulovaná struska
- Zvláštním kotoučem je vymrštěna do vzduchu, takže k hašení dochází kombinací působení vody a vzduchu. V tomto případě má ochlazená struska podobu víceméně sférických sbalků (pellet) a je obvykle označována jako peletizovaná struska. Tyto sbalky mohou být užity jako lehké kamenivo ve výrobě betonových tvárnic, nebo mohou být mlety, čímž vzniká hydraulický prášek.

Při uvážení současné ceny vysokopecní strusky je patrné, že se nejedná v žádném případě o odpad, ale spíše již o plnohodnotnou surovinu, která je získána jako vedlejší produkt hutní výroby. Modifikací složení pojiva výplňových hmot jemně mletou granulovanou vysokopecní struskou by bylo možné docílit spíše specifických parametrů, jež by vedly ke zlepšení některých parametrů, což dokazují mimo jiné studie [56, 57, 58].

5. CÍL PRÁCE

Disertační práce byla zaměřena na výzkum a vývoj výplňových hmot pro svislé a vodorovné konstrukce na bázi rychle obnovitelných surovin. Jako zástupce rychle obnovitelných surovin byla vybrána dřevní hmota, sláma a technické konopí. Dále byl výzkum zaměřen na druhotné suroviny, které z části nahrazují pojivovou složku výplňových hmot, doposud tvořenou cementem a vápnem. Účelem použití těchto surovin ve struktuře hmot je získání lepších vlastností konečných hmot a také šetření primárních zdrojů surovin. Výsledné výplňové hmoty by měly disponovat dobrými fyzikálně-mechanickými i tepelně-technickými vlastnostmi.

Experimentální části předcházel sběr dat a informací o dané problematice, které jsou zpracovány formou rešerše. Zejména se jedná o používání rychle obnovitelných zdrojů surovin ve stavební praxi v ČR i zahraničí.

Hlavní částí disertační práce byl výzkum rozfázovaný do několika etap řešení. Počáteční fáze výzkumu byla směřována na výběr vhodných vstupních surovin a na jejich případnou předúpravu drcením či mineralizací plnivové složky hmot. Dále stanovením vlastností cementové malty vytvořené z výluhů jednotlivých přírodních rychle obnovitelných druhů surovin. Tím se vybrala nejvhodnější, rychle obnovitelná surovina pro výrobu hmot. V následujících etapách byl proveden návrh receptur zkušebních vzorků výplňových hmot s ověřením vhodnosti použití druhotné suroviny v pojivové složce. Sledovány byly zejména fyzikálně-mechanické, tepelně-technické a trvanlivostní parametry výsledných produktů, v závislosti na použitých surovinách. Na základě podrobného studia vlastností výplňových hmot byla vyhodnocena vhodnost receptur pro jejich konkrétní využití v konstrukci.

Dosažené experimentální výsledky byly komplexně vyhodnoceny a byl vyjádřen přínos pro praxi a pro rozvoj vědní disciplíny – stavebně materiálového inženýrství.

6. METODIKA PRACÍ

Práce byla rozdělena na několik etap. První etapa zahrnovala zhodnocení stávajícího stavu využívání rychle obnovitelných surovin ve stavebních výrobcích. Další etapou bylo zkoušení vlastností přírodních rychle obnovitelných surovin (smrkových třísek, slámy, technického konopí různých frakcí a pěstitelských oblastí). Především se sledovalo spolupůsobení těchto surovin s hydraulickou maltovinou. Další etapou bylo použití odzkoušených přírodních rychle obnovitelných materiálů jako plnivové složky do výplňových hmot za použití různých druhů pojiv či jejich kombinace. Na základě této etapy probíhala optimalizace výsledných receptur. Modifikace receptur spočívala především v mineralizaci použité obnovitelné suroviny a nahrazení části pojivové složky druhotnými surovinami (klasický a fluidní popílek, struska). Poslední etapou bylo odzkoušení nejlepších navržených receptur výplňových hmot pro různé aplikace v konstrukcích. Byly provedeny fyzikálně-mechanické, tepelně-technické zkoušky i zkoušky trvanlivosti výplňových hmot.

Disertační práce byla rozčleněna do pěti na sebe navazujících etap.

I. V rámci první etapy bylo provedeno **studium dostupných informací o problematice**.

Před zahájením samotného výzkumu a všech experimentálních prací bylo nejprve zapotřebí nashromáždit potřebné informace a data týkající se řešené problematiky. První etapa byla fáze přípravná, v níž byly provedeny rozsáhlé rešerše odborné literatury o přírodních obnovitelných zdrojích surovin nejen na území České republiky, ale i v ostatních zemích světa i mimo Evropu. Žádoucí byly zejména statistiky dostupnosti jednotlivých surovin na trhu a používání surovin ve stavebních prvcích. Prostudovány byly hlavně literární zdroje o pojení přírodních surovin anorganickou maltovinou, jejich vzájemné spolupůsobení a vhodnost použití. Další významnou součástí bylo zmapování přehledu o druhotných surovinách a jejich možnosti nahrazení části pojivové složky ve výplňových hmotách.

II. Druhá etapa sestávala ze **zkoušení vlastností vstupních surovin** výplňových hmot.

Na základě předchozí etapy byly vytipovány rychle obnovitelné zdroje surovin použitelné do struktury výplňových hmot. Materiálová základna byla zúžena na tři základní typy přírodní suroviny, a to smrkové dřevo, slámu a technické konopí. Všechny vybrané suroviny patří do skupiny přírodních materiálů s dlouholetou tradicí používání ve

stavebních prvcích. Dále byla navržena skladba pojivové složky výplňových hmot. Byli vybráni zástupci druhotných surovin pro nahrazení části pojivové složky pro úsporu surovinového zdroje pojiva. Jako druhotné suroviny byly vybrány vysokoteplotní popílek, fluidní popílek a struska z různých elektráren a tepláren v ČR. Přírodní surovinové zdroje byly podrobeny základním zkouškám jejich vlastností jako sypná hmotnost, sítový rozbor a nasákavost. Poté byl vytvořen výluh pro stanovení vhodnosti použití jako záměsové vody cementové malty, na které byly následně sledovány fyzikálně-mechanické parametry. U druhotných surovin byla stanovena chemická analýza, měrná hmotnost, sypná hmotnost, měrný povrch, stanovení velikosti částic a mineralogické složení.

III. Náplní třetí etapy byl **návrh a základní zkoušení receptur** výplňových hmot.

Na základě výsledků z předešlé etapy byla navržena skladba zkušebních směsí výplňových hmot. Při samotném návrhu zkušebních vzorků byl brán zřetel na předpokládané využití získaných produktů, a to na vývoj výplňových hmot s použitím pro svislé a vodorovné konstrukce. Návrhy receptur spočívaly zejména v hledání optimálního složení pojivové složky, nalezení optimální mineralizační složky plniva a optimalizace dávky druhotné suroviny z hlediska dosažených fyzikálně-mechanických a tepelně-technických parametrů. Z tohoto důvodu byly v této etapě stanoveny jen některé vlastnosti vyrobených vzorků (objemová hmotnost, pevnost v tlaku, součinitel tepelné vodivosti).

IV. Čtvrtá etapa byla věnována v**yhodnocení výsledků, navržení a odzkoušení dodatečných receptur** výplňových hmot.

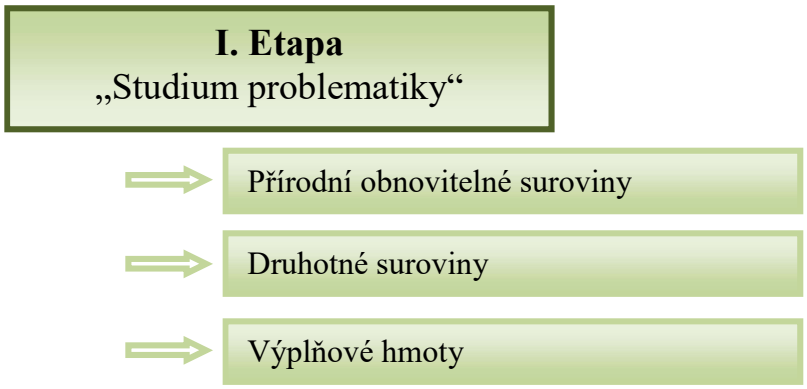
Během čtvrté etapy byly vyhodnoceny výsledky ze všech provedených stanovení a analýz. S přihlédnutím k těmto výsledkům byly vybrány a odzkoušeny receptury s nejlepšími základními vlastnostmi. Hlavní pozornost byla zaměřena na dobré pevnosti v tlaku a nízké hodnoty součinitele tepelné vodivosti, díky čemuž by si výsledná výplňová hmota mohla najít dobré místo na trhu se stavebními prvky. Z vybraných receptur byly vytvořeny zkušební vzorky pro komplexní zhodnocení jejich použitelnosti ve stavebních aplikacích. Bylo přistoupeno ke zkoušení dlouhodobých fyzikálně-mechanických, trvanlivostních, tepelně-technických i zvukově-izolačních vlastností výplňových hmot.

V. Závěrečná etapa byla zaměřena na **celkové shrnutí** prací a zhodnocení vlastností vyvinutých výplňových hmot.

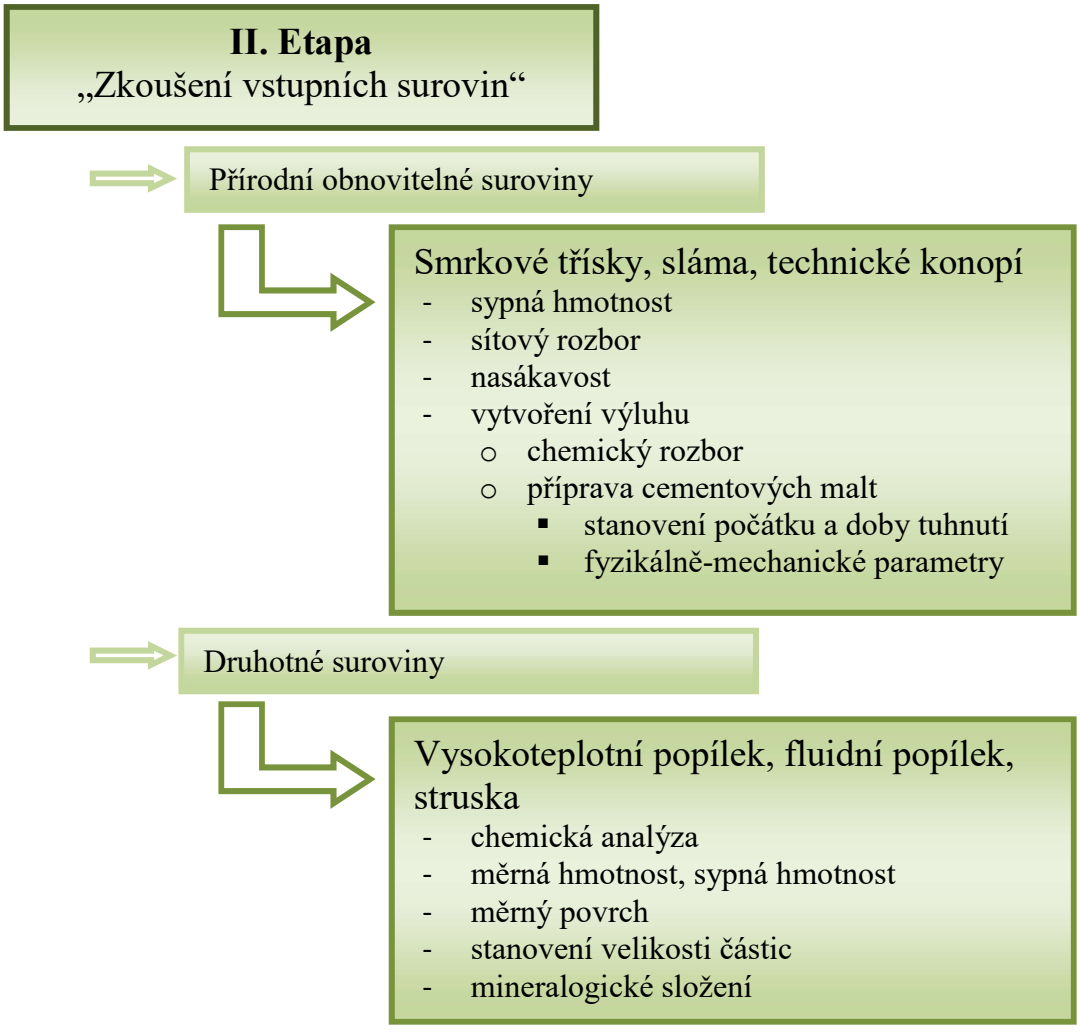
Poslední fáze disertační práce byla věnována vyhodnocení všech dílčích, na sebe postupně navazujících fází výzkumných prací. Výsledné charakteristiky všech nově

navržených zkušebních receptur výplňových hmot byly porovnány s dnes běžně dostupnými výplňovými hmotami na přírodní surovinové bázi nejen po stránce technické, ale i po stránce ekonomické a technologické.

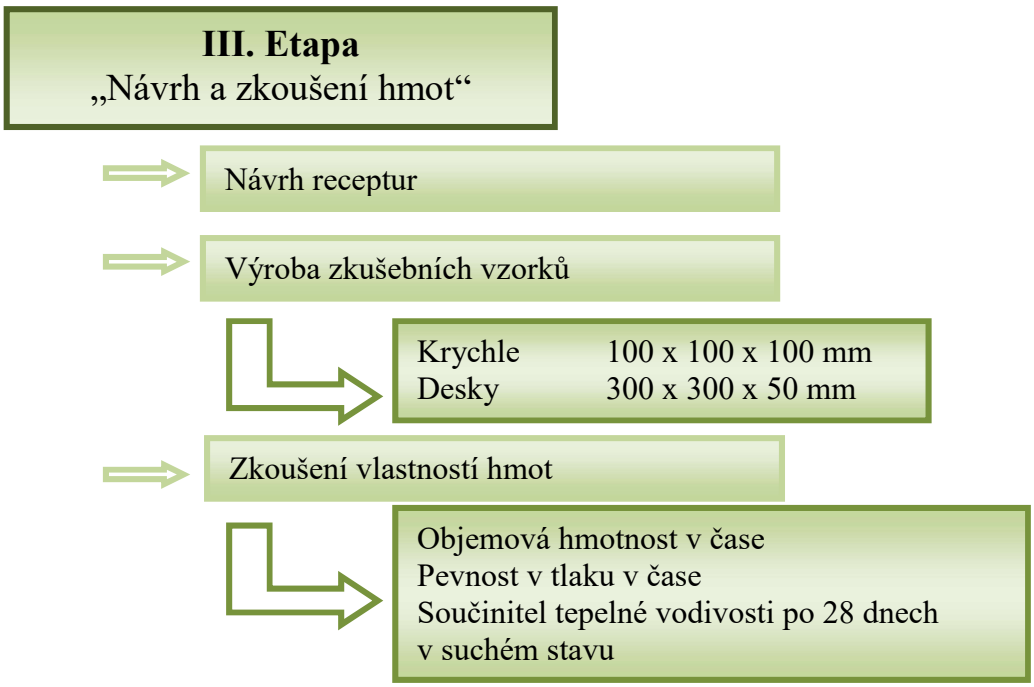
Na následujících schématech je znázorněn podrobný rozpis metodických postupů a zkoušek prováděných v rámci všech pěti etap.



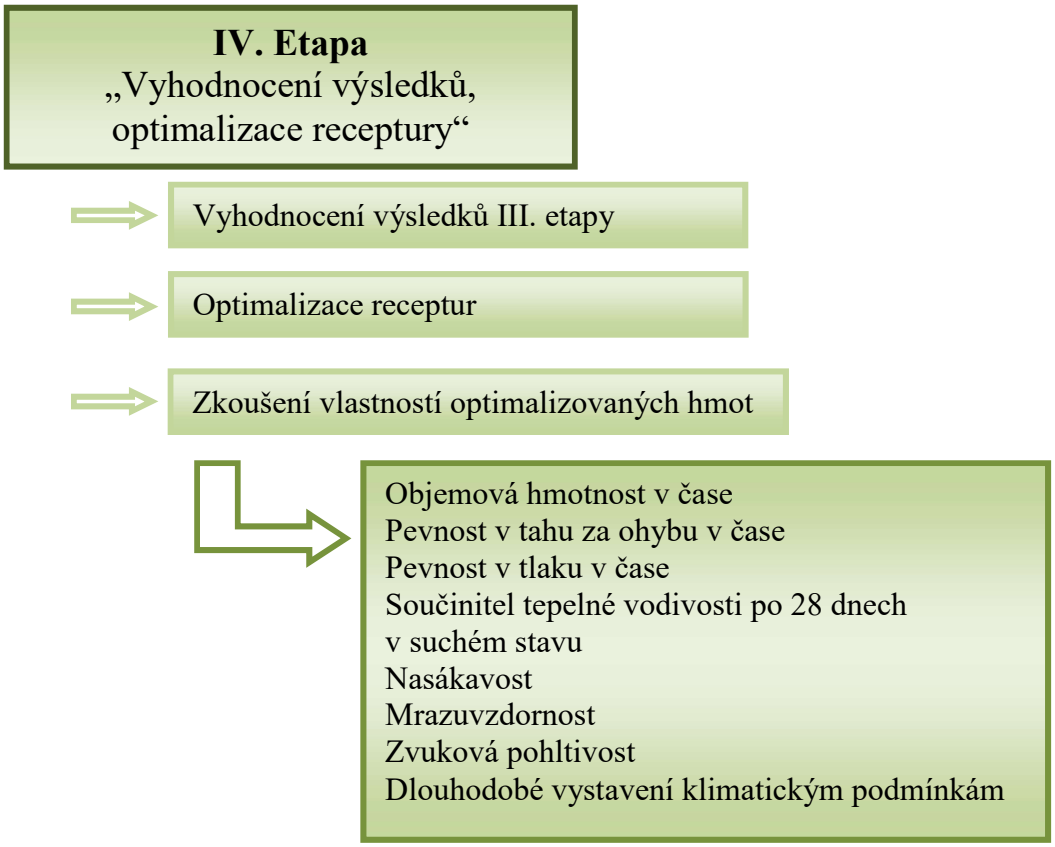
Obr 30: *Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – I. Etapa*



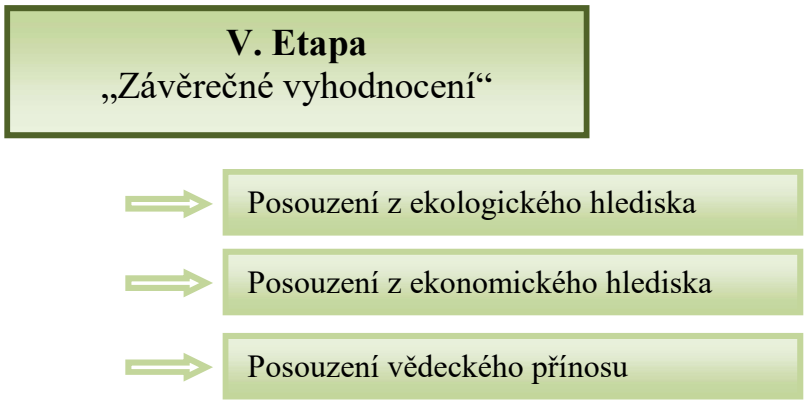
Obr 31: *Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – II. Etapa*



Obr 32: *Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – III. Etapa*



Obr 33: *Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – IV. Etapa*



Obr 34: *Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – V. Etapa*

6.1.PŘEHLED PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK

Zkoušky vstupních surovin a zkušebních těles výplňových hmot byly provedeny dle postupů odpovídajícím ustanovením jednotlivých norem. Posouzení vlastností zkoumaných materiálů bylo prováděno na základě výsledků komplexu fyzikálně-mechanických a fyzikálně-chemických analýz. V rámci experimentů byla prováděna následující stanovení.

6.1.1. STANOVENÍ VLASTNOSTÍ VSTUPNÍCH SUROVIN

6.1.1.1. PŘÍRODNÍ OBNOVITELNÉ MATERIÁLY

Sypná hmotnost volná, setřesená

Sypná hmotnost je hmotnost definovaná objemovou jednotkou. Stanovuje se ve stavu volně sypaném nebo setřeseném dle ČSN EN 1097-3. [84]

Sypná hmotnost volná: Zváží se suchá nádoba o objemu 5 dm^3, na ni se nasadí násypka, kterou se kamenivo (konopné pazdeří) volně vsype do nádoby z výšky max. 50 mm od horního okraje. Následně se forma zváží se vzorkem. Výsledná sypná hmotnost je rozdíl hmotností dělený objemem nádoby.

$$\rho_b = \frac{m_1 - m_2}{V} [kg.m^{-3}] \quad (4)$$

m_1 - hmotnost nádoby [g]

m_2 - hmotnost nádoby se vzorkem [g]

V - objem nádoby (0,005 m^3)

Velikost částic

Stanovení velikosti částic probíhá dle ČSN EN 933-1. [85] Postup spočívá v prosévání vzorku určité hmotnosti sadou kontrolních normovaných sít se čtvercovými otvory, ve vážení zbytků na jednotlivých sítech a v určení jejich hmotnostních podílů k celkové navážce. Navážka, stejně jako zbytky na sítech se váží s přesností na 1 g. Pro zkoušku se používají síta o velikosti otvorů 0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125 mm.

Nasákavost

Nasákavost udává maximální množství vlhkosti, které může daný materiál obsahovat. Rozlišuje nasákavost hmotnostní a objemovou. Nasákavost hmotnostní se udává poměrem hmotností nasáklé vlhkostí k hmotnosti suchého vzorku materiálu. Nasákavost se udává buď po jisté době ponoření vzorku do kapaliny (po 1 hod., 24 hod.) nebo po dosáhnutí své největší hmotnost, tj. teoreticky po nekonečné době, kdy všechny otevřené póry budou již vyplněny.

$$N = \frac{m_n - m_s}{m_s} . 100[\%] \quad (5)$$

m_n - hmotnost nasáklého vzorku [g]

m_s - hmotnost vysušeného vzorku [g]

Chemický rozbor výluhu

Chemický rozbor výluhu byl proveden stejně jako chemický rozbor vody. Tato zkouška představuje rozsáhlý soubor zkoušek, kterými se zjišťují látky obsažené ve vodě rozpuštěné nebo rozptýlené. Kvalitu záměsové vody pro přípravu betonu předepisuje ČSN EN 1008 [86]. Požadavky se často přebírají i pro přípravu malt.

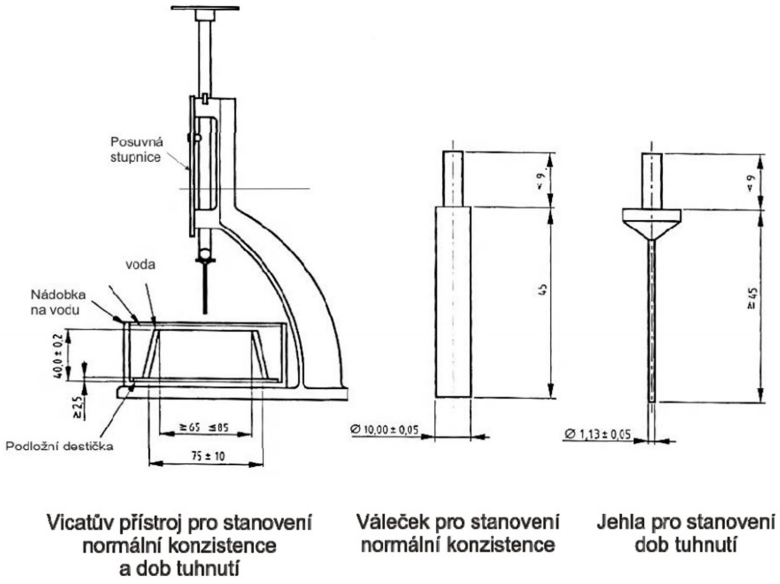
Vzorek pro zkoušku musí být reprezentativní, protože dle normy se na něm zkouší cca 30 posuzovacích kritérií. Kritériem posuzování je např. znečištění vody oleji, tuky, čisticí prostředky, zkouška pH, obsah chloridů, cukrů, fosfátů, síranů, alkálií, dusičnanů a vliv na tuhnutí a tvrdnutí cementu.

Jelikož pro výrobu vzorků používáme i nemineralizované přírodní suroviny, je zřejmé, že při smíchání plniva, pojiva a vody dojde k reakci a to může vyvolat pozitivní či negativní vlastnosti na výsledných směsích. Všechny chemické rozbory výluhu byly provedeny ve společnosti Labtech s.r.o. Zkušební laboratoře Brno.

Stanovení počátku a doby tuhnutí

Počátek a doba tuhnutí se stanovuje pomocí Vicatova přístroje opatřeného jehlou. Postup zkušební metody je dán normou ČSN EN 196-3 [87] a je následující.

Vyrobíme si kaši normální konzistence. Do míchačky nasypeme 500 g cementu a nalije se zvolené množství vody. Po smíchání cementu a vody začneme zaznamenávat čas. Míchačku uvedeme do chodu na 90 s. Po 90 s ji na 30 s zastavíme a stěrkou cementovou kaši setřeme ze stěn nádoby. Následně míchačku opět pustíme na 90 s. Po namíchání naplníme kuželový prstenec cementovou kaší. Zkontrolujeme, zda má normální konzistenci; ta je, pokud se váleček zastaví 6 ± 2 mm nad podložním sklem. Poté vyměníme váleček za jehlu. Nastavíme přístroj do nulové polohy. Jehla se nastaví na dotyk s povrchem cementové kaše. Vpichy provádíme po 10 – 15 min. po každém vpichu prstenec pootočíme. Počátek doby tuhnutí nastává v okamžiku, kdy jehla zůstane ve vzdálenosti 6 ± 3 mm od podložní destičky. Výsledkem je čas od smíchání s přesností 5 minut. Dobou tuhnutí se pak rozumí čas, kdy jehla vnikla do cementové kaše jen 0,5 mm s přesností na 15 minut.



Obr 35: *Vicatův přístroj [87]*

Fyzikálně-mechanické vlastnosti cementových malt s obsahem výluhu

Objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku cementových malt, v nichž byl jako záměsová voda použit výluh z obnovitelné suroviny, byla zkoušena dle ČSN EN 196-1 [88]. Stanovování těchto vlastností bylo provedeno na vzorcích o velikosti 40 x 40 x 160 mm. Zkušební tělesa byla vyrobena z 1 dílu cementu CEM I 42,5 R (450 g), tří dílů normovaného písku CEN (450 g písku jemné frakce 0,08 – 0,15 mm, 450 g písku

střední frakce 0,50 - 1,00 mm, a 450 g písku hrubé frakce 1,70 – 2,00 mm) a půl dílu vody nebo výluhu z obnovitelné suroviny (225 ml, w=0,5). Vlastnosti byly měřeny v intervalu po 2, 7, 14, 28 a 60 dnech zrání ve vodním uložení. Vodní uložení bylo tvořeno tím výluhem z přírodní obnovitelné suroviny, ze které byly zkušební vzorky vyrobené

Objemová hmotnost

Je definována jako hmotnost objemové jednotky včetně dutin a pórů. Podstatou zkoušky je zjištění hustoty jako poměru hmotnosti zkušebního tělesa k jeho objemu.

Objemová hmotnost zkušebních těles se vypočítala podle vzorce:

$$\rho_v = \frac{m}{a.b.c}\,[\mathrm{kg.m^{-3}}] \tag{6}$$

m - hmotnost vzorku [kg]

a, b, c - rozměry vzorku [mm]

Pevnost v tahu za ohybu

Podstatou zkoušky je změření síly porušení vzorku ve střední části vzorku, který leží na podporách, které mají přesně definovanou vzdálenost (100mm).

$$R_f = \frac{3.F.l}{2.b.h^2}\,[\mathrm{N.mm^{-2}}] \tag{7}$$

F - maximální zatěžovací síla při porušení [N]

L - vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

d - šířka vzorku [mm]

h - výška vzorku [mm]

Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku se zkouší na zlomcích zkušebních trámečků po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Poloviny trámečků se vystředí bočními plochami v rozmezí 0,5 mm na destičkách zkušebního stroje a délkově se orientují tak, aby koncové plochy trámečků přesahovaly přibližně o 10 mm destičky. Zatížení se zvyšuje pravidelně během celé doby do porušení.

$$R_c = \frac{F}{A}\,[\mathrm{N.mm^{-2}}] \tag{8}$$

F - maximální zatěžovací síla při porušení [N]

A - plocha pomocných destiček (1600 mm^2)

6.1.1.2. DRUHOTNÉ SUROVINY

Chemická analýza

Provedení chemické analýzy je nezbytné pro zjištění jednak složení vstupních surovin, čímž jsou eliminovány nežádoucí, popř. zkorigovat jejich složení, či zohlednit tento fakt pří návrhu receptur. Všechny chemické analýzy byly provedeny ve společnosti Labtech s.r.o. Zkušební laboratoře Brno.

Sypná hmotnost volná, setřesená

Stanovení sypné hmotnosti volné a setřesené bylo provedeno v souladu s normou ČSN 72 2071 [89]. Vysušený vzorek druhotné suroviny se volně, bez otřesů sype do odměrné nádoby s předepsanou plechovou výsypkou, upevněnou v držáku stojanu. Přebytečné množství vzorku se seřízne, aniž se zkoušená surovina stlačí a poté se zváží. Při následném stanovení setřesené sypné hmotnosti se naplněná nádoba poklepává po stranách gumovým kladívkem či paličkou a dosypává se další druhotná surovina, dokud nezůstává vzorek v nádobě beze změn na horním okraji nádoby. Přebytečné množství suroviny se seřízne a poté se zváží.

Sypná hmotnost volně sypané nebo setřesené druhotné suroviny ρ_{vs} v $kg.m^{-3}$ se vypočítala podle vzorce:

$$\rho_{vs} = \frac{m_s}{V} [kg.\,m^{-3}] \quad (9)$$

m_s - hmotnost vzorku [kg]
V - objem odměrné nádoby (0,001 m^3)

Měrná hmotnost

Stanovení měrné hmotnosti bude provedeno v souladu s ČSN 196-6 [90]. Jedná se o metodu pyknometrickou. Měrná hmotnost je definována jako hmotnost 1 cm^{-3} suchého vzorku bez pórů a dutin vyjádřená v $g.cm^{-3}$.
Měrná hmotnost se vypočte ze vzorce:

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1).(m_4 - m_1)}{(m_5 - m_1).\,[(m_2 - m_1) - (m_3 - m_4)]}\ [g.\,cm^{-3}] \quad (10)$$

m_1 - hmotnost prázdného suchého pyknometru,

m_2 - hmotnost pyknometru se suchým vzorkem,

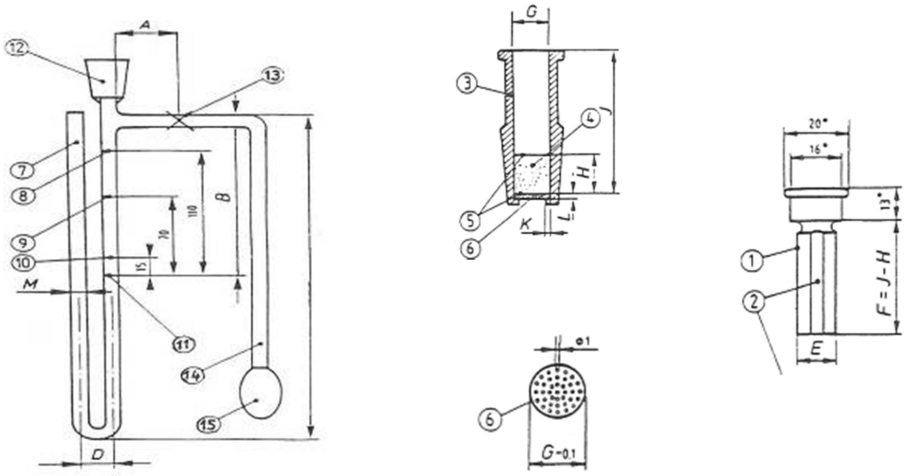
m_3 - hmotnost pyknometru se vzorkem a lihem,

m_4 - hmotnost pyknometru s lihem,

m_5 - hmotnost pyknometru s destilovanou vodou.

Měrný povrch

Stanovení měrného povrchu bylo stanoveno dle ČSN EN 196-6 [90] permeabilní metodou na Blainově přístroji. Jedná se o vyjádření jemnosti mletí vzorků jako měrný povrch, vypočtený z času, který je potřebný pro průtok určitého množství vzduchu zhutněným lůžkem dané velikosti a porozity.



Č.	Označení	Doporučené hodnoty [mm]	Závazné hodnoty [mm]
1	Píst	A ≤ 50	
2	Vzduchová drážka	B = 135 ±10	
3	Průtoková komora	C = 275 ±25	G = 12,7 ±0,1
4	Stlačené cementové lůžko	D = 23 ±1	
5	Filtrační papírek	J = 50 ±15	E = G − 0,1
6	Děrovaný kotouček	K = 0,8 ±0,2	
7	Manometr	L = 0,9 ±0,1	H = 15 ±1
8, 9, 10, 11	Značky	M = 9,0 ±0,4	
12	Kuželové spojení s komorou		
13	Uzavírací kohout		
14	Pryžová hadička		
15	Pryžový balónek		

Obr. 36: *Blainův přístroj, technické parametry [90]*

Velikost částic

U druhotných surovin nebyl proveden klasický sítový rozbor, ale distribuce velikosti částic byla stanovena pomocí metody na principu laserové difrakce přístrojem Mastersizer 2000.

Mineralogické složení

Bylo určeno pomocí metody rentgenové difrakční analýzy. Ta je používána k měření látek krystalického charakteru. Identifikace přítomných krystalických fází se provádí porovnáním hodnot d a I, odečtených z difraktogramu, s hodnotami v tabulkách ASTM. Analýza byla prováděna na difraktografu PANalytical Empyrean se stabilní délkou Cu-anody = 1,5406 Å, napětí 40 kV, proud 40 mA.

6.1.2. STANOVENÍ VLASTNOSTÍ VYROBENÝCH VZORKŮ VÝPLŇOVÝCH HMOT

Pro výplňové materiály jako takové nejsou přesně stanovené zkušební postupy, proto bylo přistoupeno ke zkoušení navržených vlastností dle norem na beton a tepelně izolační materiály.

Objemová hmotnost

Dle ČSN EN 12390-7 [91]; je definována jako hmotnost objemové jednotky včetně dutin a pórů. Podstatou zkoušky je změření objemu zkušebního tělesa a stanovení jeho hmotnosti. Objemová hmotnost je jedním z významných aspektů, která ovlivňuje tepelně izolační vlastnosti materiálů. Měření se provádělo na vzorcích uložených v běžných laboratorních podmínkách. Tělesa na stanovení objemové hmotnosti měla rozměry o velikosti 100 x 100 x 100 mm. Rozměry byly měřeny s přesností na 0,1 mm a hmotnost byla stanovena na 1 g.

$$\rho_v = \frac{m}{a.b.c} \; [kg.m^{-3}] \tag{11}$$

m - hmotnost vzorku [g]

a - šířka vzorku [mm]

b - výška vzorku [mm]

c - délka vzorku [mm]

Pevnost v tahu za ohybu

Dle ČSN EN 12390-5 [92] byla tato vlastnost zkoušena na zkušebních tělesech o rozměrech 100 x 100 x 400 mm. Podstatou zkoušky je změření síly porušení vzorku ve střední části vzorku, který leží na podporách, které mají přesně definovanou vzdálenost.

$$f_f = \frac{3.F.l}{2.b.h^2} [N.mm^{-2}] \quad (12)$$

F - maximální zatěžovací síla při porušení [N]

L - vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

d - šířka trámce [mm]

h - výška trámce [mm]

Pevnost v tlaku

Dle ČSN EN 12390-3 [93]; zkoušena na zkušebních tělesech 100 x 100 x 100 mm. Podstatou zkoušky je změření síly porušení na danou plochu vzorku.

$$f_c = \frac{F}{A} [N.mm^{-2}] \quad (13)$$

F - maximální zatěžovací síla při porušení [N]

A - průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatěžovací síla [mm^2]

Koeficient konstruktivnosti

Pomocí koeficientu konstruktivnosti můžeme výslednou výplňovou hmotu zatřídit mezi nosné nebo nenosné materiály. Koeficient konstruktivnosti je poměr pevnosti v tlaku k objemové hmotnosti. Spočítá se dle vzorce (14). U lehkých hmot můžeme říci, že jsou nosné, když mají koeficient konstruktivnosti větší než 0,4.

$$k_k = \frac{f_c}{\rho_v} * 100 \quad (14)$$

k_k – koeficient konstruktivnosti [-]

f_c – pevnost v tlaku [$N.mm^{-2}$]

ρ_v – objemová hmotnost [$kg.m^{-3}$]

Součinitel tepelné vodivosti

Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno stacionární metodou desky (metoda měřidla tepelného toku) dle ČSN 72 7012-3, ČSN EN 12667 a ISO 8301. [94, 95, 96] Podstatou této metody je navození ustáleného teplotního stavu ve zkoušeném vzorku. Jelikož při běžných podmínkách není možné dosáhnout stacionárního stavu, je za tento stav považována změna teploty za daný časový úsek menší než smluvně definovaná teplotní změna dle normy. Pro měření byl použit přístroj Lambda 2300, Holometrix Micromet Inc., USA.

Stanovení součinitele tepelné vodivosti u zkušebních těles bylo provedeno při dané střední teplotě a teplotním spádu 10 K.

Nasákavost

Nasákavost vzorků výplňových hmot byla zkoušena dle ČSN EN 1609 [97] jako krátkodobá nasákavost při částečném ponoření. Tato metoda je určena k simulaci nasákavosti vody způsobené deštěm po dobu 24 h během stavebních prací. Podstatou zkoušky je stanovení hmotnostní změny zkušebního vzorku umístěného po dobu 24 hodin spodní stranou ve vodě. Přebytečná neabsorbovaná voda, která ulpí na povrchu vzorku, se odstraňuje pomocí 2 normově popsaných metod, buď metodou odkapání (metoda A) či metodou odečtení počátečního navlhčení (metoda B). Volba metody závisí na počátečním navlhčení zkušebního vzorku.

Zkouška byla prováděna na zkušebních tělesech po stanovení součinitele tepelné vodivosti. Zkušební vzorky čtvercového příčného řezu o straně 300 ± 1 mm byly testovány dle metody A, tj. metoda odkapání přebytečné vody, vzhledem k charakteru pórovitosti přírodních materiálů a s tím úzce související nasákavosti vzorků. Nejprve byla určena počáteční hmotnost zkušebního tělesa m_0. Poté bylo zkušební těleso vloženo do prázdné nádoby tak, aby po doplnění vodou zůstalo částečně ponořeno. Spodní část tělesa musela zůstat po celou dobu zkoušky ponořena 10 ± 2 mm pod hladinou vody. Po 24 h bylo zkušební těleso vyjmuto, umístěno vertikálně na síť se sklonem 45° a ponecháno po dobu 10 ± 0,5 min k okapání. Na konci bylo zkušební těleso zváženo a byla tak stanovena jeho hmotnost m_{24}.

Krátkodobá nasákavost vody při částečném ponoření se určuje dle výpočtového vzorce:

$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p} \ [kg.m^{-2}] \quad (15)$$

m_{24} – hmotnost zkušebního vzorku po částečném ponoření po dobu 24 h [kg]
m_0 – počáteční hmotnost zkušebního vzorku [kg]
A_p - plocha zkušebního vzorku ponořená do vody [mm^2]

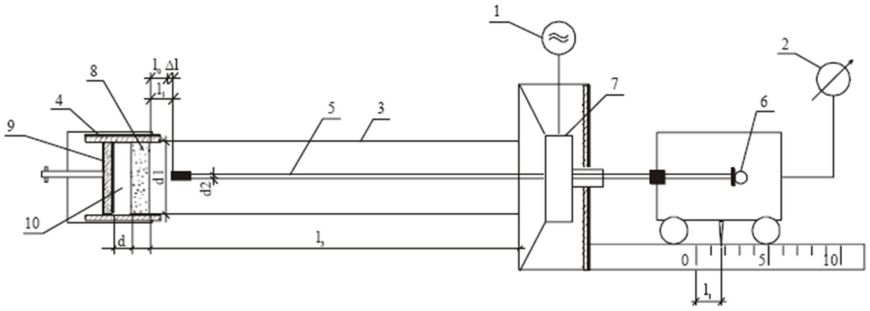
Mrazuvzdornost

Dle ČSN 73 1322 [98]; zkoušena na zkušebních tělesech 100 x 100 x 100 mm. Podstatou zkoušky je střídavé zmrazování a rozmrazování vzorků, určeným počtem cyklů. Vzorky se vystavují teplotám -15°C až +20°C v rovnoměrných intervalech. Poté se odzkouší pevnost v tlaku. Výsledkem zkoušky je výsledná pevnost v tlaku po stanovených cyklech zmrazování a rozmrazování.

Zvuková pohltivost

Činitel zvukové pohltivosti u zkušebních těles byl stanoven dle ČSN ISO 10534-1. [99] Metoda spočívá ve vytvoření stojatého vlnění v trubici, na jejímž konci je vzorek. Z naměřeného maxima a minima akustického tlaku stojaté vlny se pak numericky vypočte činitel zvukové pohltivosti.

Vzorek zkušebního tělesa kruhového tvaru byl vložen do držáku Kuntovy trubice bez deformací tak, aby rubová strana přiléhala na píst (dno) držáku a lícová strana souhlasila s rovinou konce trubice. Po zapnutí zkušební aparatury byl na generátoru nastaven požadovaný kmitočet. Posuny akustickou sondou do vzorku se stanoví akustický tlak v nejbližší kmitně a uzlu stojaté vlny. Nejdříve byla nalezena kmitna akustického tlaku a při odpovídajícím zesílení bylo na analyzátoru nastaveno výstupní napětí *Umax* na maximální možnou výchylku voltmetru. Poté byl pohybem sondy směrem ke vzorku nalezen uzel akustického tlaku. V uzlu bylo odečteno napětí na voltmetru *Umin*. V případě, že blíže ke vzorku byla kmitna, byla sonda posunována v opačném směru. Měření bylo prováděno na kmitočtech třetinooktávové řady v rozsahu 100–3150 Hz.



Obr 37: *Kuntova trubice: (1 - generátor; 2 – analyzátor; 3 – trubice; 4 – držák vzorku; 5 – sonda; 6 – mikrofon; 7 – reproduktor; 8 – vzorek; 9 – píst (dno) držáku; 10 – vzduchový polštář) [59]*

Z naměřených hodnot činitele zvukové pohltivosti byla následně stanovena hodnota váženého činitele zvukové pohltivosti αw [-], což je kmitočtově nezávislá, jednočíselná hodnota, rovná hodnotě směrné křivky na 500 Hz po jejím posuvu. Postup jeho stanovení je uveden v ČSN EN ISO 11654 [100]. Tato veličina byla použita pro vzájemné zhodnocení akustických vlastností jednotlivých zkušebních vzorků.

Dlouhodobé vystavení klimatickým podmínkám

Jednalo se o nenormové uložení zkušebních vzorků výplňových hmot do venkovního prostředí po dobu jednoho roku. Vzorky byly umístěny na betonovou plochu, kde byly vystaveny klimatickým podmínkám od února 2012 do ledna 2013. Poté byly vzorky vizuálně posouzeny a byla provedena zkouška pevnosti v tlaku a stanoven procentuální pokles pevnosti oproti vzorkům, které byly uloženy v laboratorním prostředí a zkoušeny po 360 dnech zrání.

6.1.3. ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

V následujících kapitolách bude vždy uváděna průměrná hodnota všech naměřených hodnot jednotlivých zkoušených vlastností min. ze tří a max. pěti zkušebních vzorků dle výpočtového vztahu:

$$X = \frac{\sum x_i}{n} \tag{16}$$

X – průměrná hodnota

x_i – i-tá hodnota

n – počet měření

6.2. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ VÝPLŇOVÝCH HMOT

Ověření vlastností vstupních surovin, příprava a výroba zkušebních vzorků cementových past a výplňových hmot a studium těchto hmot bylo realizováno v laboratořích Ústavu technologie stavebních hmot a dílců. Ovšem mimo stanovení chemických analýz druhotných surovin a rozboru výluhu z přírodních surovin. Výroba zkušebních vzorků výplňových hmot probíhala v laboratorní míchačce s nuceným oběhem, postup výroby byl následující:

- nejprve bylo do míchačky hmotnostně nadávkováno plnivo a pojivo,
- směs se důkladně homogenizovala,
- dále se do míchačky hmotnostně nadávkovala voda,
- proběhlo důkladné promísení.

Postup míchání byl stejný i v případě, že bylo plnivo mineralizováno, jelikož mineralizace plniva proběhla den předem a veškerý roztok potřebný pro mineralizaci byl vsáknut do jednotlivých částic plniva. Mineralizace plnivové složky probíhala bez přebytku mineralizačního roztoku.

Na dokonale promísených hmotách byla stanovena objemová hmotnost v čerstvém stavu, a poté se hmota ukládala do připravených forem dle druhu měřených vlastností. Z každé receptury bylo vytvořeno minimální množství zkušebních vzorků o velikostech 100 x 100 x 100 mm, 100 x 100 x 400 mm a 300 x 300 x 50 mm (ukázka jednotlivých zkušebních vzorků je na obrázcích. Směs byla ve formách hutněna vibrací s přítlakem 2 kg závaží, pro docílení co nejlepších ploch zkušebního vzorku. Vzorky zrály ve zkušebních formách po dobu 48 nebo 72 hodin. Poté proběhlo odformování a vzorky byly uloženy do laboratorního prostředí při teplotě 21 ± 1 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 ± 5 %. Zkušební tělesa byla zkoušena v intervalech 7, 28, 60, u konečných receptur výplňových hmot proběhlo zkoušení i po 90, 120 a 360 dnech zrání. Součinitel tepelné vodivosti byl na každé receptuře hmot zkoušen po 28 dnech zrání ve vysušeném stavu.



Obr 38: *Ukázka zkušebních vzorků výplňové hmoty o velikosti 100 x 100 x 100 mm*



Obr 39: *Ukázka zkušebního vzorků výplňové hmoty o velikosti 100 x 100 x 400 mm*



Obr 40: *Ukázka zkušebního vzorků výplňové hmoty o velikosti 300 x 300 x 50 mm*

7. VÝSLEDKY JEDNOTLIVÝCH ETAP, VYHODNOCENÍ

7.1. VYHODNOCENÍ I. ETAPY „STUDIUM PROBLEMATIKY“

Nejprve byla provedena rešerše z dostupných odborných příspěvků domácích i zahraničních databází příspěvků, sborníků z konferencí z celého světa, internetových stránek jednotlivých producentů přírodních obnovitelných zdrojů surovin, či producentů výplňových hmot nebo výrobců stavebních materiálů s použitím přírodní nebo druhotné suroviny. Všechny dostupné informace byly podkladem pro výběr možných surovinových zdrojů pro vývoj výplňových hmot. Výběr nejzajímavějších odborných článků:

- The Effect of Steam Explosion Treatment on Technical Hemp Fibres, (S. Kukle, J. Gravitis, A. Putnina and A. Stikute) [60]
- Properties of Hemp Fibre Cottonised by Biological Modification of Hemp Hackling Noils, Natalia Sedelnik [61]
- ‘Structure’ in Metric Handbook: Planning and Design Data, (Alder David, and Norman Seward) [62]
- Building with Hemp (Allin Steve) [63]
- Hemp Lime Construction: A Guide to Building with Hemp Lime Composites (Bevan Rachel, and Tom Woolley) [64]
- ‘Wattle’, in Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World (Bunn, Stephanie) [65]
- Hemp Concretes: Mechanical Properties using both Shives and Fibres (De Bruijn Paulien) [66]
- Biobased Structural Composite Materials for Housing an Infrastructure Applications: Opportunities and Challanges (Drzal, L.T. and others) [67]
- Handbook of Energy Crops: Cannabis Sativa L (Duke James A) [68]
- All Natural Composite Sandwich Beams for Structural Application (Dweib, M.A., and others) [69]
- Dynamical Interactions Between Heat and Mass Flows in Lime-Hemp Concrete (Evrard, A., A. De Herde and J. Minet) [70]
- Use of Hemp and Flax in Composite Manufacture: A Search for New Production Methods (Hautala, M., A. Pasila and J. Pirila) [71]

- Characteristics of Low Density Hemp-Lime Composite Building Materials under Compression Loading (Hirst, Edward, and others) [72]
- Hemp Yarn Reinforced Composites: Yarn Characteristics (Madson, Bo, and others) [73]
- The Great Book of Hemp: The Complete Guide to the Environmental, Commercial, and Medicinal Uses of the World's Most Extraordinary Plant (Robinson Rowan) [74]
- Hemp: A New Crop with New Uses for North America, in Trends in New Crops and New Uses (Small Ernest, and David Marcus) [75]
- Review of Current Development in Natural Fiber Composites for Structural and Infrastructure Applications (Ticoalu, A., T. Aravinthan and F. Cardona) [76]
- A Study of the Moisture Buffering Potential Of Hemp in Combination with Lime and Clay-Based Binders (Wilkinson, Simon) [77]

Na základě všech prostudovaných informací byli vybráni zástupci obnovitelných a rychle obnovitelných surovin. Pro další výzkum bylo vybráno dřevo - smrkové jako zástupce jehličnatých dřevin. Použití této suroviny ve stavebních výrobcích má od nepaměti velmi dobré výsledky. Dřevo má v mnoha stavebních výrobcích nenahraditelné prvenství. Jako zástupce rychle obnovitelných surovin byla vybrána sláma a technické konopí. Sláma je v našich zeměpisných šířkách hojně produkována a její aplikace do stavebních prvků není ve velikém měřítku. Je používána především ve formě celých balíků, ne pouze jednotlivá stébla slámy. Technické konopí je znovu objevená rostlina, která si nachází široké uplatnění ve stavebních výrobcích po celém světě. Technické konopí má velmi podstatnou výhodu, a to že je bezezbytku využitelné a recyklovatelné. Pro vývoj výplňových hmot se konopí jeví jako perspektivní materiál nejen pro jeho již známé použití v obdobných materiálech, ale také proto, že produkce konopí začíná po několika letech úpadku zase stoupat. Pro potřeby výzkumu bylo vybráno konopí ze dvou různých zemí, a to z České republiky, ve dvou různých frakcích od dvou různých pěstitelů, a konopí dovezené z Francie, kde je známo pod obchodním názvem Chanvribat.

Pro nahrazení části pojivové složky výplňových hmot byli vybráni zástupci druhotných surovin z provozů elektráren a tepláren na území ČR. Do prvotní fáze

výzkumu byl vybrán vysokoteplotní popílek z Dětmarovic, Chvaletic, Ledvic a teplárny Krnov, fluidní popílek z Hodonína, Poříčí, Tisové a teplárny Olomouc, dále byla využita struska NH Ostrava. Podrobné zkoušení vlastností navržených surovin a zhodnocení vhodnosti použití ve výplňových hmotách bylo provedeno v následující etapě.

Převážná část první etapy je zpracována na začátku této disertační práce v kapitolách 2., 3. a 4.

7.2. VYHODNOCENÍ II. ETAPY „ZKOUŠENÍ VLASTNOSTÍ VSTUPNÍCH SUROVIN“

Na základě podrobné rešeršní činnosti v předešlé etapě vyla vybrána sada zástupců obnovitelných a druhotných surovin. Tito zástupci byli podrobeni řadou základních zkoušek pro ověření jejich vlastnosti a vhodnosti použití ve struktuře výplňových hmot.

7.2.1. PŘÍRODNÍ RYCHLE OBNOVITELNÉ MATERIÁLY

7.2.1.1. STANOVENÍ ZÁKLADNÍCH VLASTNOSTÍ SUROVIN A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Přírodní obnovitelné materiály pro výzkum byly dodány v suchém stavu v definovaných délkách jednotlivých částic tak, jak jsou dostupné na našem trhu. Ukázka použitých surovin je na obrázcích níže. Třísky ze smrkového dřeva byly dovezeny z pily v Hranicích na Moravě (obr 41. Konopné pazdeří vyráběné ve Francii a prodávané pod obchodním názvem Chanvribat bude po dobu celého výzkumu označováno písmenkem A (obr 42). Toto konopí se vyznačuje velmi dobrou kvalitou, neobsahuje žádné vlákno a prachové podíly jsou minimální. Velikost a tvar jednotlivých částic je velmi stabilní s každým dodaným vzorkem konopného pazdeří. Dodáváno je ve 200 l průhledných pytlích. Konopí produkované českým pěstitelem na Vysočině ve výzkumu bude dále pod označením B (obr 43). Konopí obsahuje mírný podíl odpadních vláken a prachové složky. Rozměr a tvar jednotlivých částic v dodaných vzorcích byl lehce variabilní. Dodáno bylo v textilních pytlích po cca 100 l. Konopí od pěstitele z jižní Moravy bude pod označením C (obr 44) bylo odebráno přímo od pěstitele do přepravních boxů. Konopí obsahovalo značné znečištění odpadním vláknem a prachem. Tento vzorek konopí obsahoval značnou variabilitu konopného pazdeří. Sláma byla dovezena od pěstitele na jižní Moravě a bylo

nutné ji před použitím nasekat na drobnější částice okolo cca 3 cm (obr 45), jelikož byla dodána v kvádrovém balíku přímo z pole bez jakékoliv předúpravy.



Obr 41: *Třísky ze smrkového dřeva*



Obr 42: *Ukázka konopného pazdeří z Francie – A*



Obr 43: *Ukázka konopného pazdeří z ČR - B*



Obr 44: *Ukázka konopného pazdeří z ČR - C*



Obr 45: *Sláma vlevo při odebrání z kvádrového balíku, vpravo po nasekání*

Stanovení sypné hmotnosti

Tab. 3: *Výsledné sypné hmotnosti surovin*

Vzorek	*Sypná hmotnost [kg.m^{-3}]*
Smrkové třísky	125
Konopí A	108
Konopí B	123
Konopí C	93
Sláma	71

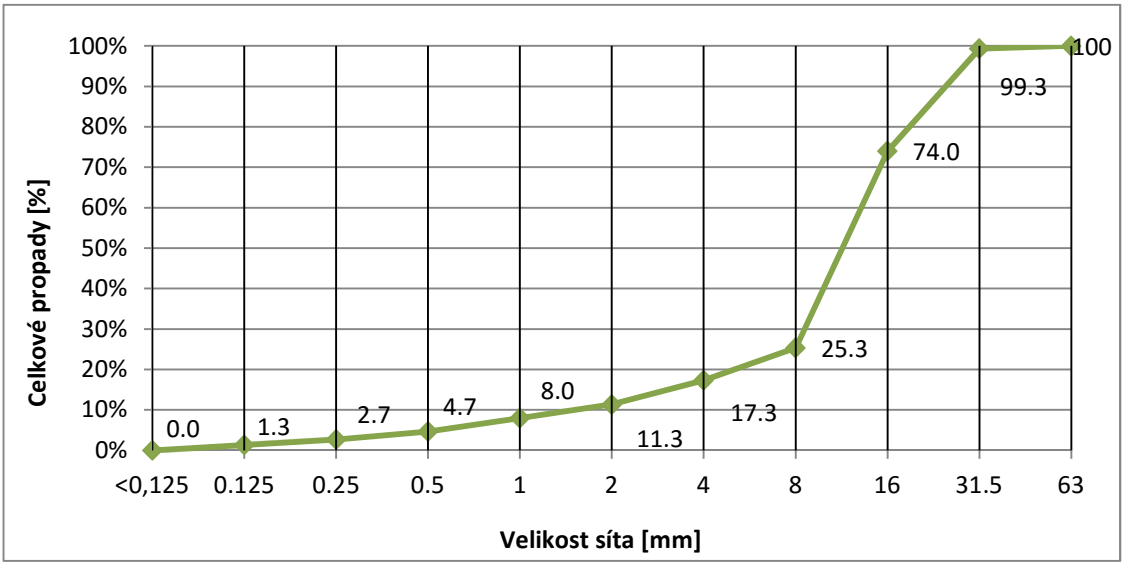
Velikost částic

Velikost částic jednotlivých surovin byla stanovena sítovým rozborem, pro smrkové třísky byla navážka ze 150 g vzorku, pro konopí A 200 g vzorku, konopí B 150 g vzorku

a konopí C 150 g vzorku. Zkouška velikosti částic u slámy nebyla možná z důvodu velké délky jednotlivých částic. Délka vláken se pohybovala v rozmezí 20 až 55 mm.

Tab. 4: *Sítový rozbor smrkových třísek*

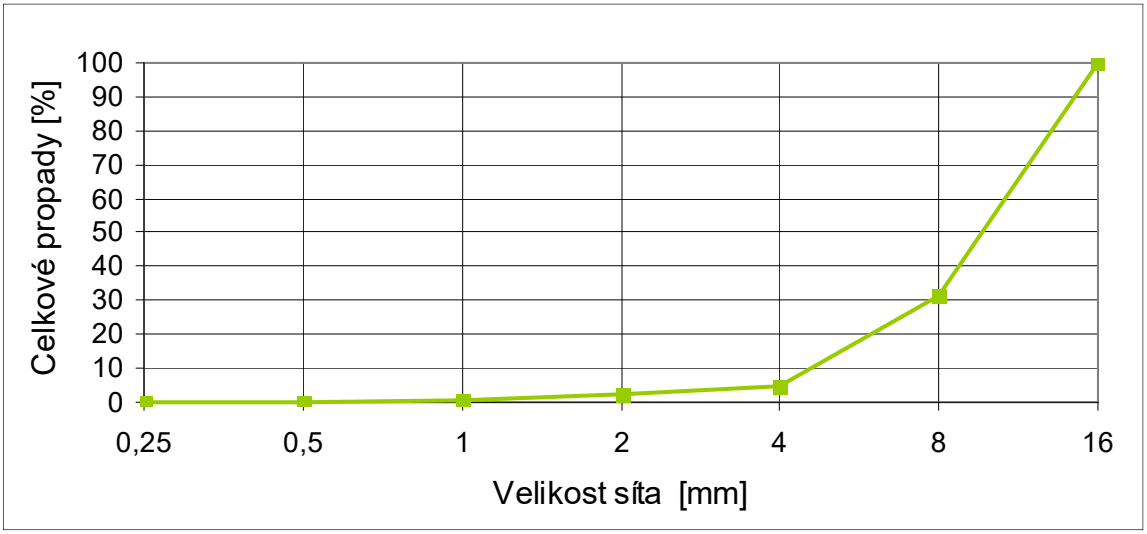
Velikost síta	*Dílčí zbytky*		*Celkové zbytky*	*Celkové propady*
	[g]	*[%]*	*[%]*	*[%]*
63	0	0,0	0,0	100,0
31,5	1	0,7	0,7	99,3
16	38	25,3	26,0	74,0
8	73	48,7	74,7	25,3
4	12	8,0	82,7	17,3
2	9	6,0	88,7	11,3
1	5	3,3	92,0	8,0
0,5	5	3,3	95,3	4,7
0,25	3	2,0	97,3	2,7
0,125	2	1,3	98,7	1,3
<0,125	2	1,3	100,0	0,0
celkem	150	100		



Obr 46: *Graf křivky zrnitosti dřeva*

Tab. 5: *Sítový rozbor konopí A*

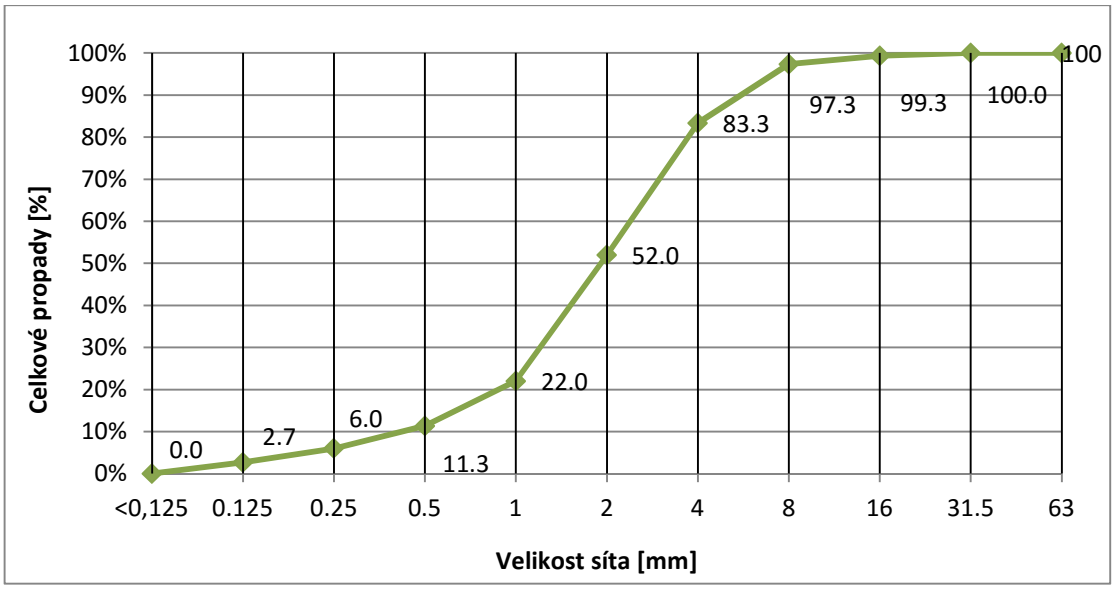
Velikost síta	*Dílčí zbytky*		*Celkové zbytky*	*Celkové propady*
	[g]	*[%]*	*[%]*	*[%]*
16	0	0,0	0,0	100,0
8	137	68,5	68,5	31,5
4	2	26,0	94,5	5,5
2	6	3,0	97,5	2,5
1	4	2,0	99,5	0,5
0,5	1	0, 5	100,0	0,0
0,25	0	0,0	100,0	0,0
celkem	200	100		



Obr 47: *Graf křivky zrnitosti konopí A*

Tab. 6: *Sítový rozbor konopí B*

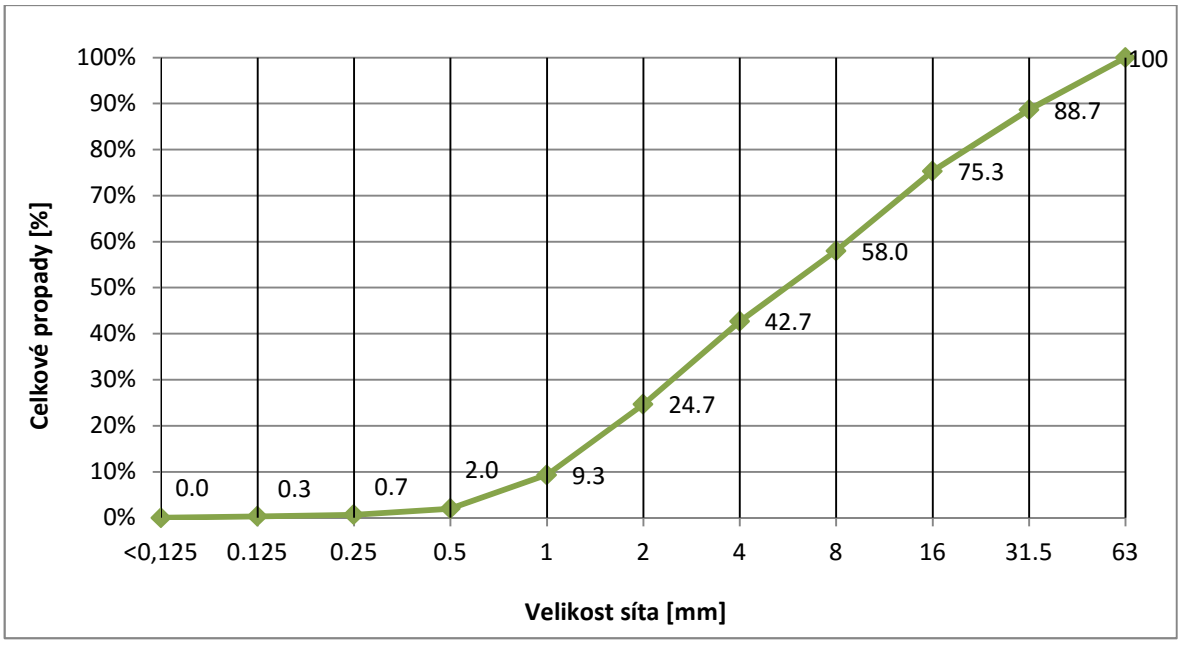
Velikost síta	***Dílčí zbytky***		***Celkové zbytky***	***Celkové propady***
	[g]	***[%]***	***[%]***	***[%]***
63	0	0,0	0,0	100,0
31,5	0	0,0	0,0	100,0
16	1	0,7	0,7	99,3
8	3	2,0	2,7	97,3
4	21	14,0	16,7	83,3
2	47	31,3	48,0	52,0
1	45	30,0	78,0	22,0
0,5	16	10,7	88,7	11,3
0,25	8	5,3	94,0	6,0
0,125	5	3,3	97,3	2,7
<0,125	4	2,7	100,0	0,0
celkem	150	100		



Obr 48: *Graf křivky zrnitosti konopí B*

Tab. 7: *Sítový rozbor konopí C*

Velikost síta	***Dílčí zbytky***		***Celkové zbytky***	***Celkové propady***
	[g]	***[%]***	***[%]***	***[%]***
63	0	0,0	0,0	100,0
31,5	17	11,3	11,3	88,7
16	20	13,3	24,7	75,3
8	26	17,3	42,0	58,0
4	23	15,3	57,3	42,7
2	27	18,0	75,3	24,7
1	23	15,3	90,7	9,3
0,5	11	7,3	98,0	2,0
0,25	2	1,3	99,3	0,7
0,125	0,5	0,3	99,7	0,3
<0,125	0,5	0,3	100,0	0,0
celkem	150	100		



Obr 49: *Graf křivky zrnitosti konopí C*

Stanovení nasákavosti

Tab. 8: *Výsledné nasákavosti jednotlivých surovin*

Vzorek	*Nasákavost [%]*
Smrkové třísky	154
Konopí A	221
Konopí B	265
Konopí C	248
Sláma	187

Zhodnocení dosavadních výsledků

Prvotní testy přírodních obnovitelných surovin poukazují na značnou variabilitu vlastností materiálu na základě porovnání mezi jednotlivými druhy. Při porovnání sypných hmotností je konopí a smrková tříska na porovnatelné úrovni. Oproti tomu sláma má tento parametr značně nižší, což může být způsobeno větší velikostí jednotlivých částic. Všechny dodané suroviny, vyjma slámy, mají velmi podobné zastoupení velikosti částic. Velikost, nebo také délka jednotlivých částic surovin se pohybuje okolo 10 mm. Obecně můžeme konstatovat, že nasákavost přírodních surovin je velmi vysoká. Největších hodnot nasákavosti dosahuje technické konopí, které má velice otevřenou pórovou strukturu. Ovšem tato vlastnost může mít i pozitivní vliv při zabudování do konstrukce. V období se zvýšenou relativní vlhkostí může konopí vodu pojmout do své struktury a v sušším období

ji může zase vracet zpět do místností. Má to bezesporu velice pozitivní vliv na pohodu bydlení v takto tvořených objektech. Pokud bychom chtěli tuto vlastnost ošetřit, můžeme pazdeří technického konopí mineralizovat, a tím uzavřít jeho strukturu. V následujících výzkumech bude tato možnost ověřena mineralizací vápenným mlékem a různou koncentrací sodného vodního skla. Již z prvních výsledků stanovení základních vlastností přírodních surovin můžeme říci, že použití slámy do struktury výplňových hmot nebude zcela vhodné. Především s ohledem na velikost jednotlivých částic a tudíž nutné výrazné předpúpravy např. sekáním.

7.2.1.2. PŘÍPRAVA VÝLUHU A JEHO NÁSLEDNÉ ZKOUŠENÍ

Příprava výluhu

Výluh ze všech přírodních surovin byl proveden stejnou metodou, a to ponořením 1 hm. dílu suroviny do 5 hm. dílů destilované vody. Takto se surovina nechala louhovat po dobu 24 hodin, a poté se přefiltrovala přes velmi hrubý filtrační papír. Vzniklý výluh byl podroben chemické analýze (viz tab. 9 až 13 výsledky jednotlivých surovin). Připravený výluh byl použit jako záměsová voda cementových past. Použit byl portlandský cement CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá. Pro porovnání byl cement pojen i vodou z vodovodního řádu. Kvalitu záměsové vody pro přípravu betonu předepisuje norma ČSN EN 1008 [86]. Požadavky se často přebírají i pro přípravu malt, proto byla tato norma stěžejní pro zhodnocení vhodnosti použití výluhu pro přípravu cementových trámečků.

Chemický rozbor výluhu

Tab. 9: *Výsledky rozboru výluhu smrkových třísek*

Parametr	***Jednotka***	***Naměřené hodnoty***	***Max. hodnoty při vyhovující zkoušce pevnosti v tlaku***	***Splnění kritéria***
pH (25°C)		6,61	≤ 4	Splňuje
dusičnany	mg/l	28,1	≥ 500	Splňuje
chloridy	mg/l	129	≥ 4500	Splňuje
sírany	mg/l	100	≥ 2000	Splňuje
fosforečnany	mg/l	46,8	≥ 100	Splňuje
fosfáty P_2O_5	mg/l	53	≥ 100	Splňuje
oleje a tuky		beze stop	olejový film nebo emulze	Splňuje
čistící prostředky		bez pěny	hodně pěny, stálá nad 2	Splňuje

Parametr	*Jednotka*	*Naměřené hodnoty*	*Max. hodnoty při vyhovující zkoušce pevnosti v tlaku*	*Splnění kritéria*
			minuty	
barva		světle rezavá	tmavá nebo barevná (červená, zelená, modrá)	Splňuje
zápach		st. 3, bez zápachu	-	-
rozptýlené látky		usazenina do 4ml/80ml	-	-
humusovité látky		nelze stanovit	tmavší než žlutohnědé	Splňuje
sodík	mg/l	8	-	-
draslík	mg/l	532	-	-
olovo	mg/l	0,03	-	-
zinek	mg/l	0,4	≥ 100	Splňuje
Na_2O	mg/l	10,8	-	-
K_2O	mg/l	611	-	-
alkálie Na_2O	mg/l	416	-	-
cukry	mg/l	89	≥ 100	Splňuje

Tab. 10: *Výsledky rozboru výluhu konopí A*

Parametr	*Jednotka*	*Naměřené hodnoty*	*Max. hodnoty při vyhovující zkoušce pevnosti v tlaku*	*Splnění kritéria*
pH (25°C)		6,74	≤ 4	Splňuje
dusičnany	mg/l	18,1	≥ 500	Splňuje
chloridy	mg/l	123	≥ 4500	Splňuje
sírany	mg/l	120	≥ 2000	Splňuje
fosforečnany	mg/l	36,8	≥ 100	Splňuje
fosfáty P_2O_5	mg/l	55	≥ 100	Splňuje
oleje a tuky		beze stop	olejový film nebo emulze	Splňuje
čistící prostředky		bez pěny	hodně pěny, stálá nad 2 minuty	Splňuje
barva		rezavá	tmavá nebo barevná (červená, zelená, modrá)	Splňuje
zápach		st. 3, bez zápachu	-	-
rozptýlené látky		usazenina do 4ml/80ml	-	-
humusovité látky		nelze stanovit	tmavší než žlutohnědé	Splňuje
sodík	mg/l	8	-	-
draslík	mg/l	527	-	-
olovo	mg/l	0,06	-	-
zinek	mg/l	0,3	≥ 100	Splňuje
Na_2O	mg/l	10,8	-	-
K_2O	mg/l	635	-	-
alkálie Na_2O	mg/l	429	-	-
cukry	mg/l	50	≥ 100	Splňuje

Tab. 11: *Výsledky rozboru výluhu konopí B*

Parametr	***Jednotka***	***Naměřené hodnoty***	***Max. hodnoty při vyhovující zkoušce pevnosti v tlaku***	***Splnění kritéria***
pH (25°C)		6,51	≤ 4	Splňuje
dusičnany	mg/l	21,2	≥ 500	Splňuje
chloridy	mg/l	143	≥ 4500	Splňuje
sírany	mg/l	131	≥ 2000	Splňuje
fosforečnany	mg/l	34,2	≥ 100	Splňuje
fosfáty P_2O_5	mg/l	57	≥ 100	Splňuje
oleje a tuky		beze stop	olejový film nebo emulze	Splňuje
čistící prostředky		bez pěny	hodně pěny, stálá nad 2 minuty	Splňuje
barva		rezavá	tmavá nebo barevná (červená, zelená, modrá)	Splňuje
zápach		st. 3, bez zápachu	-	-
rozptýlené látky		usazenina do 5ml/90ml	-	-
humusovité látky		nelze stanovit	tmavší než žlutohnědé	Splňuje
sodík	mg/l	9	-	-
draslík	mg/l	512	-	-
olovo	mg/l	0,04	-	-
zinek	mg/l	0,4	≥ 100	Splňuje
Na_2O	mg/l	11,6	-	-
K_2O	mg/l	641	-	-
alkálie Na_2O	mg/l	412	-	-
cukry	mg/l	59	≥ 100	Splňuje

Tab. 12: *Výsledky rozboru výluhu konopí C*

Parametr	***Jednotka***	***Naměřené hodnoty***	***Max. hodnoty při vyhovující zkoušce pevnosti v tlaku***	***Splnění kritéria***
pH (25°C)		6,50	≤ 4	Splňuje
dusičnany	mg/l	20,3	≥ 500	Splňuje
chloridy	mg/l	132	≥ 4500	Splňuje
sírany	mg/l	121	≥ 2000	Splňuje
fosforečnany	mg/l	35,9	≥ 100	Splňuje
fosfáty P_2O_5	mg/l	53	≥ 100	Splňuje
oleje a tuky		beze stop	olejový film nebo emulze	Splňuje
čistící prostředky		bez pěny	hodně pěny, stálá nad 2 minuty	Splňuje
barva		rezavá	tmavá nebo barevná (červená, zelená, modrá)	Splňuje
zápach		st. 3, bez zápachu	-	-
rozptýlené látky		usazenina do 4,5ml/85ml	-	-

Parametr	*Jednotka*	*Naměřené hodnoty*	*Max. hodnoty při vyhovující zkoušce pevnosti v tlaku*	*Splnění kritéria*
humusovité látky		nelze stanovit	tmavší než žlutohnědé	Splňuje
sodík	mg/l	8	-	-
draslík	mg/l	519	-	-
olovo	mg/l	0,06	-	-
zinek	mg/l	0,45	≥ 100	Splňuje
Na_2O	mg/l	11,1	-	-
K_2O	mg/l	639	-	-
alkálie Na_2O	mg/l	431	-	-
cukry	mg/l	56	≥ 100	Splňuje

Tab. 13: *Výsledky rozboru výluhu slámy*

Parametr	*Jednotka*	*Naměřené hodnoty*	*Max. hodnoty při vyhovující zkoušce pevnosti v tlaku*	*Splnění kritéria*
pH (25°C)		6,29	≤ 4	Splňuje
dusičnany	mg/l	28,3	≥ 500	Splňuje
chloridy	mg/l	122	≥ 4500	Splňuje
sírany	mg/l	101	≥ 2000	Splňuje
fosforečnany	mg/l	31,9	≥ 100	Splňuje
fosfáty P_2O_5	mg/l	52	≥ 100	Splňuje
oleje a tuky		beze stop	olejový film nebo emulze	Splňuje
čistící prostředky		bez pěny	hodně pěny, stálá nad 2 minuty	Splňuje
barva		rezavá	tmavá nebo barevná (červená, zelená, modrá)	Splňuje
zápach		st. 3, bez zápachu	-	-
rozptýlené látky		usazenina do 4,5ml/85ml	-	-
humusovité látky		nelze stanovit	tmavší než žlutohnědé	Splňuje
sodík	mg/l	10	-	-
draslík	mg/l	585	-	-
olovo	mg/l	0,02	-	-
zinek	mg/l	0,65	≥ 100	Splňuje
Na_2O	mg/l	9,2	-	-
K_2O	mg/l	539	-	-
alkálie Na_2O	mg/l	331	-	-
cukry	mg/l	36	≥ 100	Splňuje

Všechny vzorky výluhu splňují požadavky pro záměsové vody do betonu nebo malt. V jednotlivých rozborech nejsou veliké rozdíly v množství stanovovaných hodnot. Největší podíl cukrů, které ovlivňují hydrataci a tvrdnutí cementu, je obsaženo ve výluhu

ze smrkových třísek. Naproti tomu nejméně ho má výluh ze slámy. Hodnota pH při 25°C je u všech vzorků výluhů skoro porovnatelná pohybuje se v rozmezí 6,29 – 6,74.

Použití výluhu jako záměsové vody v cementových maltách

Po provedení rozboru výluhů byly použity výluhy pro výrobu cementových past, které byly následně podrobeny zkoušce počátku a doby tuhnutí. Následně byly vyrobeny zkušební tělesa cementových malt, na kterých byly stanoveny fyzikálně-mechanické parametry v intervalu 2, 7, 14, 28 a 60 dnů. Zkušební vzorky byly po odformování uloženy do vodního uložení tvořeného tím výluhem, ze kterého byly vytvořeny.

Stanovení počátku a doby tuhnutí

Všechny výluhy byly použity pro zjištění počátku a doby tuhnutí jimi tvořených past. Sledováním těchto vlastností pozorujeme, zda má výluh vliv na počátek a dobu tuhnutí hydraulických pojiv - cementu.

Množství vody pro kaši normální konzistence bylo stanoveno na vodní součinitel 0,32 pro CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá. Tento vodní součinitel byl dodržen u všech připravovaných past.

Tab. 14: *Výsledky počátků a doby tuhnutí u jednotlivých past*

Vzorek	***Počátek tuhnutí***		***Doba tuhnutí***	
	vzdálenost hrotu jehly nad podložkou [mm]	***čas [min]***	***hloubka průniku [mm]***	***čas [min]***
Pitná voda	4	180	0,5	240
Výluh dřeva	5	235	0,5	380
Výluh konopí A	5	210	0,5	330
Výluh konopí B	6	215	0,5	345
Výluh konopí C	4	205	0,5	310
Výluh slámy	5	195	0,5	275

Z výsledků je jasně patrné, že výluh z přírodní suroviny má vliv na stanovení počátku a doby tuhnutí. Ve všech případech použití výluhu se doba počátku prodloužila oproti referenční záměsové vodě. Nejdelší prodleva nastala u vzorků výluhů ze smrkového dřeva, tato skutečnost je bezesporu způsobena obsahem ligninu a polysacharidu ve dřevní hmotě. Tyto látky zapříčinily prodloužení počátku a doby tuhnutí i u výluhů z technického konopí. Výluh se slámy sice prodloužil měřené hodnoty, ovšem nepatrně s porovnáním

pitné vody. Tyto zjištěné skutečnosti přispěly k určení možné doby odformování zkušebních vzorků, předešlo se tak k případné deformaci zkušebních těles.

Stanovení fyzikálně-mechanických vlastností cementových malt

V průběhu zrání cementových trámečků byl do všech uložených prostředí přidáván výluh z té konkrétní suroviny, ze které byl tvořen, aby nedocházelo k vysychání trámečků. Výluh byl prováděn stále stejným způsobem jako na začátku experimentu. Před samotnou zkouškou byl zkušební vzorek vyjmut z uložení, lehce osušen a podroben zkoušení sledovaných parametrů. S posledním vyjmutým zkušebním vzorkem bylo uložení již značně biologicky degradováno. Všechny výluhy měly zapáchající charakter a dosahovaly až zahnědlou barvu. Uložení vzorků nebylo uzavřeno od okolního prostředí, takže po čase cca 50 dní začalo pomalu docházet k anaerobnímu hnití výluhu. Toto prostředí ovšem nemělo vliv na kvalitu povrch a rozměrovou stabilitu zkušebních vzorků.

Tab. 15: *Výsledky měřených vlastností cementových malt v čase*

Složení	***Doba zkoušení***	***Objemová hmotnost***	***Pevnost v tahu za ohybu***	***Pevnost v tlaku***
		[kg.m^{-3}]	***[N.mm^{-2}]***	***[N.mm^{-2}]***
Pitná voda	2 dny	1943	3,7	25,7
	7 dnů	2043	4,6	36,5
	14 dnů	2035	6,7	34,4
	28 dnů	2019	13,4	46,1
	60 dnů	2019	8,2	45,8
Výluh dřeva	2 dny	1968	4,6	27,2
	7 dnů	1971	3,2	42,8
	14 dnů	2047	7,1	38,3
	28 dnů	2018	9,5	43,3
	60 dnů	2031	6,5	42,4
Výluh konopí A	2 dny	1988	4,6	25,7
	7 dnů	1985	2,6	31,9
	14 dnů	1994	6,5	37,4
	28 dnů	2069	8,9	48,8
	60 dnů	2070	7,8	50,8
Výluh konopí B	2 dny	2259	6,2	28,9
	7 dnů	2215	6,6	36,4
	14 dnů	2206	7,4	45,2
	28 dnů	2191	8,8	48,9
	60 dnů	2134	9,2	50,2

Složení	*Doba zkoušení*	*Objemová hmotnost*	*Pevnost v tahu za ohybu*	*Pevnost v tlaku*
		[kg.m^{-3}]	*[N.mm^{-2}]*	*[N.mm^{-2}]*
Výluh konopí C	2 dny	2132	5,9	25,7
	7 dnů	2108	6,7	33,7
	14 dnů	2077	7,5	44,8
	28 dnů	2068	7,2	46,7
	60 dnů	2055	7,6	46,3
Výluh slámy	2 dny	1951	4,4	26,5
	7 dnů	1972	3,0	38,4
	14 dnů	1949	7,1	42,6
	28 dnů	2000	11,7	43,3
	60 dnů	2016	8,1	44,2

Tab. 16: *Vyhodnocení kritérií daných normou ČSN EN 196-1 [81] pro konkrétní cement*

Vzorek	*Pevnostní třída cementu*	*Pevnost v tlaku [N.mm^{-2}]*				*Vyhodnocení*
		Počáteční pevnost		*Normalizovaná pevnost*		
		2 dny	*7 dnů*	*28 dnů*		
Požadavky	42,5 R	≥20	-	≥42,5	≤62,5	
Pitná voda	42,5 R	25,7	-	46,1		splňuje
Výluh dřeva	42,5 R	27,2	-	43,3		splňuje
Výluh konopí A	42,5 R	25,7	-	48,8		splňuje
Výluh konopí B	42,5 R	28,9	-	48,9		splňuje
Výluh konopí C	42,5 R	25,7	-	46,7		splňuje
Výluh slámy	42,5 R	26,5	-	46,3		splňuje

Z výsledků je patrné, že druh použitého výluhu z přírodní suroviny nemá výrazný vliv na konečné vlastnosti fyzikálně-mechanických vlastností cementových malt. Dle tabulky 16 můžeme vidět, že všechny vzorky cementových malt splňují požadavky dané normou pro konkrétní cement CEM I.

Na základě všech provedených stanovení vlastností přírodních obnovitelných surovin můžeme konstatovat, že použití těchto materiálů v cementové matrici je možné a lze je zabudovat do struktury výplňových hmot. Nejlepších vlastností ve všech ohledech, tedy s přihlédnutím k dlouhodobějšímu pozorování pevnostních charakteristik má konopí s označením A. Toto konopí bude použito do struktury výplňových hmot. Další obnovitelnou surovinou použitou pro návrh receptur výplňových hmot bude konopí B. Toto konopí má sice největší procento nasákavosti, ale ostatní vlastnosti jsou na velmi dobré úrovni. Na tomto konopí se alespoň nejlépe ověří vliv mineralizace. Smrkové třísky

dále použity nebudou. Byly podrobeny zkoušení základních parametrů především pro srovnání vůči konopí a slámě. Od počátku zahájení prací bylo preferováno použití technického konopí. Pro další výzkum výplňových hmot nebude dále použita ani sláma z důvodu dlouho trvající a ne zcela vhodné předúpravy plniva. Pro širší použití ve stavební praxi by představovala mechanická předúprava plniva pořízení rozdružovacích strojů, čímž by se zhoršila především ekonomická výhodnost této suroviny. Dosavadní produkce této suroviny je pouze ve formě balíků. Pazdeří technického konopí má nespornou výhodu, že je produkováno dodavateli přímo v odpovídající délce jednotlivých částic, tudíž není potřeba žádná další mechanická úprava.

7.2.2. DRUHOTNÉ SUROVINY

V následujících tabulkách a grafu jsou uvedeny výsledky analyzování vybraných potenciálně vhodných alternativních surovin z druhotných zdrojů, které se jeví jako vhodné pro modifikaci složení pojivové složky výplňových hmot. Chemická analýza a ostatní uváděné vlastnosti byly stanovovány na různých vzorcích odebraných z elektráren nebo tepláren v průběhu jednoho roku. Minimální počet odběrů a zkoušek jednotlivých popílků byl 3x v průběhu let 2010 – 2011, tabulky 17, 18, 19 a 20 tedy obsahují průměrné zastoupení jednotlivých složek v průběhu sledovaného období

Chemická analýza

Tab. 17: *Výsledky chemických analýz vybraných druhotných surovin*

Chemické složení [%]		***SiO_2***	***CaO***	***Al_2O_3***	***Fe_2O_3***	***P_2O_5***	***MgO***	***MnO***	***K_2O***	***Na_2O***	***ZŽ***
Vzorek											
Popílek	Ledvice	53,20	1,25	31,60	6,00	0,15	1,04	0,03	1,02	< 0,8	0,83
	Chvaletice	54,10	3,10	24,90	11,17	0,17	1,52	0,10	1,33	< 0,8	1,15
	Dětmarovice	52,40	4,40	23,90	7,14	0,40	2,34	0,10	2,80	< 0,91	3,37
	Teplárna Vítkovice	43,85	4,18	15,85	6,26	<0,03	1,85	0,52	2,02	< 0,72	21,13
	Hodonín Filtr	33,10	23,77	17,70	7,52	0,28	4,65	0,09	0,88	< 1	4,49
	Hodonín Lože	41,85	18,18	18,80	5,58	0,18	2,39	0,04	1,12	< 1	3,56
	Poříčí Filtr	35,25	25,80	19,60	5,68	0,29	0,81	0,06	1,25	< 0,8	5,90
	Poříčí Lože	35,65	24,45	17,15	6,48	0,30	0,93	0,09	1,33	< 0,7	4,32
	Tisová Filtr	36,05	20,14	23,00	7,00	0,36	0,80	0,06	0,54	< 0,9	3,12
	Tisová Lože	28,45	31,23	17,10	5,76	0,37	0,52	0,08	0,59	< 0,67	1,96
	Teplárna Olomouc Filtr	39,40	13,77	25,75	8,82	0,85	2,38	0,07	1,35	< 1	1,92

Chemické složení [%]		*SiO_2*	*CaO*	*Al_2O_3*	*Fe_2O_3*	*P_2O_5*	*MgO*	*MnO*	*K_2O*	*Na_2O*	*ZŽ*
Vzorek											
	Teplárna Olomouc Lože	31,75	27,01	18,10	5,64	0,94	1,37	0,06	1,49	< 1	1,36
Struska NH Ostrava		32,40	35,70	10,70	1,30	1,40	11,00	0,12	1,20	0,7	4,30

Výsledné chemické analýzy jednotlivých surovin poukazují na značnou variabilitu složení surovin. Pro potřeby aplikace druhotné suroviny do struktury výplňových hmot bude dobré, když bude mít druhotná suroviny, co nejvíce volného CaO, které by mohlo dobře spolupůsobit s pojivovou složkou hmot. Nebo by mohla přispívat k dodatečné mineralizaci plnivové složky.

Měrná hmotnost, sypná hmotnost, měrný povrch

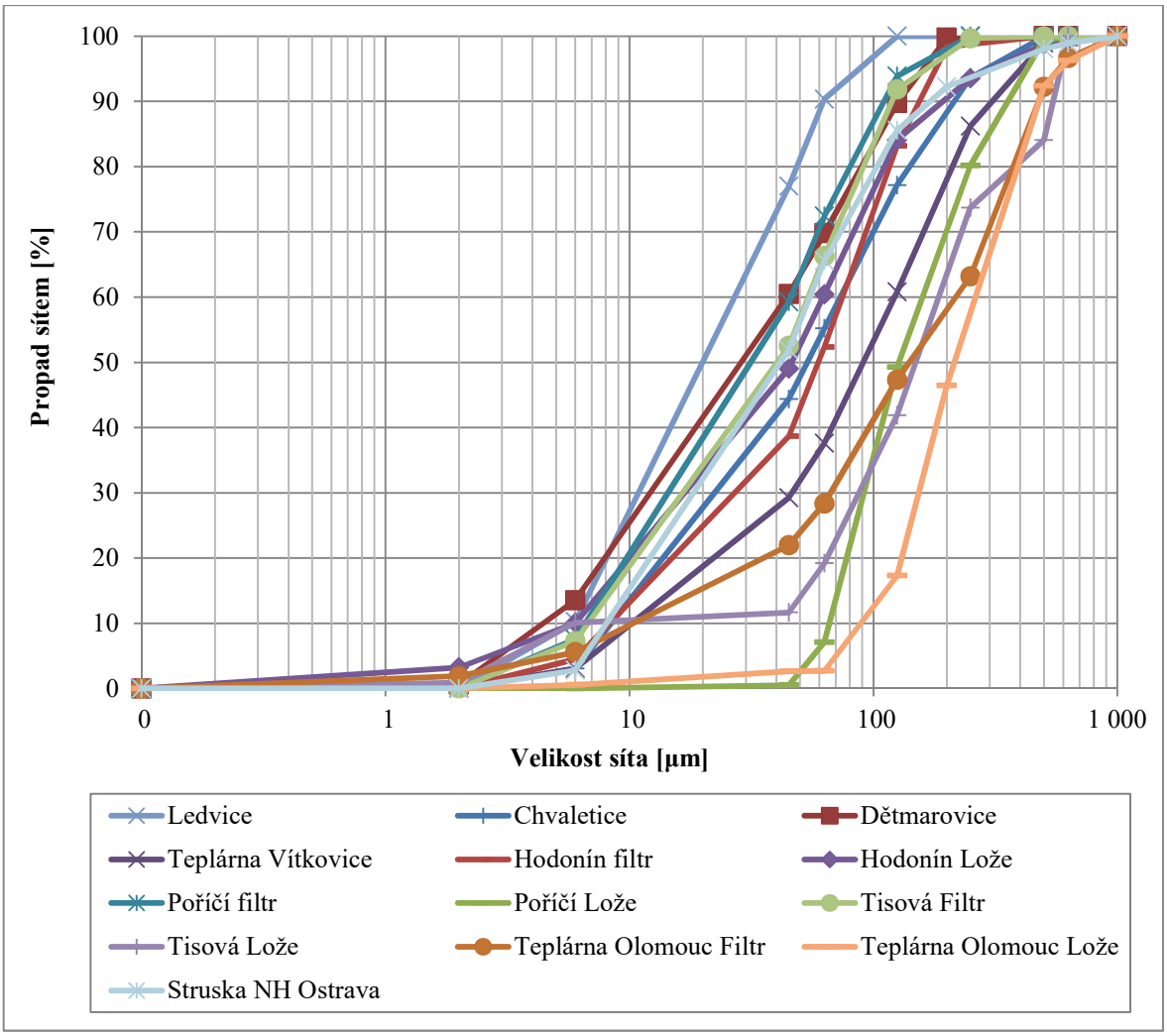
Tab. 18: *Výsledky stanovení měrné a sypné hmotnosti a měrného povrchu vybraných druhotných surovin*

Druhotná surovina		*Měrná hmotnost*	*Sypná hmotnost volná*	*Sypná hmotnost setřesená*	*Měrný povrch*
		[kg/m^3]	*[kg/m^3]*	*[kg/m^3]*	*[m^2/kg]*
Popílek	Ledvice	2192	685	935	378
	Chvaletice	2235	736	994	334
	Dětmarovice	2250	753	1070	362
	Teplárna Vítkovice	2435	685	840	245
	Hodonín Filtr	2568	493	691	291
	Hodonín Lože	2300	945	1056	249
	Poříčí Filtr	2679	593	856	347
	Poříčí Lože	2711	876	1268	285
	Tisová Filtr	2808	538	817	361
	Tisová Lože	2820	1236	1335	249
	Teplárna Olomouc Filtr	2735	590	815	278
	Teplárna Olomouc Lože	2912	1274	1381	215
Struska NH Ostrava		2350	1390	1600	364

Stanovení velikosti částic

Tab. 19: *Jednotlivé hodnoty pro stanovení velikosti částic druhotných surovin*

Druhotná surovina		***Velikost sít oka [µm] / jednotlivé celkové propady [%]***									
		0.1	***2***	***6***	***45***	***63***	***125***	***250***	***500***	***630***	***1000***
Popílek	Ledvice	0,00	0,02	1,21	6,26	7,69	15,77	41,31	77,07	86,16	95,70
	Chvaletice	0,00	0,00	3,05	44,37	55,20	77,16	93,62	99,92	100,00	100,00
	Dětmarovice	0,00	0,64	13,53	60,47	69,78	89,72	99,75	100,00	100,00	100,00
	Teplárna Vítkovice	0,00	0,03	3,08	29,25	37,57	60,78	86,20	98,95	99,86	100,00
	Hodonín filtr	0,00	0,04	4,48	38,65	52,35	83,17	98,37	100,00	100,00	100,00
	Hodonín Lože	0,00	0,00	0,00	0,16	4,39	38,16	68,80	97,58	99,12	100,00
	Poříčí filtr	0,00	0,04	7,55	59,22	72,42	93,87	100,00	100,00	100,00	100,00
	Poříčí Lože	0,00	0,00	0,00	0,51	7,12	49,27	80,16	99,43	99,84	100,00
	Tisová Filtr	0,00	0,05	7,28	52,52	66,28	91,81	99,67	99,97	100,00	100,00
	Tisová Lože	0,00	0,00	0,92	10,07	11,65	19,20	41,90	73,71	84,05	100,00
	Teplárna Olomouc Lože	0,00	0,01	0,56	2,64	2,71	17,31	46,45	92,36	96,24	100,00
	Teplárna Olomouc Filtr	0,00	1,92	5,57	21,97	28,36	47,33	63,16	92,21	96,65	100,00
Struska NH Ostrava		0,13	1,08	1,95	7,78	14,45	34,45	48,10	97,20	100,00	100,00



Obr 50: *Výsledné křivky stanovení velikosti částic vybraných druhotných surovin*

Mineralogické složení

Tab. 20 *Výsledky mineralogického rozboru vybraných druhotných surovin*

Mineralogické složení [%]		***Identifikovaný minerál***
Vzorek		
Popílek	Ledvice	mullit, hematit, křemen, maghemit, magnetit, anortit, ortoklas, albit, amorfní fáze (39,5 %)
	Chvaletice	křemen, mullit, maghemit, amorfní fáze (63,2 %)
	Dětmarovice	křemen, mullit, hematit, maghemit, anortit, sanidin, amorfní fáze (54,6 %)
	Teplárna Vítkovice	mullit, křemen, maghemit, amorfní fáze (25,6 %)
	Hodonín Filtr	křemen, hematit, mullit, maghemit, anortit, amorfní fáze (38,9 %)
	Hodonín Lože	křemen, hematit, mullit, maghemit, ortoklas, anortit, amorfní fáze (45,6 %)
	Poříčí Filtr	živce, illit, muskovit, křemen, hematit, vápno, kalcit, anhydrit, sádrovec, amorfní fáze (41,4 %)

Mineralogické složení [%]		***Identifikovaný minerál***
Vzorek		
	Poříčí Lože	křemen, hematit, živce, muskovit, vápno, anhydrit, sádrovec, amorfní fáze (35,2 %)
	Tisová Filtr	maghemit, křemen, mullit, hematit, magnetit, anortit, ortoklas, albit, amorfní fáze (63,8 %)
	Tisová Lože	hematit, křemen, živce, albit, kalcit, sádrovec, amorfní fáze (39,5 %)
	Teplárna Olomouc Filtr	křemen, mullit, hematit, maghemit, anortit, sanidin, amorfní fáze (50,6 %)
	Teplárna Olomouc Lože	hematit, křemen, mullit, maghemit, anortit, amorfní fáze (28,9 %)
Struska NH Ostrava		gehlenit, akermanit, melilit, wollastonit, magnetit, hematit, cristoballit, amorfní fáze (72,8 %)

Z výsledků analýz je patrné, že vzorky popílků a vysokopecní strusky se vyznačují variabilními parametry. Z hlediska jejich pozitivního vlivu na hydrataci pojiva výplňových hmot je podstatná kombinace všech zkoumaných parametrů. Zejména se pak jedná o obsah amorfní fáze, SiO_2 a CaO, příp. Al_2O_3 a Fe_2O_3. Pro korektní posouzení bude nutné vybrané zástupce testovat přímo v matrici výplňových hmot formou stanovení základních materiálových charakteristik. V případě aplikace do matrice výplňových hmot bude u některých surovin třeba zvážit možnost případné předúpravy granulometrického složení.

Na základě všech vlastností zkoumaných druhotných surovin a s ohledem na jejich dostupnost na trhu byly pro následný vývoj výplňových hmot vybrány tyto druhotné suroviny: filtrový popílek z teplárny Olomouc, popílek Dětmarovice, Chvaletice a filtrový popílek z Hodonína a také struska NH Ostrava. Tyto suroviny budou použity jako náhrada části pojivové složky výplňových hmot do množství max. 20 % z celkového objemu pojiva.

7.3. VYHODNOCENÍ III. ETAPY „NÁVRH A ZÁKLADNÍ ZKOUŠENÍ RECEPTUR“

Na základě předešlých etap bylo přistoupeno k návrhu receptur výplňových hmot. Nejprve bylo definováno, pro jaké účely by měly výsledné výplňové hmoty sloužit a na základě to ho, se stanovily minimální parametry vlastností, jakých by měly výsledné výplňové hmoty dosahovat.

Dle rešeršních poznatků výše uvedených v práci se kombinací vápenného pojiva s konopným pazdeřím dosahuje velmi dobrých tepelně-izolačních vlastností ovšem při

nižší pevnosti v tlaku. Proto je nutné používat nosnou rámovou konstrukci po menších vzdálenostech. V práci vyvíjené výplňové hmoty musí splňovat dobré tepelně-technické parametry, ale s vyšší pevností v tlaku a dobrými trvanlivostními parametry. Vývojem takovéto hmoty by se mohla doposud nutná rámová konstrukce z větší části nebo i zcela vypustit a byla by nahrazena samonosnou výplňovou hmotou. Tato hmota by se ukládala do bednění a po technologické přestávce by se bednění sundalo a konstrukce tvořená touto hmotou by se omítla vápennou nebo vápenocementovou omítkou. Na základě těchto požadavků byly stanoveny minimální parametry základních vlastností výplňových hmot pro použití ve svislých konstrukcích takto:

Pevnost v tlaku: min. 1,5 $N.mm^{-2}$

Součinitel tepelné vodivosti: max. 0,1$W.m^{-1}.K^{-1}$

Pro použití ve vodorovných konstrukcích takto:

Pevnost v tlaku: min. 1 $N.mm^{-2}$

Součinitel tepelné vodivosti: max. 0,07 $W.m^{-1}.K^{-1}$.

Pro přehledné zpracování výsledků jednotlivých zjištění bylo nutné rozdělit III. etapu experimentálních prací vývoje výplňových hmot z obnovitelných zdrojů surovin ještě na další podetapy.

7.3.1. 1. ETAPA – ZÁKLADNÍ RECEPTURY

V první fázi byly navrženy čtyři základní receptury s využitím vybraných pojiv (portlandský cement CEM I 42,5 R cementárna Mokrá, vápenný hydrát velmi jemný CL 90 Carmeuse s.r.o. z vápenky Mokrá) pro ověření spolupůsobení složky plniva s pojivem. Základní receptury výplňových hmot byly sestaveny především na základě vyhodnocení teoretické části práce. Na základě prostudování dostupných informací o složení různých materiálů, ve kterých je obsažena přírodní surovina pojena anorganickou maltovinou. První receptura byla převzata z nalezených podkladů předešlých výzkumů výplňových hmot na bázi technického konopí. Druhá a třetí receptura vychází z první s postupným zvyšováním plnivové složky. Maximální dávka plniva 30 % ve struktuře hmot byla stanovena experimentálním pokusem zamíchání jednotlivých složek a vyrobení zkušebního tělesa. Při vyšším podílu plniva než 30 % už nebylo dosaženo homogenního promísení jednotlivých složek hmot a docházelo k rozpadu zkušebního tělesa. Jednotlivé částice plniva nebyly rovnoměrně obaleny pojivovou složkou a tím nedocházelo k jejich

vzájemnému propojení. Poslední receptura je převzata od největšího zahraničního producenta hrázděných staveb, který jako plnivo používá pazdeří technického konopí. Složení jednotlivých receptur je popsáno v tabulce 21.

Tab. 21: *Složení základních receptur v hmotnostních %.*

Receptura	***Plnivo***	***Pojivo***	***Voda***
1	15 %	44 %	41 %
2	25 %	30 %	45 %
3	30 %	35 %	35 %
4	16 %	36 %	48 %

Pojivo bylo navrženo ve dvou procentuálních podílech vápenného hydrátu k cementu. Pro dosažení co nejlepších výsledných fyzikálně-mechanických parametrů výplňových hmot.

I. 75 % vápenný hydrát a 25 % cementu

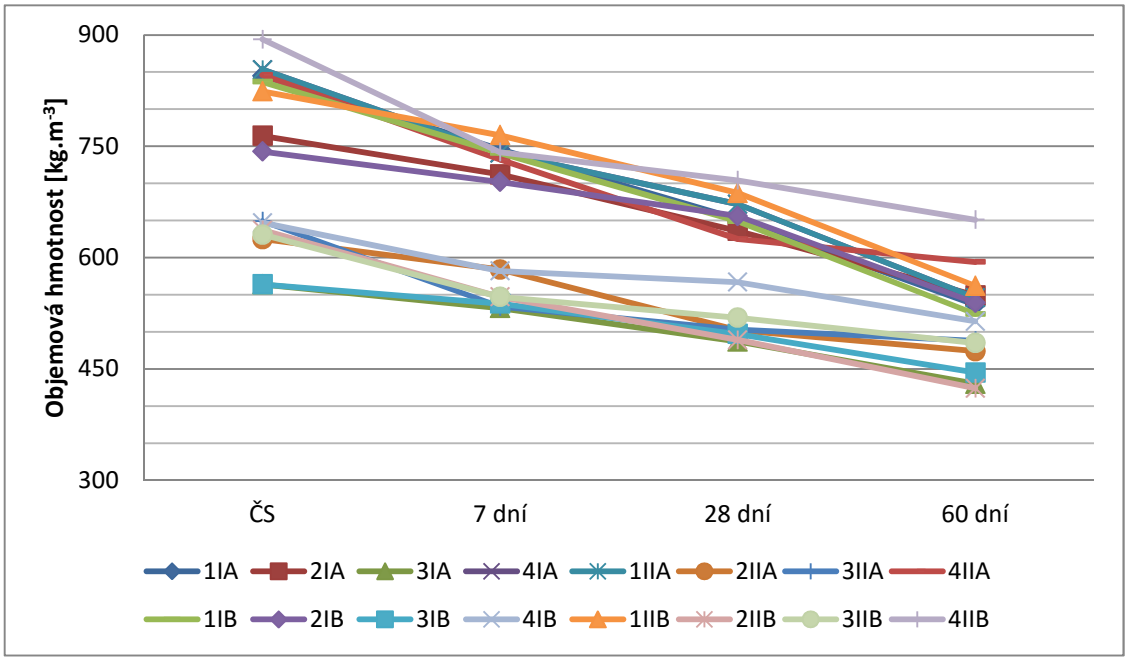
II. 60 % vápenný hydrát a 40 % cementu

Pro lepší orientaci v recepturách a jejich stanovovaných vlastnostech bylo navrženo přehledné značení jednotlivých receptur, které bylo dodrženo po celou dobu experimentálních prací. V této etapě tedy byla např. zkoušena receptura s označením 1IA jednalo se tedy o recepturu, která sestávala z 1. receptury s použitím I. složení pojivové složky a plnivem bylo konopí pod označením A. Z takto složených receptur byla vytvořena zkušební tělesa, která byla podrobena zkouškám objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku a součinitelem tepelné vodivosti. Zkoušení probíhalo po 7, 28 a 60 dnech zrání, součinitel tepelné vodivosti byl sledován po 28 dnech zrání a vzorek byl vysušen do konstantní hmotnosti. Výsledky jednotlivých zkoušek jsou uvedeny v tabulce 22.

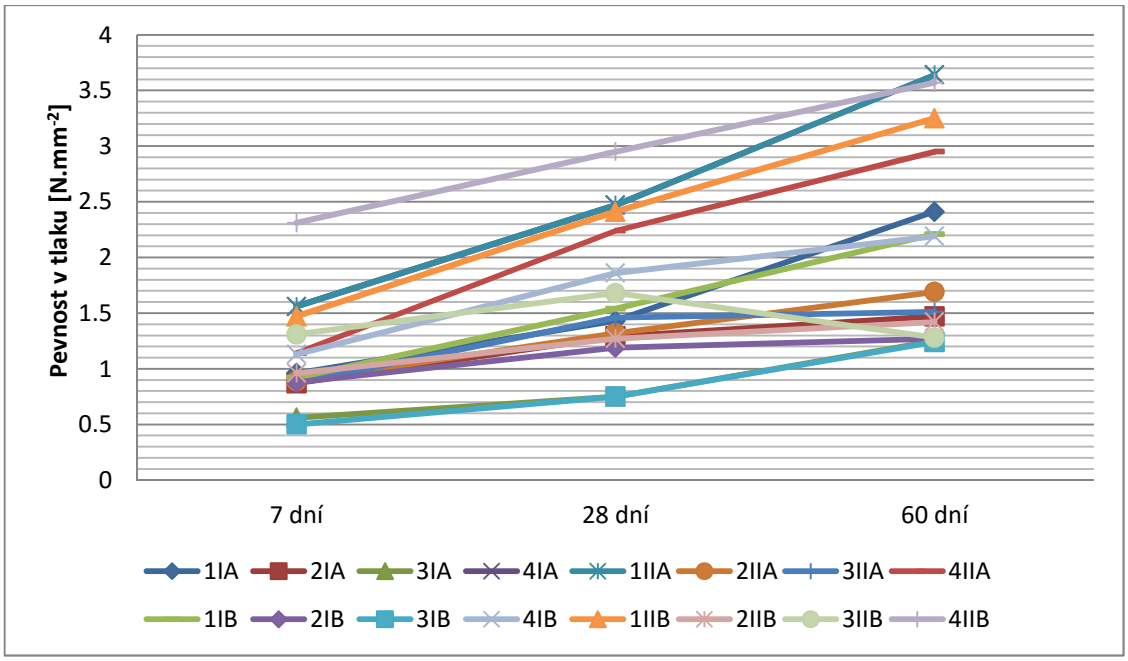
Tab. 22: *Výsledky jednotlivých zkoušek navržených receptur v 1. etapě*

Receptura	***Objemová hmotnost [kg.m^{-3}]***				***Pevnost v tlaku [N.mm^{-2}]***			***Součinitel tepelné vodivosti [W.m^{-1}K^{-1}]***
	ČS	***7 dní***	***28 dní***	***60 dní***	***7 dní***	***28 dní***	***60 dní***	***28 dní***
1IA	845	746	652	536	0,96	1,43	2,41	0,0851
2IA	764	712	636	549	0,87	1,29	1,47	0,0725
3IA	564	532	487	430	0,56	0,75	1,25	0,0635
4IA	689	634	582	527	0,79	1,27	2,21	0,0842
1IIA	853	741	672	546	1,56	2,47	3,64	0,0852
2IIA	625	584	502	474	0,89	1,32	1,69	0,0724
3IIA	649	534	503	488	0,87	1,46	1,51	0,0789

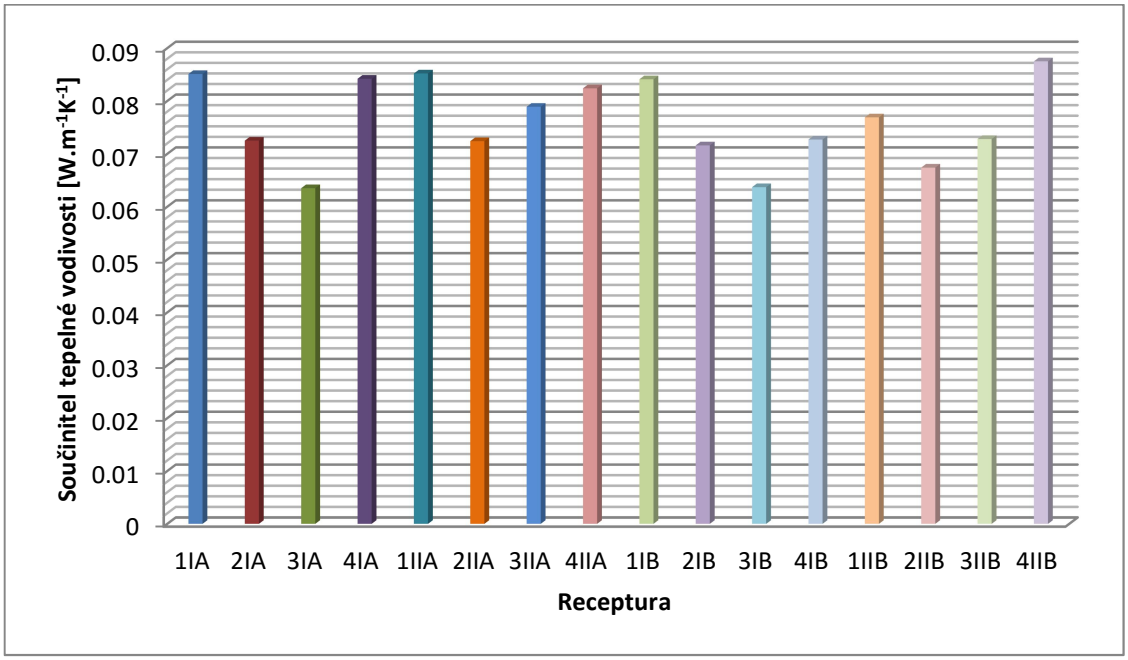
Receptura	*Objemová hmotnost [kg.m^{-3}]*				*Pevnost v tlaku [N.mm^{-2}]*			*Součinitel tepelné vodivosti [W.m^{-1}K^{-1}]*
	ČS	*7 dní*	*28 dní*	*60 dní*	*7 dní*	*28 dní*	*60 dní*	*28 dní*
4IIA	846	732	625	594	1,14	2,24	2,95	0,0824
1IB	837	741	649	524	0,92	1,54	2,21	0,0841
2IB	743	702	656	539	0,88	1,19	1,27	0,0716
3IB	564	538	497	445	0,5	0,75	1,24	0,0637
4IB	647	582	567	514	1,13	1,86	2,19	0,0727
1IIB	824	765	687	562	1,47	2,41	3,25	0,0769
2IIB	637	547	489	424	0,96	1,27	1,42	0,0674
3IIB	631	547	519	485	1,31	1,68	1,28	0,0728
4IIB	894	742	704	651	2,31	2,95	3,57	0,0875



Obr 51: *Grafické porovnání objemových hmotností navržených receptur v čase*



Obr 52: *Grafické porovnání pevností v tlaku navržených receptur v čase*



Obr 53: *Grafické porovnání součinitele tepelné vodivosti po 28 dnech zrání*

Výsledné zhodnocení podetapy 1.

Prvním krokem při vyhodnocení navržených receptur bylo přistoupení ke zhodnocení míchacího procesu hmot, následné ukládání do forem a hutnění zkušebních vzorků. U receptury 3. obsahující nejvyšší dávku plniva probíhala homogenizace směsi značně problematicky. Při míchání nedocházelo k rovnoměrnému promísení jednotlivých složek a tím vznikaly shluky plniva ne zcela obaleného pojivem. To do značné míry ovlivňovalo

výslednou rozměrovou stabilitu zkušebních vzorků. Se vzorky od této receptury se muselo pracovat značně opatrně, aby nedocházelo k jejich poškození. Výsledky fyzikálně-mechanických vlastností u této receptury nejsou tedy nikterak překvapující, řadí se k těm nejnižším. Oproti tomu výsledný součinitel tepelné vodivosti patří mezi nejlepší v porovnání se všemi ostatními recepturami. Pro další výzkum nebude tato receptura s ohledem na její pracné promísení složek a dosahované vlastnosti použitelná. Nejlepší homogenizace jednotlivých složek ve směsi dosahovaly receptury 1. a 4. Obě tyto receptury vykazovaly dobré fyzikálně-mechanické vlastností a to i při zachování nízkého součinitele tepelné vodivosti. Práce s těmito recepturami byla dobrá, jelikož obě obsahovaly vyšší dávku pojiva a vody což přispělo k rovnoměrnému obalení jednotlivých částic plniva a tím vytvoření homogenní struktury výsledných zkušebních vzorků. Složení pojivové složky u jednotlivých receptur nikterak výrazně neovlivnilo mísení směsí, přípravu zkušebních vzorků a ani tepelně-technické vlastnosti. Rozdíly byly znatelné až při zkoušení fyzikálně-mechanických vlastností hmot. Dle předpokladu vzorky s vyšším podílem cementu dosahovaly lepších pevnostních charakteristik.

Na závěr můžeme konstatovat, že čím vyšší dávka plniva ve směsi, tím horší homogenizace a fyzikálně-mechanické vlastnosti, ale lepší součinitel tepelné vodivosti. S vyšší dávkou pojiva a vody se směs lépe homogenizovala, ukládala a hutnila do zkušebních forem. Výsledná zkušební tělesa měla dobrou rozměrovou stabilitu i se vzrůstající dobou zrání a dosahovala lepších parametrů pevností. S vyšším přídavkem cementu dosahovaly vzorky vynikajících parametrů ovšem při nepatrném zhoršení tepelně-izolačních vlastností. Receptury 1. a 4. dosáhly takových výsledných vlastností, že splňují podmínky na parametry hmot použitelných pro svislé konstrukce. Všechny navržené receptury potom splňují parametry pro použití na vodorovné konstrukce. Při zhodnocení použitého plniva musíme konstatovat, že plnivo tvořené konopím A dosahovalo lepších fyzikálně-mechanických parametrů. Ovšem konopí B dosahovalo lepších tepelně-technických vlastností, což je zapříčiněno již výše zmíněným vyšším obsahem zbytkových vláken oproti konopí A. Pro další vývoj výplňových hmot byly použity receptury 1IIA a 4IIB pro použití ve svislých konstrukcích, dále 2IA a 2IIB pro použití ve vodorovných konstrukcích.

7.3.2. 2. ETAPA – MINERALIZACE PLNIVA

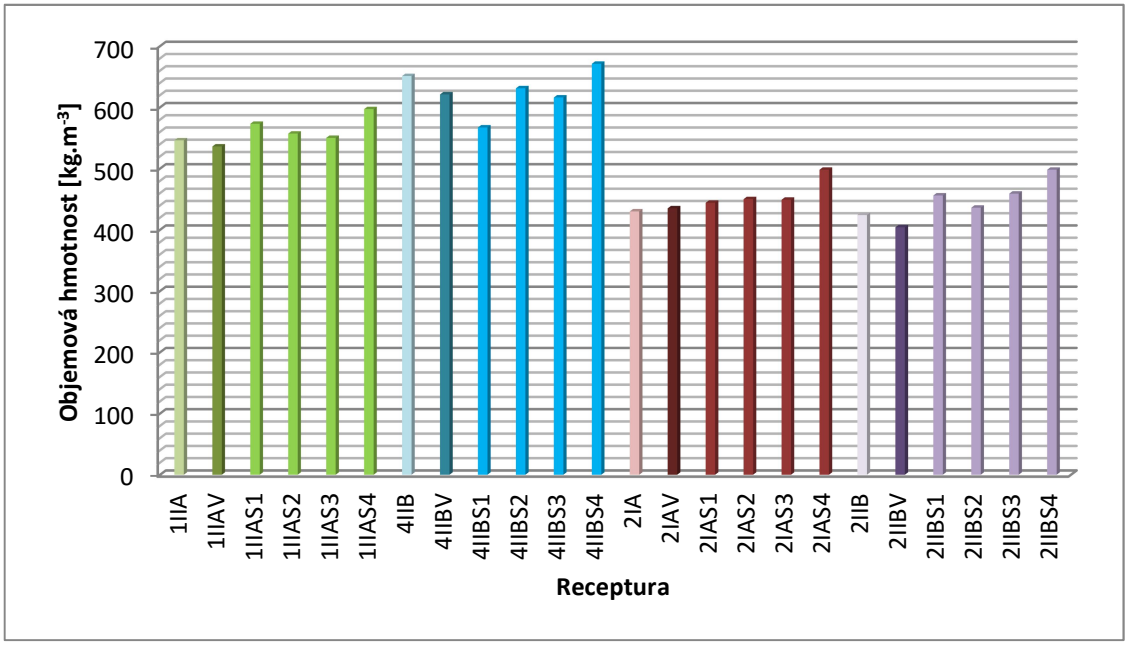
Na základě výsledků prvních 16 receptur byly vybrány 4, u kterých bylo přistoupeno k jednotlivým optimalizacím pro zlepšení konečných vlastností výplňových hmot. Jednalo

se především o cestu použití mineralizace plnivové složky pro zlepšení přilnavosti plniva k pojivu a také pro omezení nasákavosti plniva, pro lepší zpracovatelnost směsi výplňových hmot a zlepšení konečných vlastností hmot. Mineralizace konopného plniva byla navržena dvojím způsobem a to mineralizací vápenným mlékem (označení v recepturách jako V) a sodným vodním sklem v koncentraci 8, 10, 12 a 14 % (označení v recepturách S1, S2, S3, S4). Mineralizace plniva probíhala vždy 24 hodin před začátkem výroby zkušebních těles výplňových hmot. Mineralizace byla provedena nezbytným množstvím roztoku pro nasáknutí všech otevřených pórů plniva. Tím došlo k omezení nasákavosti jednotlivých částic plniva a zlepšení propojení jednotlivých složek výplňových hmot. Všechny nové zkušební vzorky byly vytvořeny stejným způsobem míchání a ukládání do forem. Na všech vyrobených zkušebních tělesech byla zkoušena objemová hmotnost čerstvé směsi a poté po 7, 28 a 60 dnech zrání. Taktéž byla zkoušena i pevnost v tlaku a součinitel tepelné vodivosti po 28 dnech ve vysušeném stavu. Výsledné parametry jednotlivých receptur jsou uvedeny v tabulce 23.

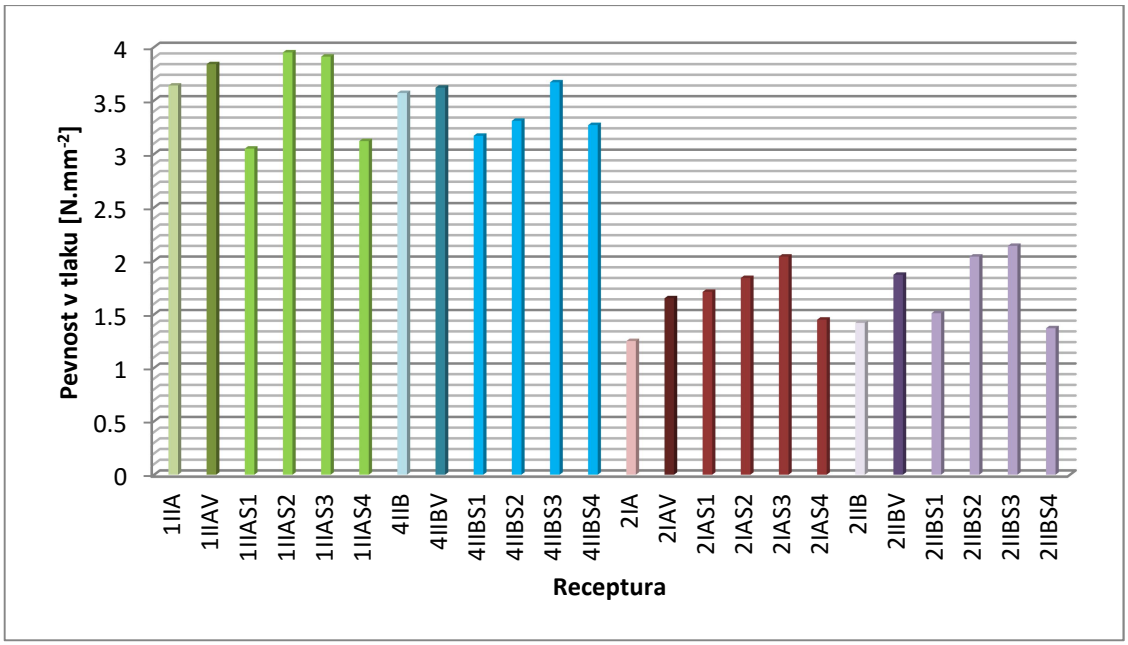
Tab. 23: *Výsledky jednotlivých zkoušek navržených receptur v 2. etapě + výsledky výchozích základních receptur*

Receptura	***Objemová hmotnost [kg.m^{-3}]***				***Pevnost v tlaku [N.mm^{-2}]***			***Součinitel tepelné vodivosti [W.m^{-1}K^{-1}]***
	ČS	***7 dní***	***28 dní***	***60 dní***	***7 dní***	***28 dní***	***60 dní***	***28 dní***
1IIA	853	741	672	546	1,56	2,47	3,64	0,0852
1IIAV	827	704	627	536	1,75	2,67	3,84	0,0822
1IIAS1	834	718	652	573	1,41	2,17	3,05	0,0818
1IIAS2	852	728	669	557	2,62	3,47	3,95	0,0864
1IIAS3	846	712	649	550	1,67	2,75	3,91	0,0849
1IIAS4	884	737	663	597	1,37	2,21	3,12	0,0952
4IIB	894	742	704	651	2,31	2,95	3,57	0,0875
4IIBV	818	722	674	621	2,67	3,02	3,62	0,0865
4IIBS1	819	723	640	567	1,32	2,39	3,17	0,0884
4IIBS2	829	737	717	631	2,03	2,75	3,31	0,0862
4IIBS3	849	763	740	616	2,13	2,59	3,67	0,0884
4IIBS4	904	822	744	671	2,19	2,49	3,27	0,0938
2IA	564	532	487	430	0,56	0,75	1,25	0,0635
2IAV	571	539	477	435	0,96	1,26	1,65	0,0626
2IAS1	561	528	497	444	1,07	1,29	1,71	0,0637
2IAS2	576	563	502	450	1,12	1,46	1,84	0,0674
2IAS3	569	527	487	449	1,27	1,67	2,04	0,0685
2IAS4	603	582	536	498	1,02	1,16	1,45	0,0739
2IIB	637	547	489	424	0,96	1,27	1,42	0,0674
2IIBV	631	539	481	404	1,14	1,49	1,87	0,0661

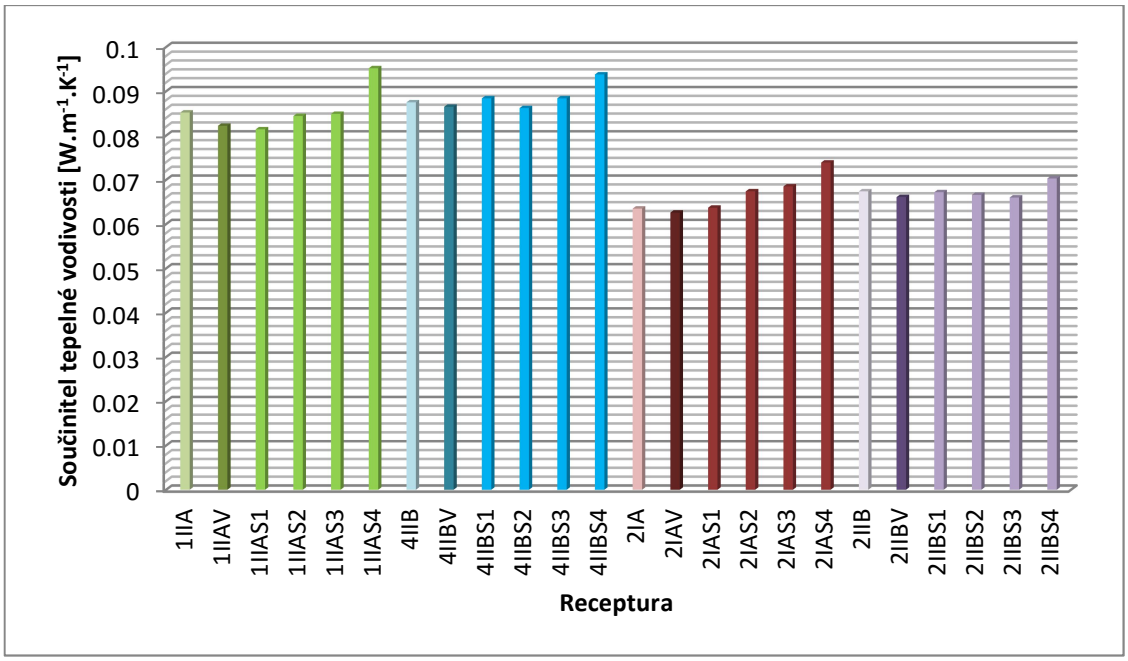
Receptura	Objemová hmotnost [kg.m^{-3}]				Pevnost v tlaku [N.mm^{-2}]			Součinitel tepelné vodivosti [W.m^{-1}K^{-1}]
	ČS	7 dní	28 dní	60 dní	7 dní	28 dní	60 dní	28 dní
2IIBS1	649	573	497	456	1,09	1,34	1,51	0,0672
2IIBS2	655	604	558	436	1,27	1,64	2,08	0,0666
2IIBS3	648	654	503	459	1,34	1,59	2,14	0,0660
2IIBS4	683	612	537	498	0,86	1,21	1,37	0,0703



Obr 54: *Graf porovnání objemových hmotností po 60 dnech zrání navržených receptur v 2. etapě se základní recepturou navrženou v 1. etapě*



Obr 55: *Graf porovnání pevností v tlaku po 60 dnech zrání navržených receptur v 2. etapě se základní recepturou navrženou v 1. etapě*



Obr 56: *Graf porovnání součinitele tepelné vodivosti navržených receptur v 2. etapě se základní recepturou navrženou v 1. etapě*

Výsledné zhodnocení podetapy 2.

Mineralizace konopného plniva měla pozitivní vliv na míchání směsí výplňových hmot i na výrobu zkušebních těles. Všechny zkoušené receptury v této etapě byly dobře zhomogenizovatelné a výroba zkušebních těles se obešla bez výrazných problémů. Pojivo bylo v celém vzorku rozloženo rovnoměrně a jednotlivé částice plniva byly po celém svém objemu obaleny pojivem. Všechny zkušební vzorky hmot měly dobrou rozměrovou stabilitu. Použití vápenného mléka jako mineralizační složky vede ke zlepšení fyzikálně-mechanických i tepelně-technických parametrů výplňových hmot. Použití sodného vodního skla přispívá ke zlepšení parametrů hmot jen do určité procentuelní koncentrace. Nejlepších výsledků dosahovaly vzorky hmot s 10 a 12% roztokem sodného vodního skla. Koncentrace 8 % nevedla k nikterak lepším hodnotám oproti nemineralizovanému plnivu. U koncentrace 14 % došlo k velkému poklesu pevností a navýšení součinitele tepelné vodivosti.

Na základě výsledků můžeme konstatovat, že mineralizace konopného plniva má pozitivní vliv na všechny měřené vlastnosti výplňových hmot. Ovšem je nutno říci, že příprava mineralizace i samotná mineralizace vyžaduje přípravu plniva alespoň 24 hodin před samotným mícháním. Tudíž by se technologické kroky při výstavbě takovýchto konstrukcí prodloužily. Což by ne ve všech případech bylo žádoucí nebo možné. Proto do dalšího výzkumu byla zařazena i receptura bez mineralizace konopného pazdeří (receptura

s označením 1IIA). Na základě všech dosažených výsledků byly vybrány dvě receptury s nejlepším poměrem pevnosti v tlaku k součiniteli tepelné vodivosti pro další vývoj výplňových hmot, a to receptura s označením 4IIBV, 2IIBS3.

7.3.3. 3. ETAPA – OPTIMALIZACE POJIVOVÉ SLOŽKY

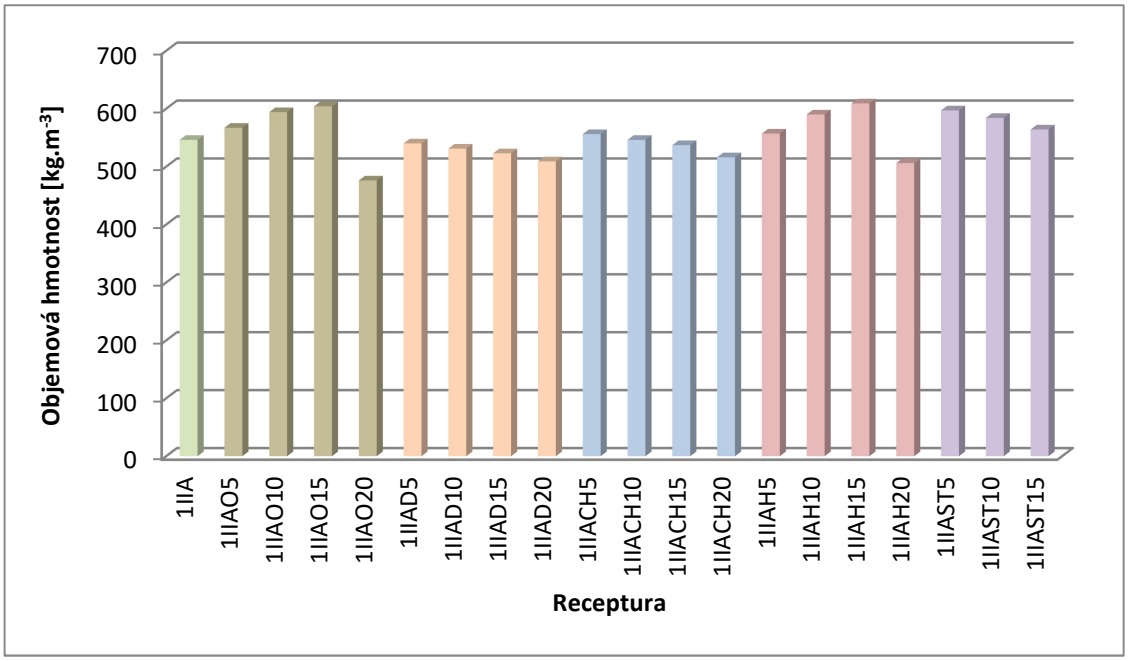
Na základě výsledků 2. Etapy byly vybrány 2 receptury s mineralizovaným plnivem a jedna receptura bez mineralizace vyhodnocena jako nejlepší v 1. etapě, u kterých bylo přistoupeno k nahrazení části pojivové složky druhotnou surovinou. Nahrazení bylo v maximálním množství 20 % z celkového množství pojiva (především z dávky cementu). Bylo odzkoušeno nahrazení v 5, 10, 15 a 20 % pojivové složky. Byl použit filtrový popílek z teplárny Olomouc (označení v recepturách O5, O10, O15 a O20), popílek z elektrárny Dětmarovice (označení v recepturách D5, D10, D15, a D20), popílek z elektrárny Chvaletice (označení v recepturách CH5, CH10, CH15, a CH20), filtrový popílek Hodonín (označení v recepturách H5, H10, CH15, a H20). U použití strusky NH Ostrava bylo přistoupeno k nahrazení pojiva pouze do max. množství 15 % (označení v recepturách ST5, ST10 a ST15). U vyššího podílu nahrazení pojiva touto surovinou by již nemohla být zajištěna lepší ekonomická výhodnost takto tvořených výplňových hmot.

Tab. 24: *Výsledky jednotlivých zkoušek navržených receptu v 3. etapě*

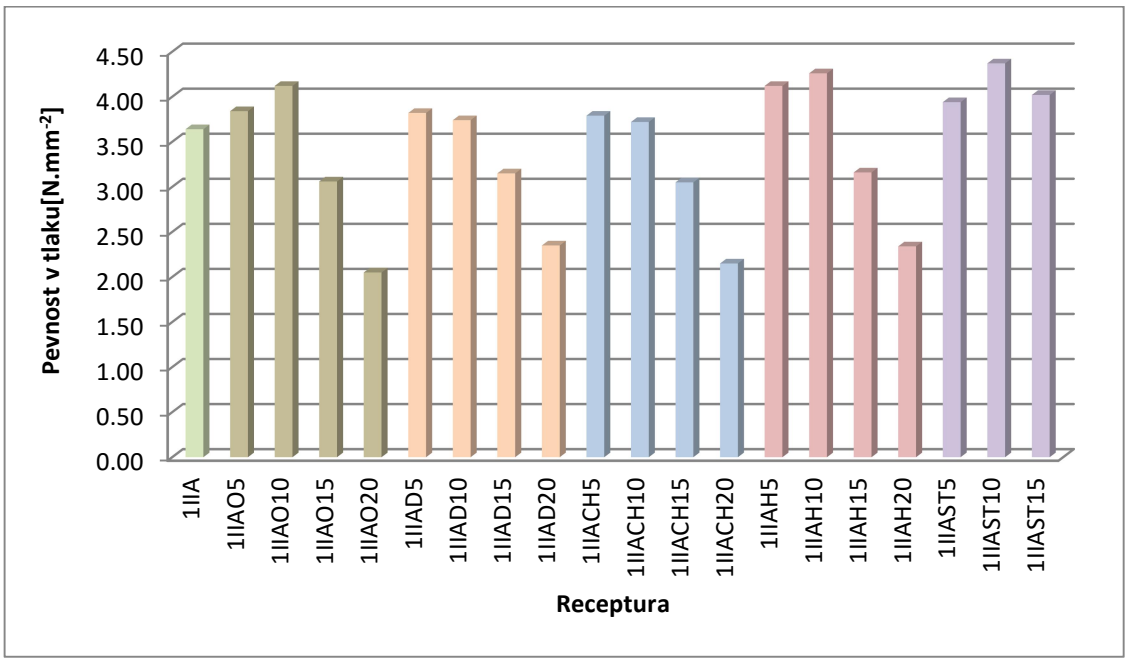
Receptura	***Objemová hmotnost [kg.m^{-3}]***				***Pevnost v tlaku [N.mm^{-2}]***			***Součinitel tepelné vodivosti [W.m^{-1}K^{-1}]***
	ČS	***7 dní***	***28 dní***	***60 dní***	***7 dní***	***28 dní***	***60 dní***	***28 dní***
1IIA	*853*	*741*	*672*	*546*	*1,56*	*2,47*	*3,64*	*0,0852*
1IIAO5	821	762	664	567	2,10	3,12	3,84	0,0832
1IIAO10	726	683	629	594	2,09	3,41	4,12	0,0809
1IIAO15	736	702	667	604	1,76	2,49	3,06	0,0798
1IIAO20	634	587	512	476	1,04	1,64	2,05	0,0776
1IIAD5	676	638	587	540	1,69	3,21	3,82	0,0895
1IIAD10	659	643	594	531	1,54	3,43	3,74	0,0891
1IIAD15	644	612	573	523	1,65	2,85	3,15	0,0863
1IIAD20	639	608	556	509	1,21	2,09	2,35	0,0854
1IIACH5	671	622	574	556	1,89	3,33	3,79	0,0885
1IIACH10	669	637	588	546	1,61	3,52	3,72	0,0892
1IIACH15	649	629	583	537	1,86	2,81	3,05	0,0846
1IIACH20	641	602	564	516	1,34	2,12	2,15	0,0849
1IIAH5	807	754	671	557	2,18	3,22	4,12	0,0842
1IIAH10	718	671	633	590	2,67	3,64	4,26	0,0816
1IIAH15	755	716	658	609	1,81	2,83	3,16	0,0787

Receptura	*Objemová hmotnost [kg.m^{-3}]*				*Pevnost v tlaku [N.mm^{-2}]*			*Součinitel tepelné vodivosti [W.m^{-1}K^{-1}]*
	ČS	*7 dní*	*28 dní*	*60 dní*	*7 dní*	*28 dní*	*60 dní*	*28 dní*
1IIAH20	633	578	533	506	1,22	1,72	2,34	0,0805
1IIAST5	839	739	648	597	2,09	3,42	3,94	0,0794
1IIAST10	841	783	639	584	2,37	3,57	4,37	0,0775
1IIAST15	804	761	628	564	2,19	3,41	4,02	0,0849
4IIBV	*818*	*722*	*674*	*621*	*2,67*	*3,02*	*3,62*	*0,0865*
4IIBVO5	728	683	651	586	2,12	2,89	3,84	0,0851
4IIBVO10	706	675	624	575	2,28	3,34	4,06	0,0816
4IIBVO15	687	635	603	559	1,67	2,86	3,08	0,0824
4IIBVO20	637	548	509	483	1,21	2,09	2,43	0,0808
4IIBVD5	696	655	602	559	1,78	3,41	3,74	0,0885
4IIBVD10	673	653	598	545	1,97	3,38	3,86	0,0871
4IIBVD15	659	627	564	513	1,55	2,75	3,25	0,0862
4IIBVD20	643	604	527	487	1,26	1,86	2,15	0,0859
4IIBVCH5	668	631	569	546	1,74	3,29	3,86	0,0862
4IIBVCH10	672	634	585	532	1,69	3,44	3,74	0,0857
4IIBVCH15	646	622	579	529	2,06	2,73	3,15	0,0852
4IIBVCH20	637	611	566	507	1,49	1,84	2,06	0,0866
4IIBVH5	801	738	660	561	2,22	3,33	4,21	0,0848
4IIBVH10	708	681	637	585	2,81	3,55	4,33	0,0820
4IIBVH15	749	726	662	611	1,99	2,61	3,22	0,0792
4IIBVH20	622	583	543	521	1,09	1,66	2,19	0,0804
4IIBVST5	789	732	664	616	2,55	3,12	3,44	0,0874
4IIBVST10	800	708	655	609	2,82	3,21	3,91	0,0865
4IIBVST15	759	732	651	618	2,02	2,62	3,12	0,0845
2IIBS3	*648*	*654*	*503*	*459*	*1,34*	*1,59*	*2,14*	*0,0660*
2IIBS3O5	627	576	528	435	1,49	1,73	2,26	0,0663
2IIBS3O10	628	576	502	439	1,52	2,01	2,48	0,0657
2IIBS3O15	639	582	541	442	1,35	1,86	2,16	0,0639
2IIBS3O20	616	583	516	420	0,65	0,98	1,29	0,0625
2IIBS3D5	637	598	529	491	1,21	1,86	2,25	0,0665
2IIBS3D10	667	584	521	483	1,36	2,05	2,31	0,0672
2IIBS3D15	661	576	537	498	1,19	1,73	2,06	0,0684
2IIBS3D20	659	591	547	502	0,89	1,28	1,80	0,0673
2IIBS3CH5	667	584	519	497	1,39	1,82	2,33	0,0672
2IIBS3CH10	655	588	527	486	1,42	2,11	2,42	0,0681
2IIBS3CH15	629	572	522	487	1,28	1,69	2,11	0,0674
2IIBS3CH20	655	603	555	511	0,99	1,36	1,94	0,0677
2IIBS3H5	624	588	537	449	1,22	1,66	2,33	0,0623
2IIBS3H10	623	561	511	445	1,33	2,04	2,54	0,0647
2IIBS3H15	627	586	537	439	1,29	1,94	2,22	0,0642
2IIBS3H20	609	574	509	426	0,87	1,13	1,36	0,0629
2IIBS3ST5	666	632	531	463	1,44	1,67	2,21	0,0672

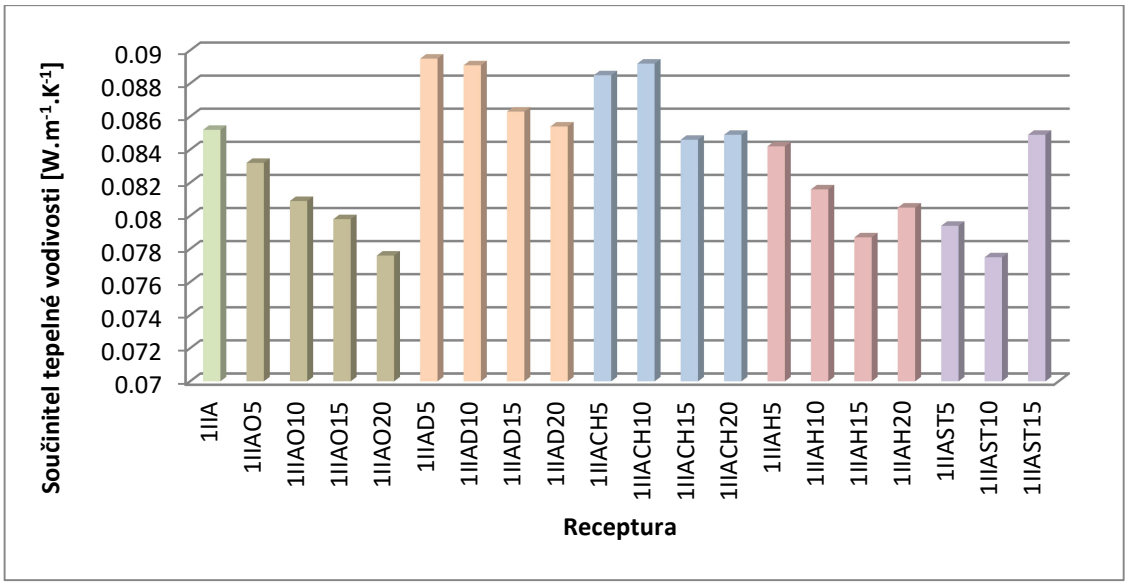
Receptura	*Objemová hmotnost [kg.m^{-3}]*				*Pevnost v tlaku [N.mm^{-2}]*			*Součinitel tepelné vodivosti [W.m^{-1}K^{-1}]*
	ČS	*7 dní*	*28 dní*	*60 dní*	*7 dní*	*28 dní*	*60 dní*	*28 dní*
2IIBS3ST10	673	649	527	479	1,28	1,73	2,36	0,0652
2IIBS3ST15	689	655	513	468	1,08	1,39	1,87	0,0668



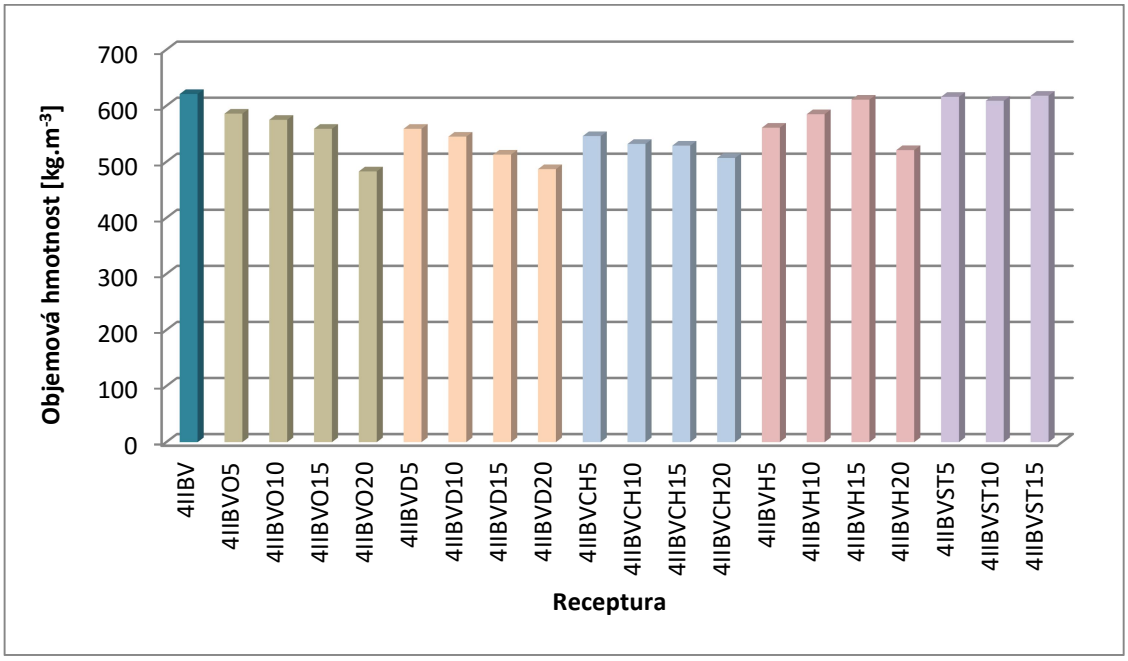
Obr 57: *Graf porovnání objemových hmotností po 60 dnech zrání - optimalizovaná receptura 1IIA*



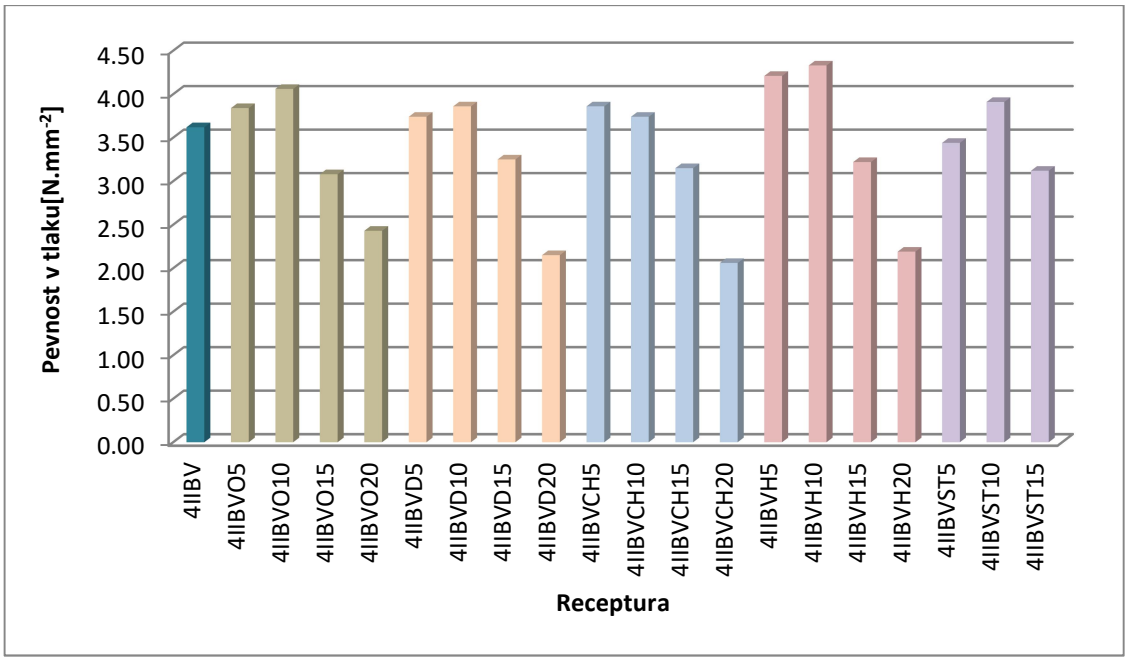
Obr 58: *Graf porovnání pevností v tlaku po 60 dnech zrání - optimalizovaná receptura 1IIA*



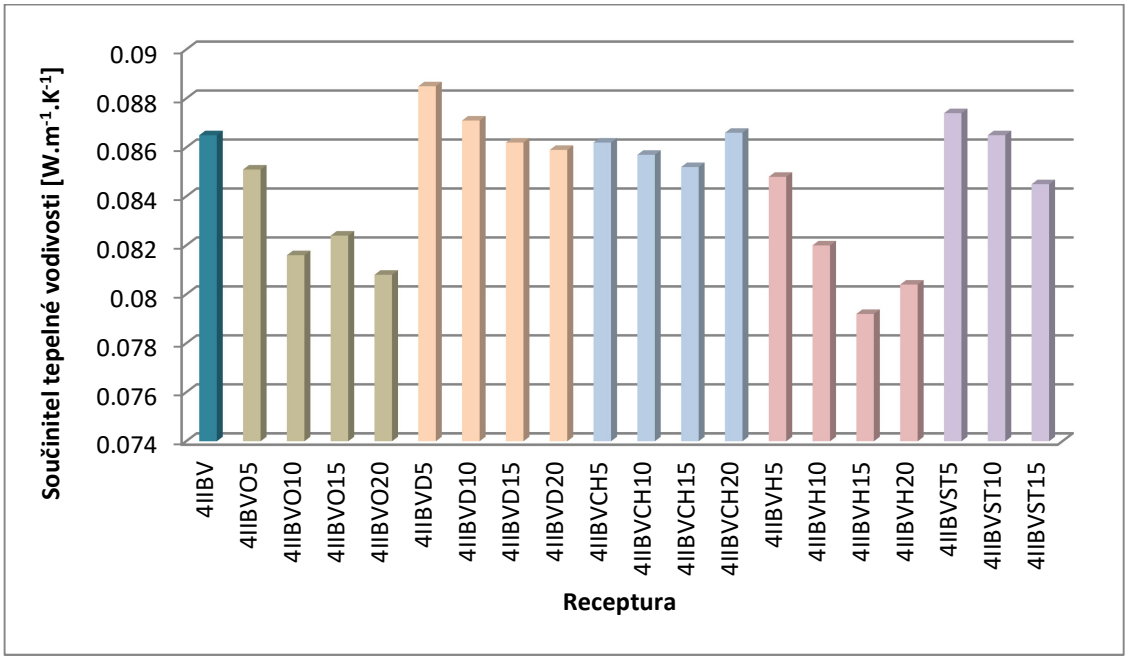
Obr 59: *Graf porovnání součinitele tepelné vodivosti - optimalizovaná receptura 1IIA*



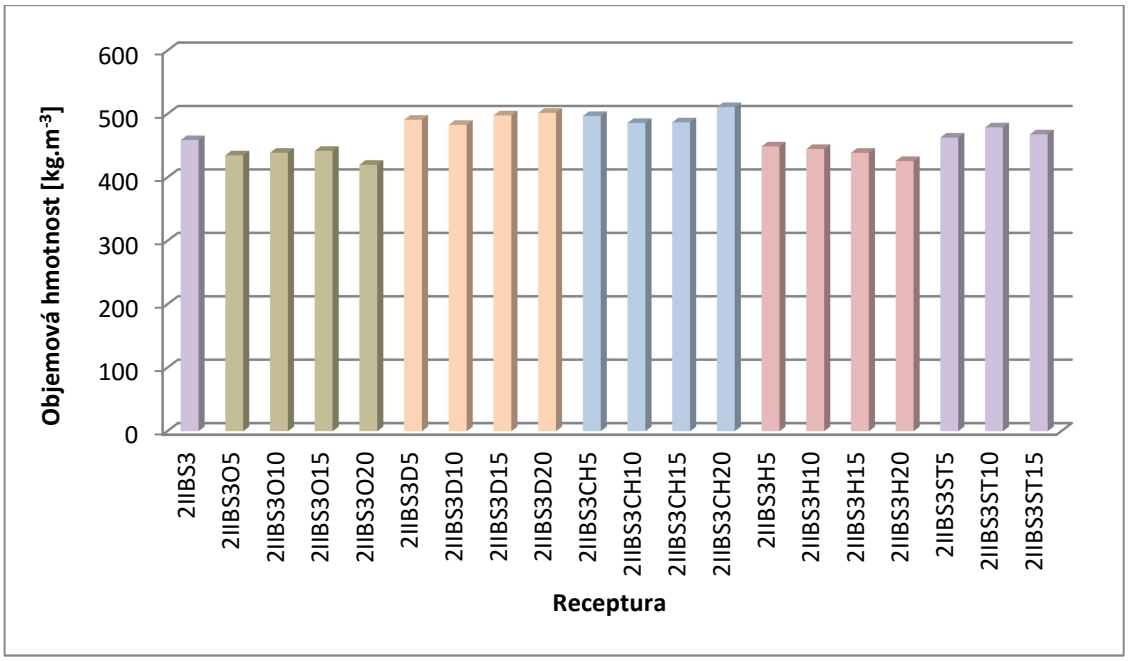
Obr 60: *Graf porovnání objemových hmotností po 60 dnech zrání - optimalizovaná receptura 4IIBV*



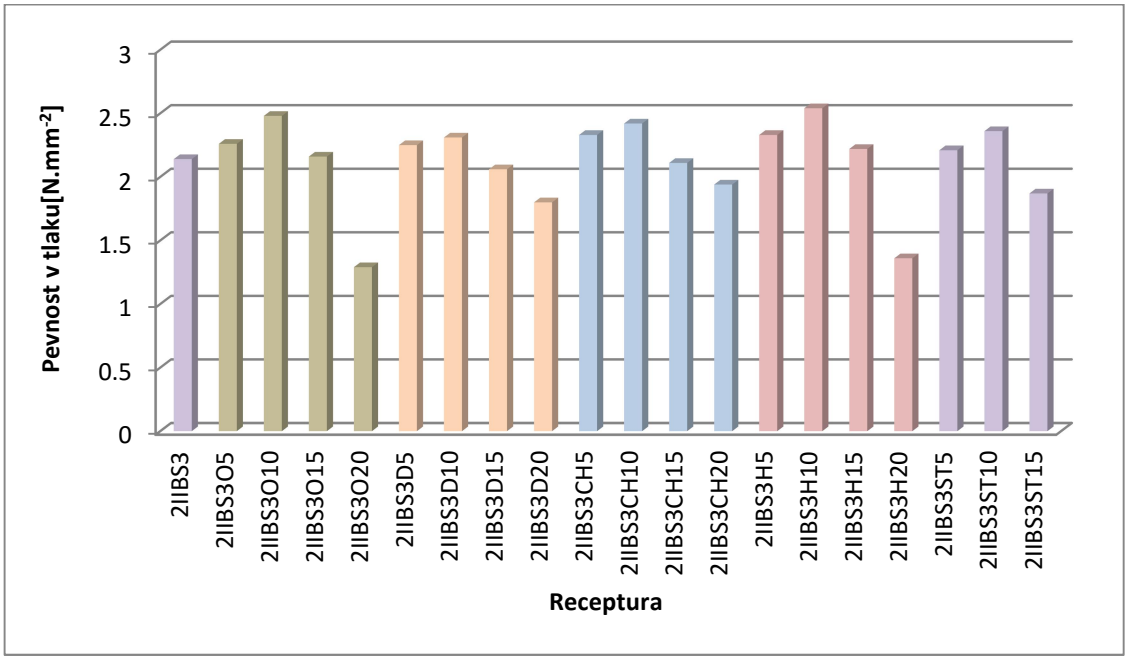
Obr 61: *Graf porovnání pevností v tlaku po 60 dnech zrání - optimalizovaná receptura 4IIBV*



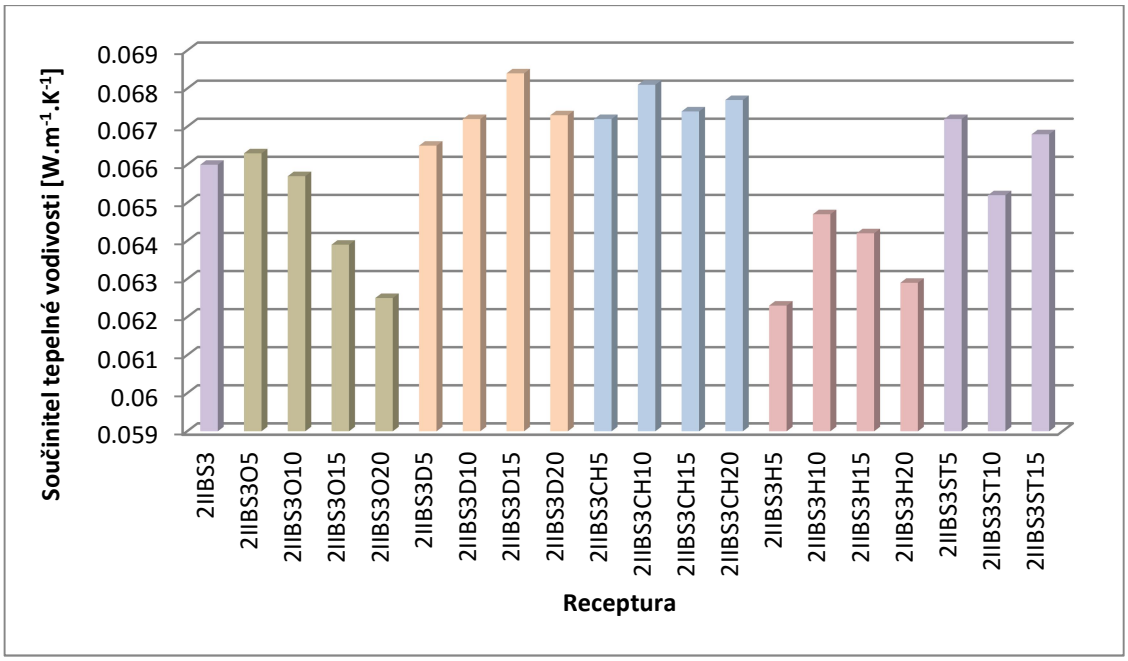
Obr 62: *Graf porovnání součinitele tepelné vodivosti - optimalizovaná receptura 4IIBV*



Obr 63: *Graf porovnání objemových hmotností po 60 dnech zrání - optimalizovaná receptura 2IIBS3*



Obr 64: *Graf porovnání pevností v tlaku po 60 dnech zrání - optimalizovaná receptura 2IIBS3*



Obr 65: *Graf porovnání součinitele tepelné vodivosti - optimalizovaná receptura 2IIBS3*

Výsledné zhodnocení podetapy 3.

Použití filtrového popílku z teplárny Olomouc jako náhrady pojivové složky (převážně cementu) vedlo ke snížení součinitele tepelné vodivosti u všech nahrazovaných podílů zkoušených receptur. Nahrazení pojiva do 10 % popílkem Olomouc přispívá ke zlepšení pevnostních charakteristik o cca 15 % a snížení součinitele tepelné vodivosti o cca 5 %. Vyšší dávka popílku již vedla ke zhoršení pevnostních charakteristik při nepatrném snížení součinitele tepelné vodivosti. Tento trend můžeme pozorovat u všech zkoušených receptur výplňových hmot s použitím mineralizovaného plniva či nikoli.

Užití popílku z elektrárny Dětmarovice jako náhrady části pojivové složky vedlo ke zvýšení pevnostních charakteristik pouze do 5 % a snížení součinitele tepelné vodivosti o cca 5 %. Vyšší dávka popílku již vedla ke zhoršení pevnostních charakteristik při nepatrném snížení součinitele tepelné vodivosti. Tento trend můžeme pozorovat u všech zkoušených receptur výplňových hmot s použitím mineralizovaného plniva či nikoli.

Užití popílku z elektrárny Chvaletice jako náhrady části pojivové složky vedlo ke zvýšení pevnostních charakteristik pouze do 5 % a snížení součinitele tepelné vodivosti o cca 5 %. Vyšší dávka popílku již vedla ke zhoršení pevnostních charakteristik při nepatrném snížení součinitele tepelné vodivosti. Tento trend můžeme pozorovat u všech zkoušených receptur výplňových hmot s použitím mineralizovaného plniva či nikoli.

Použití filtrového popílku z elektrárny Hodonín jako náhrady pojivové složky vedlo ke snížení součinitele tepelné vodivosti u všech nahrazovaných podílů zkoušených

receptur. Nahrazení pojiva do 10 % popílkem Hodonín přispívá ke zlepšení pevnostních charakteristik o cca 17 % a snížení součinitele tepelné vodivosti o cca 7 %. Vyšší dávka popílku již vedla ke zhoršení pevnostních charakteristik při nepatrném snížení součinitele tepelné vodivosti. Tento trend můžeme pozorovat u všech zkoušených receptur výplňových hmot s použitím mineralizovaného plniva či nikoli.

Aplikace strusky NH Ostrava v dávce 10 % do struktury výplňových hmot přispěla ke zlepšení pevnostních charakteristik o cca 20 % a snížení součinitele tepelné vodivosti o cca 10 %. Při vyšší dávce strusky již není zlepšení tak výrazné. Tento trend můžeme pozorovat u všech optimalizovaných zkoušených receptur výplňových hmot.

Obecně lze konstatovat, že použití náhrady pojiva nemělo výrazný vliv na míchání směsí, výrobu ani rozměrovou stabilitu zkušebních těles výsledných hmot. Nahrazení pojiva druhotnou surovinou do určité míry (optimálně 5-10 %) přispívá ke zlepšení fyzikálně-mechanických i tepelně-technických vlastností při pozitivním snížení objemové hmotnosti výsledných výplňových hmot. Ze všech výsledků je patrné, že pro nahrazení části pojivové složky výplňových hmot na bázi přírodních obnovitelných surovin je nejlepší použití fluidních popílků a strusky. Nejlepších výsledků fyzikálně-mechanických parametrů dosahuje nahrazení pojivové složky ve struktuře hmot ve, které nebylo konopí mineralizováno. Použití druhotné suroviny nejspíše přispívá k mineralizaci plniva.

7.4. VYHODNOCENÍ IV. ETAPY „VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ, OPTIMALIZACE RECEPTURY

Náplní této etapy bylo komplexní vyhodnocení výsledků předešlé etapy a návrh optimalizovaných receptur pro další zkoušení potřebných vlastností pro vytvoření uceleného přehledu o vyvinuté výplňové hmotě.

7.4.1. ZHODNOCENÍ POZNATKŮ III. ETAPY

Na základě všech výsledků zkoušek navržených receptur výplňových hmot v III. etapě prací můžeme konstatovat, že:

- zvolené plnivo bylo vybráno vhodně, již základní receptury hmot splňují zadané požadavky na použití ve svislých či vodorovných konstrukcích,
- čím vyšší dávka plniva ve směsi, tím horší homogenizace a fyzikálně-mechanické vlastnosti, ale lepší součinitel tepelné vodivosti,

- s vyšší dávkou pojiva a vody se směs lépe homogenizuje, ukládá a hutní do zkušebních forem,
- zvolené pojivo v kombinaci vápenný hydrát, cement bylo vybráno v dobrých poměrech mísení, pro splnění zadaných požadavků,
- s vyšším přídavkem cementu dosahují vzorky vynikajících pevnostních parametrů ovšem při nepatrném zhoršení tepelně-technických vlastností,
- mineralizace konopného plniva přispívá ke zlepšení výsledných vlastností hmot, ovšem provedení mineralizace vyžaduje přípravu min. 24 hodin před začátkem míchání samotných směsí, což není pro použití do praxe jednoduché a vyžaduje to notnou dávku přesnosti při míchání směsí,
- mineralizační složkou může být stejně dobře vápenné mléko jako 12 % roztok sodného vodního skla,
- druhotné suroviny použité pro výrobu hmot v procentuálním zastoupení do 10 % mohou přispět ke zlepšení fyzikálně-mechanických a tepelně-technických vlastností hmot, nejlepší je použití strusky a fluidních popílků.

7.4.2. NÁVRH OPTIMALIZOVANÝCH RECEPTUR

Díky ucelenému přehledu vlastností všech základních receptur bylo přistoupeno k výběru 7 nejlepších receptur výplňových hmot pro další zkoušení. Vybrány byly receptury 1IIA, 1IIAO10, 1IIAH10, 1IIAST10, 4IIBVH10, 4IIBVST10, 2IIBS3H10. Tyto receptury dosahovaly v základních testech vlastností dobré výsledky, tudíž žádná další optimalizace receptury nebyla nutná.

Popis jednotlivých receptur je následující:

- 1IIA – receptura složená z 15 % plniva, 44 % pojiva a 41 % vody (v % hm.), složení pojiva 60 % vápenný hydrát a 40 % cement, konopí A (původem z Francie), bez mineralizace, bez přídavku druhotné suroviny,
- 1IIAO10 – receptura složená z 15 % plniva, 44 % pojiva a 41 % vody (v % hm.), složení pojiva 60 % vápenný hydrát a 40 % cement, konopí A (původem z Francie), bez mineralizace, nahrazení pojiva 10 % fluidního popílku z teplárny Olomouc,
- 1IIAH10 – receptura složená z 15 % plniva, 44 % pojiva a 41 % vody (v % hm.), složení pojiva 60 % vápenný hydrát a 40 % cement, konopí A (původem z Francie), bez mineralizace, nahrazení pojiva 10 % fluidního popílku z elektrárny Hodonín,

- 1IIAST10 – receptura složená z 15 % plniva, 44 % pojiva a 41 % vody (v % hm.), složení pojiva 60 % vápenný hydrát a 40 % cement, konopí A (původem z Francie), bez mineralizace, nahrazení pojiva 10 % NH struska Ostrava,
- 4IIBVH10 – receptura složená z 16 % plniva, 36 % pojiva a 48 % vody (v % hm.), složení pojiva 60 % vápenný hydrát a 40 % cement, konopí B (původem z ČR), mineralizace vápenným mlékem, nahrazení pojiva 10 % fluidního popílku z elektrárny Hodonín,
- 4IIBVST10 – receptura složená z 16 % plniva, 36 % pojiva a 48 % vody (v % hm.), složení pojiva 60 % vápenný hydrát a 40 % cement, konopí B (původem z ČR), mineralizace vápenným mlékem, nahrazení pojiva 10 % NH struska Ostrava,
- 2IIBS3H10 – receptura složená z 25 % plniva, 30 % pojiva a 45 % vody (v % hm.), složení pojiva 60 % vápenný hydrát a 40 % cement, konopí B (původem z ČR), mineralizace 12 % roztokem sodného vodního skla, nahrazení pojiva 10 % fluidního popílku z elektrárny Hodonín.

7.4.3. ZKOUŠENÍ VLASTNOSTÍ OPTIMALIZOVANÝCH RECEPTUR, VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK

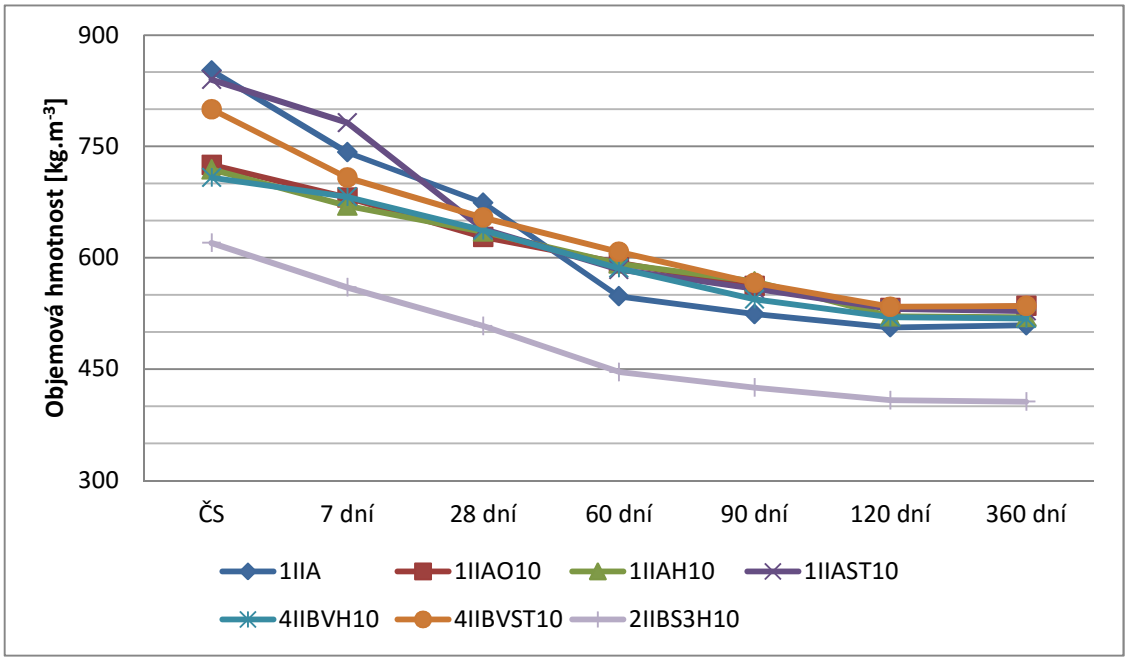
Ze všech výsledných receptur byla vytvořena sada zkušebních vzorků pro komplexní zkoušení navržených vlastností. Na každou zkoušku byly vyrobeny min. 3 zkušební tělesa. Pro zkoušku objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku, mrazuvzdornosti a pro dlouhodobé vystavení klimatickým podmínkám krychle o rozměrech 100 x 100 x 100 mm. Pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu trámce 100 x 100 x 400 mm. Pro stanovení součinitele tepelné vodivosti a nasákavosti desky o rozměrech 300 x 300 x 50 mm. Pro zkoušku zvukové pohltivosti byly vyrobeny kruhová tělesa o průměru 100 a 30 mm vývrtem z deskového vzorku po zkoušce stanovení součinitele tepelné vodivosti.

Objemová hmotnost

Objemová hmotnost zkušebních vzorků výplňových hmot byla stanovována po zamíchání (ČS) dále po 7, 28, 60, 90, 120 a 360 dnech zrání v laboratorním prostředí. Výsledky jednotlivých měření jsou uvedeny v tabulce 25.

Tab. 25: *Výsledky měření objemových hmotností výsledných receptur výplňových hmot*

Receptura	*Objemová hmotnost [kg.m^{-3}]*						
	ČS	*7 dní*	*28 dní*	*60 dní*	*90 dní*	*120 dní*	*360 dní*
1IIA	852	742	674	548	524	506	509
1IIAO10	725	681	628	593	562	532	535
1IIAH10	719	670	635	592	568	521	520
1IIAST10	840	782	639	584	558	531	528
4IIBVH10	708	682	637	586	544	520	518
4IIBVST10	800	708	654	608	566	534	535
2IIBS3H10	620	560	508	446	425	408	406



Obr 66: *Graf porovnání objemových hmotností v čase výsledných receptur*

Nejmenších hodnot objemových hmotností dosahoval vzorek výplňové hmoty tvořený konopím B, mineralizovaný sodným vodním sklem a s přídavkem 10 % fluidního popílku z elektrárny Hodonín. Naopak největších hodnot měl vzorek tvořený konopím B, mineralizovaným vápenným mlékem s 10 % náhradou pojiva struskou.

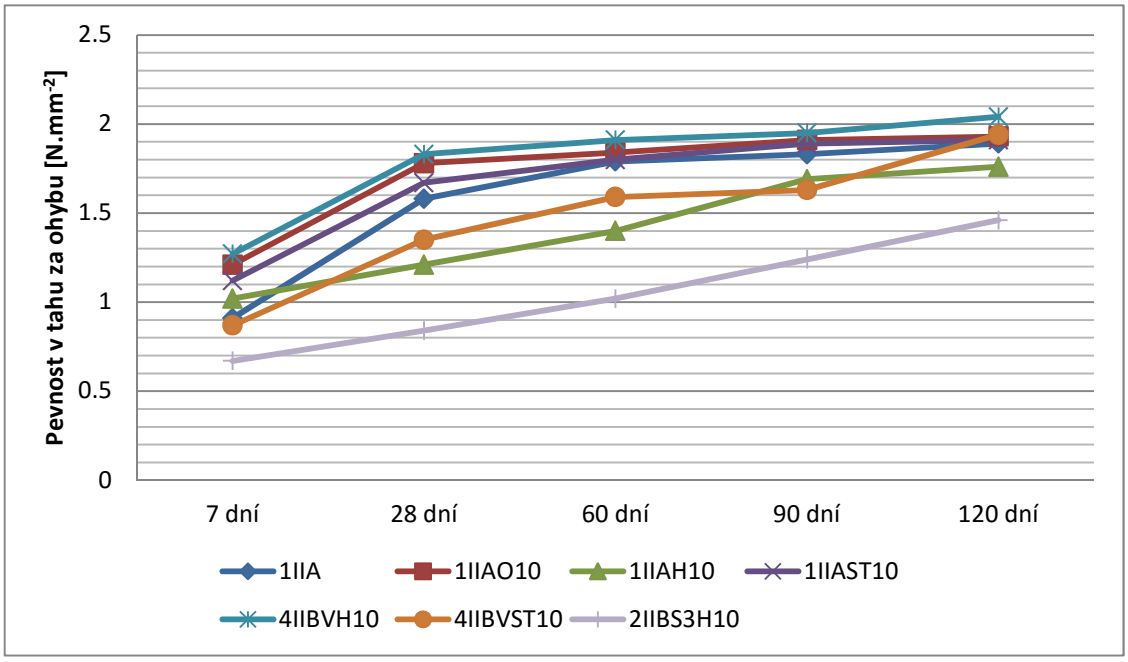
Obecně lze konstatovat, že objemová hmotnost s délkou zrání rapidně klesá a to až na cca 60 % své původní hodnoty v čerstvém stavu. Podle hodnot objemové hmotnosti můžeme zařadit výsledné výplňové hmoty do skupiny lehkých materiálů jako např. pórobetony, pěnobetony a lehké betony.

Pevnost v tahu za ohybu

Tato vlastnost byla zkoušena jako doplňková pro zkoušku pevnosti v tlaku. Zkoušena byla na trámcích do úplného zlomení zkušebního tělesa vždy po 7, 28, 60, 90 a 120 dnech zrání zkušebních vzorků. Výsledné hodnoty pevností jsou uvedeny v tabulce 26.

Tab. 26: *Výsledky měření pevnosti v tahu za ohybu výsledných receptur výplňových hmot*

Receptura	***Pevnost v tahu za ohybu [N.mm^{-2}]***				
	7 dní	***28 dní***	***60 dní***	***90 dní***	***120 dní***
1IIA	0,91	1,58	1,79	1,83	1,89
1IIAO10	1,21	1,78	1,84	1,91	1,93
1IIAH10	1,02	1,21	1,40	1,69	1,76
1IIAST10	1,12	1,67	1,80	1,89	1,91
4IIBVH10	1,27	1,83	1,91	1,95	2,04
4IIBVST10	0,87	1,35	1,59	1,63	1,94
2IIBS3H10	0,67	0,84	1,02	1,24	1,46



Obr 67: *Graf porovnání pevností v tahu za ohybu v čase výsledných receptur*

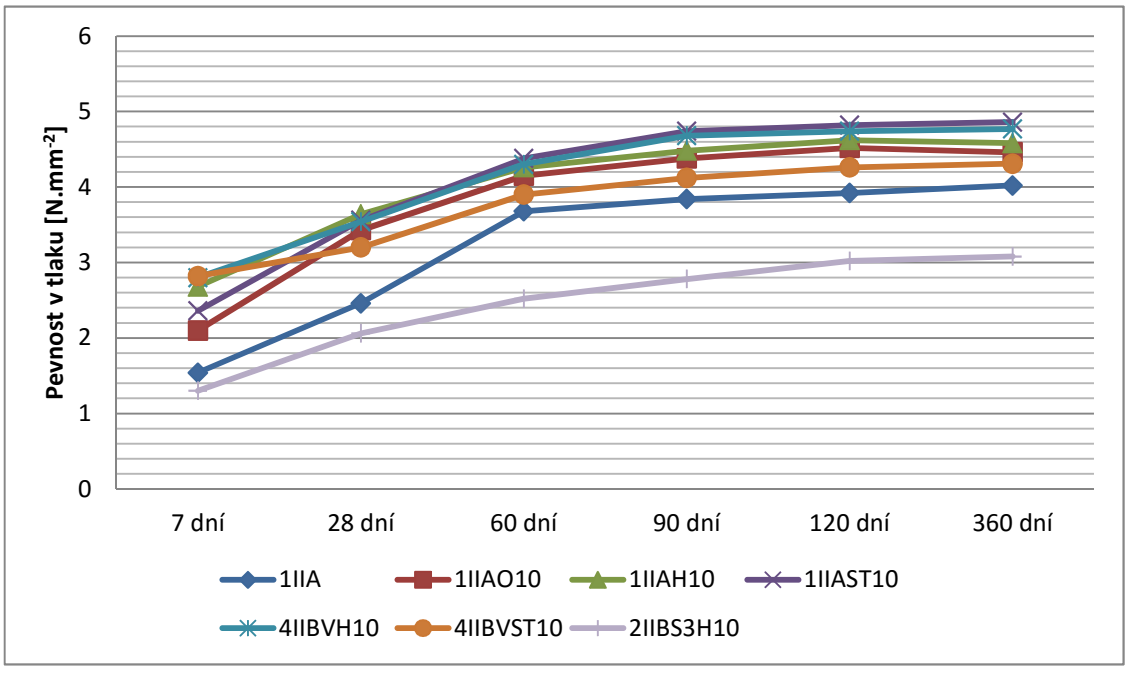
Pevnost v tahu u výplňových hmot zcela koresponduje s hodnotami pevnosti v tlaku uvedenými níže. Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jsou z velké části ovlivněny druhem použitého plniva, které má dobré mechanické vlastnosti. Pazdeří technického konopí dokáže překlenout velké deformace vzorku bez výraznějších poruch. Nejlepších hodnot pevnosti dosahovaly vzorky tvořené konopím B, které má vyšší podíl konopných odpadních vláken.

Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla zkoušena na zkušebních tělesech tvaru krychle po 7, 28, 60, 90, 120 a 360 dnech zrání dle normových postupů popsaných výše v práci. Výsledky finálních výplňových hmot použitelných pro svislé a vodorovné konstrukce jsou uvedeny v tabulce 27.

Tab. 27: *Výsledky měření pevnosti v tlaku výsledných receptur výplňových hmot*

Receptura	***Pevnost v tlaku [N.mm^{-2}]***					
	7 dní	***28 dní***	***60 dní***	***90 dní***	***120 dní***	***360 dní***
1IIA	1,54	2,46	3,68	3,84	3,92	4,02
1IIAO10	2,10	3,43	4,15	4,38	4,52	4,46
1IIAH10	2,68	3,64	4,26	4,48	4,62	4,58
1IIAST10	2,36	3,56	4,38	4,74	4,82	4,86
4IIBVH10	2,80	3,54	4,30	4,68	4,74	4,77
4IIBVST10	2,82	3,20	3,90	4,12	4,26	4,31
2IIBS3H10	1,30	2,06	2,52	2,78	3,02	3,08



Obr 68: *Graf porovnání pevností v tlaku v čase výsledných receptur*

Všechny vzorky výplňových hmot disponovaly velmi dobrými pevnostmi v tlaku a splnily tak podmínku stanovenou v začátku experimentálních prací. Se vzrůstající dobou zrání se hodnoty pevnosti v tlaku u výplňových hmot rapidně zvětšují. Rozdíl oproti 7 denní pevnosti a pevnosti po 120 dnech je i o 55 % vyšší. Nejlepších hodnot pevnosti dosáhly vzorky tvořené plnivem konopí A. Jde o velmi čistou surovinu bez odpadních

vláken a s minimem prachových částic. S velmi stálou distribucí jednotlivých velikostí částic. Což přispívá k lepšímu a rovnoměrnějšímu rozložení jednotlivých částic ve struktuře výsledných výplňových hmot. Tyto dobré pevnosti v tlaku by mohly napomáhat použití jako samonosné výplňové zdivo bez nutnosti vkládání nosné dřevěné konstrukce nebo alespoň k omezení jejího množství.

Koeficient konstruktivnosti

Pro zatřídění výsledných výplňových hmot do kategorie nosných nebo nenosných hmot byl vypočítán koeficient konstruktivnosti po 120 dnech zrání v laboratorním prostředí a porovnán s běžně dostupnými lehkými hmotami.

Tab. 28: *Výsledky výpočtu koeficientu konstruktivnosti u zkušebních vzorků po 120 dnech zrání*

Receptura / materiál	***Koeficient konstruktivnosti [-]***
1IIA	0,77
1IIAO10	0,84
1IIAH10	0,89
1IIAST10	0,89
4IIBVH10	0,91
4IIBVST10	0,80
2IIBS3H10	0,74
Pórobetonová tvárnice P3/400	0,75
Perlitbeton PTB 500	0,60
Liaporbeton LC 20/22 D 1,8	1,20
Pěnobeton PB/50	0,22

Při porovnání koeficientů konstruktivnosti u běžných lehkých materiálů a zkoušených výplňových hmot můžeme konstatovat, že vyvinuté výplňové hmoty na bázi technického konopí dosahují velmi dobrých výsledků. Všechny vytvořené hmoty mohou být považovány jako nosné materiály.

Součinitel tepelné vodivosti

Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno v souladu s technickými normami metodou chráněné tepelné desky na tělesech o rozměrech 300 x 300 x 50 mm, která byla po době zrání 28 dní v laboratorním vysušena do ustálené 0% vlhkosti.

Tab. 29: *Výsledky stanovení součinitele tepelné vodivosti po 28 dnech zrání ve vysušeném stavu výsledných receptur výplňových hmot*

Receptura	***Součinitel tepelné vodivosti [$W.m^{-1}K^{-1}$]***
1IIA	0,0832
1IIAO10	0,0809
1IIAH10	0,0816
1IIAST10	0,0776
4IIBVH10	0,0820
4IIBVST10	0,0865
2IIBS3H10	0,0647

Nejlepší hodnoty součinitele tepelné vodivosti dosahovaly vzorky tvořené konopím B mineralizované 12 % roztokem sodného vodního skla s přídavkem 10 % fluidního popílku z elektrárny Hodonín. Všechny zkoušené vzorky výplňových hmot dosahovaly požadované parametry pro použití pro svislé konstrukce. Pro použití ve vodorovných konstrukcích se dle součinitele tepelné vodivosti hodí jen vzorek poslední.

Nasákavost

Krátkodobá nasákavost při částečném ponoření vzorku byla stanovena v souladu s ČSN EN 1609 [97] na zkušebních tělesech o rozměrech 300 x 300 x 50 mm. V daném případě byla zvolena metoda A, metoda odkapání přebytečné vody. Tělesa byla zvážena a poté ponořena po dobu 24 hod do vody, jejíž výška byla cca 10 mm. Po 24 hodinách byl vzorek ponechán na odkapávacím roštu po dobu 10 minut a poté zvážen. Výpočtem dle vzorce (15) byly vypočteny krátkodobé nasákavosti u jednotlivých zkušebních sad výplňových hmot.

Tab. 30: *Výsledky krátkodobé nasákavosti po 28 dnech zrání ve vysušeném stavu výsledných receptur výplňových hmot*

Receptura	***W_p [$kg.m^{-2}$]***
1IIA	0,925
1IIAO10	0,946
1IIAH10	0,938
1IIAST10	0,947
4IIBVH10	0,865
4IIBVST10	0,847
2IIBS3H10	0,890

Výsledné hodnoty krátkodobé nasákavosti u výplňových hmot s mineralizovaným konopím jsou překvapivé. Mineralizací by se měla pórová struktura organické suroviny uzavřít a tím se má stát skoro nenasákavou. Což se na základě výsledků víše skoro nepotvrdilo. Hmoty s mineralizovaným konopím mají skoro stejnou hodnotu krátkodobé nasákavosti, jako hmoty kde je konopí ponecháno v přirozeném stavu. Tato metoda je určena k simulaci nasákavosti vody způsobené deštěm po dobu 24 h během stavebních prací. Tudíž vyšší hodnota u receptur plánovaných pro vodorovné konstrukce není tak závažný problém.

Mrazuvzdornost

Zkouška mrazuvzdornosti byla stanovována na zkušebních tělesech po 28 dnech zrání. Pro vyhodnocení vlivu zmrazování a rozmrazování byla měřena pevnost v tlaku po 25 a 50 cyklech. V tabulce 31 jsou uvedeny hodnoty pevností a procentuální pokles pevností oproti vzorku, který byl zkoušen po 28 dnech zrání.

Tab. 31: *Výsledky pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání, po 25 a 50 cyklech zmrazování a rozmrazování výsledných receptur výplňových hmot*

Receptura	***Pevnost v tlaku [N.mm^{-2}] / Pokles pevnosti [%]***	
	25 cyklů	50 cyklů
1IIA	2,21 / 10	1,64 / 44
1IIAO10	2,98 / 15	2,02 / 41
1IIAH10	3,01 / 17	2,15 / 41
1IIAST10	2,88 / 20	2,08 / 42
4IIBVH10	2,92 / 18	2,12 / 40
4IIBVST10	2,75 / 14	1,94 / 40
2IIBS3H10	1,52 / 26	0,98 / 52

Tato vlastnost úzce souvisí s nasákavostí výplňových hmot. Tudíž výsledky poklesu pevnosti po zhodnocení této vlastnosti nejsou nikterak překvapivé. Opakovaným cyklováním zmrazování a rozmrazování se pokles pevnosti v tlaku pohybuje okolo 20 % při 25 cyklech a 40 % při 50 cyklech k původní pevnosti v tlaku. Tato vlastnost není nikterak výrazně problematická, jelikož na povrchu výplňových hmot musí být vždy ještě finální vrstva. Proto výplňová hmota nikdy nebude namáhána takto extrémními podmínkami přímo.

Zvuková pohltivost

Činitel zvukové pohltivosti byl stanoven dle ČSN ISO 10534-1 [99] na kruhových vzorcích o průměru 100 mm (frekvence 125–1000 Hz) a 30 mm (frekvence 1000–3150 Hz). Vyhodnocení váženého činitele zvukové pohltivosti bylo provedeno dle ČSN EN ISO 11654 [100], která rozlišuje 5 tříd zvukové pohltivosti, viz tabulka 32.

Tab. 32: *Třídy zvukové pohltivosti dle ČSN EN ISO 11654 [100]*

Třída zvukové pohltivosti	***αw [-]***
A	0,90; 0,95; 1,0
B	0,80; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,15; 0,20; 0,25
Nerozlišeno	0; 0,05; 0,10

Tab. 33: *Výsledky Třídy zvukové pohltivosti dle ČSN EN ISO 11654 [100] u výsledných receptur výplňových hmot*

Receptura	***α_w [-]***	***Třída zvukové pohltivosti***
1IIA	0,4	D
1IIAO10	0,55	D
1IIAH10	0,6	C
1IIAST10	0,6	C
4IIBVH10	0,6	C
4IIBVST10	0,50	D
2IIBS3H10	0,65	C

Z pohledu vážených činitelů zvukové pohltivosti α_w byla většina receptur výplňových hmot zatříděna do tříd C a D. Dle normy se jedná o materiály vysoko pohltivé a pohltivé. Tato vlastnost předurčuje výplňové hmoty pro použití do akusticky namáhaných prostředí.

Dlouhodobé vystavení klimatickým podmínkám

Jednalo se o nenormové uložení zkušebních vzorků výplňových hmot do venkovního prostředí po dobu jednoho roku. Vzorky byly umístěny na betonovou plochu, kde byly vystaveny klimatickým podmínkám od února 2012 do ledna 2013. Vzorky nebyly nikterak chráněny před okolním prostředím. Poté byly vzorky vizuálně posouzeny a byla provedena

zkouška pevnosti v tlaku. Dále bylo přistoupeno ke stanovení procentuálního poklesu pevnosti v tlaku oproti vzorku, který byl uložen v laboratorním prostředí po dobu 360 dní a následně zkoušen.

Tab. 34: *Výsledky pevnosti v tlaku po roční venkovní expozici u výsledných receptur výplňových hmot*

Receptura	***Vizuální posouzení vzorků***	***Pevnost v tlaku po venkovní expozici [N.mm^{-2}] / Pokles pevnosti [%]***
1IIA	Vzorek byl lehce poškozen – narušení rohů zkušebního tělesa	2,17 / 46
1IIAO10	Vzorek byl lehce poškozen – narušení rohů zkušebního tělesa n	2,09 / 53
1IIAH10	Bohužel vzorek nenalezen	-
1IIAST10	Vzorek měl velmi deformované hrany	1,35 / 72
4IIBVH10	Úplné poškození vzorku neopatrnou manipulací	-
4IIBVST10	Vzorek byl lehce poškozen – narušení rohů zkušebního tělesa	2,22 / 49
2IIBS3H10	Vzorek měl velmi deformované hrany	0,94 / 69

Pokles pevností v tlaku po dlouhodobé expozici ve venkovním prostředí byl značný. Vzorky ve venkovním prostředí nebyly nikterak ošetřeny a byly ponechány na volném prostoru. Tudíž na ně po dobu celého roku působily klimatické podmínky a ty vzorky značně poškodily. Takovéto uložení výplňových hmot bez povrchové úpravy není vhodné. Pro delší trvanlivost výplňových hmot je třeba hmotu opatřit finální úpravou. Nejlepším materiálem pro finální úpravy bude takový materiál, který je na stejné surovinové bázi, aby se předešlo nežádoucím vlivům spolupůsobení.

7.5. VYHODNOCENÍ V. ETAPY „CELKOVÉ SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ“

Na základě podrobného zkoušení navržených receptur můžeme konstatovat následující závěry. Vybrané konečné receptury výplňových hmot disponují velmi dobrými vlastnostmi. Jejich objemová hmotnost se po 120 dnech zrání pohybuje v rozmezí 400 až 540 kg.m^{-3}. S ohledem na tento parametr můžeme všechny výplňové hmoty zařadit do kategorie lehkých hmot. I při takto nízké objemové hmotnosti mají velmi dobré pevností vlastnosti. Pevnost v tahu za ohybu se pohybuje okolo 2 N.mm^{-2} je to zapříčiněno především druhem použitého plniva a pevnost v tlaku mezi 3 až 5 N.mm^{-2}. Koeficient konstruktivnosti se u hmot pohybuje v rozmezí 0,74 - 0,91 což řadí tyto materiály mezi

nosné. Jako nosný se u lehkých hmot považuje materiál s hodnotou koeficientu konstruktivnosti nad 0,4. Součinitel tepelné vodivosti nemůže konkurovat běžným izolačním materiálům, ale jeho hodnota je dobrá pro výplňový materiál pojený pojivem na bázi hydraulické maltoviny. Krátkodobá nasákavost výsledných hmot je vyšší u všech hmot a to i s ohledem na použití mineralizované plnivové složky v některých hmotách. Pokles pevností v tlaku při zkoušce mrazuvzdornosti je vyhovující vzhledem k aplikaci hmot a nedosahuje nikterak závažné hodnoty. Jako vyhovující se u pórobetonových tvárnic udává pokles pevnosti o 20% při 15 cyklech zmrazování a rozmrazování. Tudíž pokles pevnosti o 20 % při 25 cyklech je vyhovující pro aplikaci v konstrukcích zdí. Výsledky mrazuvzdornosti úzce korespondují s nasákavostí. Na základě měření zvukové pohltivosti a následném zatřídění hodnot můžeme vyvinuté hmoty zařadit mezi vysoko pohltivé a pohltivé materiály. Tato vlastnost může zařadit výplňové hmoty do použití v akusticky namáhaných prostředích. Posledním parametrem stanoveným na výplňových hmotách bylo nenormové zkoušení odolnosti vůči klimatickým podmínkám. Po ročním vystavení zkušebních vzorků ve venkovním prostředí bez jakékoliv ochrany můžeme říct, že u vzorků poklesla pevnost v tlaku o 46 až 72 %. Závěrem můžeme tedy konstatovat, že se podařilo vyvinout materiály s velmi dobrými parametry vlastností, které je předurčují pro uplatnění ve stavební praxi.

Jak je z dosažených výsledků výzkumu a vývoje výplňových hmot na bázi přírodních rychle obnovitelných materiálů patrné, jako nejvhodnější aplikace se jeví použití jako nenosná výplňová hmota pro obvodové zdivo, vnitřní stěnové dílce i konstrukce podlah či stropů. Nebo samonosná výplňová hmota pro menší jednopodlažní objekty. Novodobý trend, v úzkém vztahu s ochranou životního prostředí a ekologií ve stavebnictví, vyžaduje používání moderních, nejlépe bezodpadových výrobních technologií, které takto umožní produkovat materiály šetrné k životnímu prostředí a zdraví lidstva. Bohužel v České republice se najde jen malá skupinka obyvatel, kteří neupřednostňují cenu vstupních surovin nad výslednými parametry celé stavby. Toto je velký rozdíl v porovnání s jinými evropskými zeměmi, kde lidé preferují používání zejména přírodních stavebních materiálů a výrobních technologií a postupů. Tato problematika je ve vztahu finančních možností a mentality obyvatel zcela klíčová.

Další vývoj výplňových hmot na bázi přírodních rychle obnovitelných surovin by se měl zaměřit na posouzení celkové ekologické zátěže používání přírodních materiálů k průmyslově vyráběným surovinám. Bylo by vhodné provézt důkladnou analýzu

životního cyklu jednotlivých materiálů tzv. - life cycle assessment (LCA). [78] Ta sleduje životní cyklus celého výrobku od těžby surovin přes samotnou výrobu materiálu, zabývá se jeho dopravou na staveniště, konstrukcí budovy, jejím provozem i následnou demolicí a recyklací materiálu. Bylo by dobré zabývat se, takzvanou uhlíkovou stopou (carbon footprint – CFP), a to pro vybrané fáze životního cyklu nezávisle na lokaci stavebního objektu a typu provozu. Konopí při svém růstu dokáže absorbovat až 4x více CO_2 než obdobná plocha lesa. CO_2 je zachycován pazdeřím, a to dokonce i po dobu životnosti stavby ve kterém je pazdeří použito jako plnivová složka materiálu. [79]

8. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Výsledky řešení jednotlivých etap experimentální části disertační práce zaměřené na výzkum a vývoj výplňových hmot na bázi přírodních rychle obnovitelných surovin jsou podklady pro konstruování následujících závěrů.

V rámci počáteční etapy byla provedena analýza dostupných surovinových zdrojů pro možné uplatnění ve struktuře výplňových hmot. Podkladem byly dostupné odborné publikace v domácích i zahraničních databázích příspěvků, sborníků z konferencí, internetových stránek jednotlivých producentů přírodních obnovitelných zdrojů surovin, či producentů výplňových hmot nebo výrobců stavebních materiálů s použitím přírodní nebo druhotné suroviny. Problematikou využití přírodních surovinových zdrojů se zabývá mnoho zahraničních odborníků nejen v Evropě (Francie, Holandsko, Velká Británie, Německo, Slovensko, Rakousko, Polsko a další) ale i v Asii a Americe. Na základě rešerše literárních zahraničních zdrojů [60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79] patří mezi nejčastěji zkoumané přírodní surovinové zdroje technické konopí. Na základě všech zjištěných informací z výše uvedených odborných článků a průzkumu ostatních zdrojů byli vybráni zástupci obnovitelných a rychle obnovitelných surovin. Byl brán zřetel na dostupnost surovinových zdrojů na našem území a jejich pořizovací cenu.

Pro vývoj výplňových hmot na bázi obnovitelných zdrojů surovin bylo vybráno smrkové dřevo, technické konopí a sláma. Důvody vybrání těchto surovin jsou následující: *dřevo* jeden z nejstarších materiálů používaný ve stavební praxi ve všech různých formách od pilin a třísek až po velké konstrukční prvky, je nejdostupnější a patří mezi nejlevnější přírodní materiál. Sláma vysoká produkce na našem území tudíž jeho dostupnost je ve velkém měřítku, dosavadní aplikace ve stavbách především ve formě celých balíků. Technické konopí rostlina, která je beze zbytku zužitkovatelná a plně recyklovatelná, v zahraničí hojné aplikace ve stavebních materiálech, produkce na území ČR po letech úpadku zase stoupá. Pro potřeby výzkumu bylo vybráno konopí ze dvou různých zemí, a to z České republiky, ve dvou různých frakcích od dvou různých pěstitelů z Vysočiny a jižní Moravy, a konopí dovezené z Francie, kde je známo pod obchodním názvem Chanvibrat.

Pro nahrazení části pojivové složky výplňových hmot byli vybráni zástupci druhotných surovin z provozů elektráren a tepláren na území ČR. Do prvotní fáze výzkumu byl vybrán vysokoteplotní popílek z Dětmarovic, Chvaletic, Ledvic a teplárny Krnov, fluidní popílek z Hodonína, Poříčí, Tisové a teplárny Olomouc, dále byla využita struska NH Ostrava.

Náplní druhé etapy bylo zkoušení základních vlastností vybraných přírodních surovinových zdrojů a druhotných surovin. Při prvotních těstech vlastností byla zjištěna značná variabilita vlastností přírodních surovin mezi jednotlivými druhy. Technické konopí a dřevo mají velice podobnou sypnou hmotnost. Oproti tomu nasákavost těchto materiálů je zcela rozdílná. Konopí má oproti dřevu nasákavost 1,5x vyšší. Je to způsobeno velkou otevřenou pórovitostí konopných částic. Všechny dodané přírodní suroviny měly velmi stálé zastoupení jednotlivých velikostí částic. Velikost, nebo také délka jednotlivých částic se pohybovala okolo 10 mm. Vyjma dodaného vzorku slámy kdy bylo nutné přistoupit k jejímu nasekání na drobnější částice. Z tohoto důvodu sláma dosahovala nejnižších hodnot sypné hmotnosti. Nasákavost slámy je nižší než u konopí ale nepatrně vyšší než u dřeva. O vyšší nasákavosti u technického konopí se dočteme ve všech odborných příspěvcích. Tato vlastnost je zmiňována jako jeden z kladů použití konopí v konstrukcích. Jelikož konopí dokáže pojmout vodu do své struktury při vyšší relativní vlhkosti v místnostech a při nižší ji dokáže zase uvolnit. Tato vlastnost zaručuje velmi příjemnou pohodu bydlení. Tuto vlastnost můžeme ovšem ovlivnit použitím mineralizace jednotlivých částic konopného pazdeří. Tato možnost byla ověřena v dalších etapách vývoje hmot.

Dalším parametrem pro ověření vhodnosti použití přírodních surovin do struktury výplňových hmot bylo vytvoření výluhu. Vytvořený výluh z jednotlivých přírodních surovin byl podroben řadou zkoušek. Nejprve byla jeho vhodnost ověřena chemickým rozborem, kde byly stanovovány parametry pro vhodnost výluhu jako záměsové vody do betonů nebo malt. Bylo zjištěno, že všechny vzorky splňují požadované parametry. V jednotlivých rozborech nebyly spatřeny veliké rozdíly množství stanovovaných hodnot. Jednalo se především o hodnoty při stanovení pH, obsahu chloridů, cukrů, fosfátů, síranů, alkálií, dusičnanů. Největší podíl cukrů, které ovlivňují hydrataci a tvrdnutí cementu, je obsaženo ve výluhu ze smrkových třísek. Naproti tomu nejméně ho má výluh ze slámy. Hodnota pH při 25°C je u všech vzorků výluhů skoro porovnatelná a pohybuje se v rozmezí 6,29 – 6,74. Dále byl výluh použit jako záměsová voda pro vytvoření cementových past a následně zkušebních vzorků. Na pastách byl stanoven počátek a doba tuhnutí, na zkušebních tělesech byla po zrání ve vodném prostředí tvořeném výluhem zkoušena objemová hmotnost a pevnost v tahu za ohybu a tlaku v intervalu 2, 7, 14, 28 a 60 dnech. Počátek a doba tuhnutí se u všech výluhů prodloužila oproti referenční vodě. U výluhu ze smrkových třísek se počátek a doba tuhnutí prodloužila nejvíce ze všech zkoušených přírodních surovin o cca 60 a 140 minut. Naproti tomu použití výluhu ze

slámy vedlo k prodloužení počátku a doby tuhnutí pouze o 15 a 35 minut. Výluhy z konopí dosahovaly podobných hodnot a to prodloužení počátku a doby tuhnutí o cca 30 a 70 minut. Tyto zjištěné skutečnosti přispěly ke stanovení doby potřebné pro získání manipulačních vlastností a pro odformování zkušebních vzorků výplňových hmot, abychom předešli případné deformaci zkušebních těles. Při porovnání výsledků stanovení objemové hmotnosti, pevnosti v tahu za ohybu a tlaku u zkušebních vzorků cementových malt tvořených výluhem z obnovitelné suroviny a vodou není nikterak výrazný rozdíl. Všechny vzorky splňují kritéria daná normou ČSN EN 197-1 pro použitý cement po 28 dnech zrání. Na základě vyhodnocení všech provedených zkoušek u přírodních surovin bylo pro další vývoj výplňových hmot použito pouze technické konopí z Vysočiny (označováno jako B) a Francie (označováno jako A).

Základní zkoušení zástupců druhotných surovin prokázalo značnou variabilitu chemického složení a stanovovaných parametrů. Pro ověření možnosti použití do struktury výplňových hmot jako náhrady pojivové složky v max. podílu 20 % bylo nutné přistoupit k testování přímo ve struktuře hmot. Proto byli pro vývoj výplňových hmot vybráni zástupci druhotných surovin dle jejich aktuální dostupnosti na trhu. Jednalo se tedy o filtrový popílek z teplárny Olomouc, popílek Dětmarovice, Chvaletice a filtrový popílek z Hodonína a také struska NH Ostrava. Tyto suroviny nepotřebovaly žádnou dodatečnou předúpravu před použitím ve výplňových hmotách.

Třetí etapa experimentálních prací sestávala především v návrhu požadavků na vlastnosti výsledných výplňových hmot, dále z návrhu receptur výplňových hmot a jejich zkoušení základních vlastností. Tato etapa byla rozdělena na další podetapy pro optimální prozkoušení všech možných kombinací receptur výplňových hmot. První se zabývala výběrem optimální skladby hmot a složením pojivové složky. Navrženy byly 4 základní receptury a dvě složení pojivové složky a jako plnivo bylo použito konopí A a B. Poměr plniva k pojivu a vodě byl navržen s ohledem na předešlé rešeršní vyhodnocení. Celkem bylo v této podetapě vyzkoušeno 16 základních receptur výplňových hmot. Prvním krokem při vyhodnocení navržených receptur bylo přistoupení ke zhodnocení míchacího procesu hmot, následné ukládání do forem, hutnění zkušebních vzorků a poté bylo přistoupeno ke zhodnocení dosažených vlastností.

U receptur s vyšší dávkou plniva docházelo k ne zcela dobrému promísení pojivové složky mezi částice plniva. Homogenizace těchto směsí probíhala značně problematicky. Tento fakt do značné míry ovlivňoval i výslednou rozměrovou stabilitu zkušebních vzorků

a také výsledky fyzikálně-mechanických vlastností u těchto receptur jsou nejnižší. Naproti tomu součinitel tepelné vodivosti těchto receptur je velmi dobrý. Nejlepší homogenizace složek dosahovaly hmoty s nízkým podílem plniva a vyšším podílem pojiva. Takto tvořené zkušební vzorky měli velmi dobré pevnostní charakteristiky i při zachování relativně nízkého součinitele tepelné vodivosti. Jednotlivá složení pojivové složky u receptur nikterak výrazně neovlivnilo mísení směsí, přípravu zkušebních vzorků a ani tepelně-technické vlastnosti. Rozdíly byly znatelné až při zkoušení fyzikálně-mechanických vlastností hmot. Dle předpokladu vzorky s vyšším podílem cementu dosahovaly lepších pevnostních charakteristik. Závěrem této etapy můžeme konstatovat, že čím vyšší dávka plniva ve směsi, tím horší homogenizace a fyzikálně-mechanické vlastnosti, ale lepší součinitel tepelné vodivosti. S vyšší dávkou pojiva a vody se směs lépe homogenizovala, ukládala a hutnila do zkušebních forem. S vyšším přídavkem cementu dosahovaly vzorky vynikajících parametrů ovšem při nepatrném zhoršení tepelně-izolačních vlastností. Dále můžeme konstatovat, že se vzrůstající dobou zrání roste pevnost v tlaku a klesá objemová hmotnost. Součinitel tepelné vodivosti u žádné ze zkoušených receptur nepřekročil hodnotu 0,09 $W.m^{-1}K^{-1}$. Receptury s nižším podílem plniva dosáhly takových výsledných vlastností, že splňují podmínky na parametry hmot použitelných pro svislé konstrukce. Všechny navržené receptury potom splňují parametry pro použití na vodorovné konstrukce. Při zhodnocení použitého plniva musíme konstatovat, že plnivo tvořené konopím A dosahovalo lepších fyzikálně-mechanických parametrů. Ovšem konopí B dosahovalo lepších tepelně-technických vlastností, což je zapříčiněno vyšším obsahem zbytkových vláken oproti konopí A. Pro další vývoj výplňových hmot byly použity receptury 1IIA a 4IIB pro použití ve svislých konstrukcích. U těchto receptur je použita nižší dávka plniva a pojivo obsahuje vyšší dávku cementu. Dále byly použity receptury s označením 2IA a 2IIB pro použití ve vodorovných konstrukcích, které obsahovaly druhou nejvyšší dávku plniva, pojivo bylo zastoupeno v obojím návrhu složení.

Další podetapa sestávala z použití mineralizace konopného plniva. Touto etapou se chtělo docílit zlepšení přilnavosti plniva k pojivu a omezení nasákavosti plniva. Především pro zlepšení konečných vlastností hmot ale i pro lepší míchání směsí. Mineralizace byla prováděna dvojím způsobem, buď vápenným mlékem, nebo různou koncentrací sodného vodního skla. Mineralizace plniva probíhala 24 hodin před samotným mícháním směsí a s nezbytným množstvím roztoku pro nasáknutí do struktury plniva. Abychom nevnesly do struktury hmot více vody než je nezbytně nutné. Mineralizace konopného plniva měla pozitivní vliv na míchání směsí výplňových hmot i na výrobu zkušebních těles. Všechny

zkoušené receptury v této podetapě byly dobře zhomogenizovatelné a výroba zkušebních těles byla bezproblémová. Pojivo bylo v celém vzorku rozloženo rovnoměrně a jednotlivé částice plniva byly po celém svém objemu obaleny pojivem. Všechny zkušební vzorky hmot měly dobrou rozměrovou stabilitu. Na základě zhodnocení výsledků můžeme konstatovat, že použití vápenného mléka jako mineralizační složky vede ke zlepšení fyzikálně-mechanických i tepelně-technických parametrů výplňových hmot. Použití sodného vodního skla přispívá ke zlepšení parametrů hmot jen do určité procentuální koncentrace. Nejlepších výsledků dosahovaly vzorky hmot s 10 a 12% roztokem sodného vodního skla. Koncentrace 8 % nevedla k nikterak lepším hodnotám oproti nemineralizovanému plnivu. U koncentrace 14 % došlo k velkému poklesu pevností a navýšení součinitele tepelné vodivosti.

Na základě výsledků můžeme konstatovat, že mineralizace konopného plniva má pozitivní vliv na všechny měřené vlastnosti výplňových hmot. Ovšem je nutno říci, že příprava mineralizace i samotná mineralizace vyžaduje přípravu plniva alespoň 24 hodin před samotným mícháním. Tudíž by se technologické kroky při výstavbě takovýchto konstrukcí prodloužily. Což by ne ve všech případech bylo žádoucí nebo možné. Proto do dalšího výzkumu byla zařazena i receptura bez mineralizace konopného pazdeří (receptura s označením 1IIA). Na základě všech dosažených výsledků byly vybrány dvě receptury s nejlepším poměrem pevnosti v tlaku k součiniteli tepelné vodivosti pro další vývoj výplňových hmot, a to receptura s označením 4IIBV kde byla mineralizace uskutečněna vápenným mlékem a receptura 2IIBS3 u které bylo plnivo mineralizované 12% roztokem sodného vodního skla.

Poslední podetapa byla zaměřena na optimalizaci pojivové složky druhotnou surovinou. Bylo přistoupeno k nahrazení části pojiva druhotnou surovinou do maximálního množství 20 % z celkové dávky pojiva především z položky cementu. V případě strusky bylo nahrazení provedeno pouze do 15 % pro zajištění ekonomické výhodnosti. Na základě výsledků můžeme konstatovat, že přidáním druhotné suroviny do struktury hmot v množství 5 až 10 % se zlepšují výsledné parametry hmot. Vyšší dávka druhotné suroviny přispívá ke snížení pevnostních charakteristik a objemové hmotnosti výplňových hmot s ne příliš jednoznačným zlepšením součinitele tepelné vodivosti. Obecně lze konstatovat, že použití náhrady pojiva nemělo výrazný vliv na míchání směsí, výrobu ani rozměrovou stabilitu zkušebních těles výsledných hmot. Nahrazení pojiva fluidním popílkem do 10 % přispívá ke zlepšení pevnostních charakteristik o cca 15 % a ke snížení součinitele tepelné vodivosti o 5 %. Nahrazení klasickým popílkem z vysokoteplotního spalování dochází

k pozitivnímu dopadu na pevnost a součinitel tepelné vodivosti pouze do 5 % nahrazení pojiva. Další přídavek vede ke snižování pevností hmot. Při použití strusky můžeme pozorovat zlepšení parametrů při dávce 10 %. Kdy dojde ke zvýšení pevností o cca 20 % a snížení součinitele tepelné vodivosti o 10 %. Ze všech výsledků je patrné, že pro nahrazení části pojivové složky výplňových hmot na bázi přírodních obnovitelných surovin je nejlepší použití fluidních popílků a strusky. Nejlepších výsledků fyzikálně-mechanických parametrů dosahuje nahrazení pojivové složky ve struktuře hmot ve, které nebylo konopí mineralizováno. Použití druhotné suroviny přispívá k mineralizaci plniva.

Předposlední etapou experimentálních prací bylo zhodnocení dosavadních výsledků navržených výplňových hmot a podrobné zkoušení nejlepších receptur pro ucelení přehledu o použitelnosti navržené hmoty. Na základě všech výsledků zkoušek receptur výplňových hmot v předešlých etapách můžeme konstatovat, že výběr přírodní rychle obnovitelné suroviny byl úspěšný. Technické konopí se osvědčilo jako velmi výhodné plnivo ve struktuře hmot jak pro svislé tak vodorovné konstrukce. Musíme ovšem říci že čím vyšší je dávka plniva ve směsi, tím horší je homogenizace jednotlivých složek a snižují se pevnostní charakteristiky, ale při zlepšení tepelně-technických vlastností. Poměr vápenného hydrátu k cementu byl vybrán velmi dobře při zachování ekonomičnosti výplňových hmot i k výsledným vlastnostem hmot. Vyšší dávka cementu vede ke zlepšení pevnostních charakteristik ovšem při zhoršení tepelně-izolačních vlastností. Vyšší dávka pojiva a vody přispívá k celistvému obalení a tím spojení jednotlivých částic plniva při zachování dobrých tepelně-izolačních vlastnostech. Mineralizace konopného plniva přispívá ke zlepšení konečných vlastností hmot ve všech rovinách. Mineralizační složkou může být jak vápenné mléko tak 12 % roztok sodného vodního skla. Vyšší či nižší dávka vodního skla než 12 % se neosvědčila. Mineralizace plniva ovšem představuje časovou náročnost přípravy takto tvořených hmot a tudíž zavedení do praxe by nebylo výhodné z několika hledisek. Jak z finančních důvodů, tak z nutnosti dodržení přesného technologického postupu a kázně při její výrobě. Použití druhotných surovin pro výrobu hmot v procentuálním zastoupení do 10 % může přispět ke zlepšení fyzikálně-mechanických a tepelně-technických vlastností hmot, nejlepší je použití strusky a fluidních popílků.

Závěrečnou část experimentálních prací tvořilo ověření dlouhodobých vlastností vybraných receptur výplňových hmot. Bylo přistoupeno ke zkoušení jak tepelně-technických, tak fyzikálně-mechanických, trvanlivostních a akustických parametrů výsledných receptur výplňových hmot. Nejprve byla stanovována objemová hmotnost,

která s délkou zrání rapidně klesá a to až o cca 60 % oproti naměřené hodnotě v čerstvém stavu. Nejnižší objemové hmotnosti dosahovaly vzorky hmoty s označením 2IIBS3H10 tvořené konopím B mineralizovaným 12 % roztokem sodného vodního skla s přídavkem 10 % fluidního popílku Hodonín po 120 dnech zrání to bylo 408 $kg.m^{-3}$. Naopak největší hodnoty a to 534 $kg.m^{-3}$ po 120 dnech zrání měla receptura s označením 4IIBVST10, která byla tvořena konopím B mineralizovaným vápenným hydrátem s 10 % strusky. Podle dosažených hodnot objemové hmotnosti u všech zkoušených receptur můžeme zařadit výsledné výplňové hmoty jako lehké výplňové materiály.

Další vlastnost, která byla měřena po dlouhodobém zrání, je pevnost v tahu za ohybu. Pevnost v tahu u výplňových hmot zcela koresponduje s hodnotami pevnosti v tlaku. Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jsou z velké části ovlivněny druhem použitého plniva, které má dobré mechanické vlastnosti. Pazdeří technického konopí dokáže překlenout velké deformace vzorku bez výraznějších poruch. Nejlepších hodnot pevnosti dosahovaly vzorky tvořené konopím B, které má vyšší podíl konopných odpadních vláken. Nejnižší pevnosti v tahu za ohybu po 120 dnech zrání dosáhly vzorky hmoty s označením 2IIBS3H10 a to 1,46 $N.mm^{-2}$, naopak nejvyšší měly vzorky receptury 4IIBVH10 2,04 $N.mm^{-2}$.

Všechny vzorky výplňových hmot disponovaly velmi dobrými pevnostmi v tlaku a splnily tak podmínku stanovenou v začátku experimentálních prací. Se vzrůstající dobou zrání se hodnoty pevnosti v tlaku u výplňových hmot rapidně zvětšují. Rozdíl oproti 7 denní pevnosti a pevnosti po 120 dnech je i o 55 % vyšší. Největší nárůst pevností byl u všech vzorků pozorován mezi 28 a 60 dny zrání. Poté už byl nárůst pevností minimální. Nejlepších hodnot pevnosti v tlaku po 120 dnech zrání dosáhly zkušební vzorky hmoty 1IIAST10 a to 4,82 $N.mm^{-2}$, naopak nejmenší měly vzorky receptury 2IIBS3H10 3,02 $N.mm^{-2}$. Rozdíly pevností v tlaku po 360 dnech zrání v laboratorním prostředí oproti 120 dnům už jsou zcela zanedbatelné. Obecně lze konstatovat, že nejlepších hodnot pevnosti dosáhly vzorky tvořené plnivem konopí A. Jde o velmi čistou surovinu bez odpadních vláken a s minimem prachových částic a velmi stálou distribucí jednotlivých velikostí částic. Což přispívá k lepšímu a rovnoměrnějšímu rozložení jednotlivých částic ve struktuře výsledných výplňových hmot. Tyto dobré pevnosti v tlaku by mohly napomáhat použití jako samonosné výplňové zdivo bez nutnosti vkládání nosné dřevěné konstrukce nebo alespoň k omezení jejího množství.

Součinitel tepelné vodivosti byl u všech vzorků výplňových hmot stanovován metodou chráněné tepelné desky po 28 dnech zrání ve vysušeném stavu. Všechny vzorky

dosahovaly hodnot pod 0,09 $W.m^{-1}K^{-1}$. Nejlepší součinitel tepelné vodivosti byl naměřen u vzorků receptury s označením 2IIBS3H10 a to 0,0647 $W.m^{-1}K^{-1}$ naproti tomu největší 0,0865 $W.m^{-1}K^{-1}$ měl vzorek receptury 4IIBVST10. Při porovnání požadavků na součinitel tepelné vodivosti stanovený na začátku experimentálních prací musíme konstatovat, že všechny vzorky splňují zadané kritérium max. 0,1 $W.m^{-1}K^{-1}$ pro použití ve svislých konstrukcích. Ovšem kritérium 0,07 $W.m^{-1}K^{-1}$ pro použití ve vodorovných konstrukcích splňuje pouze receptura 2IIBS3H10.

Další důležitou vlastností stanovovanou na zkušebních vzorcích výplňových hmot po 28 dnech zrání byla krátkodobá nasákavost. Metoda měření krátkodobé nasákavosti je určena k simulaci nasákavosti vody způsobené deštěm po dobu 24 h během stavebních prací. Vzorky dosahovaly hodnot nasákavosti od 0,840 až po 0,946 $kg.m^{-2}$. Vzorky ve kterých bylo konopí mineralizováno, dosahovaly nižších hodnot oproti vzorkům hmot bez mineralizace, ovšem nikterak výrazně jak bylo předpokladem. Mineralizací by se měla pórová struktura organické suroviny uzavřít a tím se má stát skoro nenasákavou. Což se na základě výsledků úplně nepotvrdilo. Vyšší hodnoty nasákavosti budou ale příznivé pro udržování dobrého klimatu v místnostech, které budou vytvořeny zdmi ze zkoumaných výplňových hmot. Technické konopí má výbornou vlastnost pojímat do své struktury vodu při vyšší relativní vlhkosti v místnosti a naopak ji dokáže uvolňovat při snížení vlhkosti v místnosti a tím udržovat příjemnou pohodu bydlení.

Jednou ze zkoušek trvanlivosti výplňových hmot byla prováděna zkouška mrazuvzdornosti. Tato vlastnost úzce souvisí s nasákavostí výplňových hmot. Tudíž výsledky poklesu pevnosti po zhodnocení této vlastnosti nejsou nikterak překvapivé. Opakovaným cyklováním zmrazování a rozmrazování se pokles pevnosti v tlaku pohybuje okolo 20 % při 25 cyklech a 40 % při 50 cyklech oproti pevnosti v talku po 28 dnech zrání. Nejnižšího poklesu pevnosti v tlaku dosahovaly vzorky receptury 1IIA a to 10 % při 25 cyklech. Naopak nejvyšší pokles 26 % nastal u vzorků receptury 2IIBS3H10 po 25 cyklech. Obecně lze konstatovat, že vzorky výplňových hmot jsou méně mrazuvzdorné než běžný beton. Ovšem při použití v konstrukcích budou opatřeny finální vrstvou, která by tuto vlastnost mohla výrazně omezit. Další zkouškou pro ověření trvanlivosti výsledných výplňových hmot bylo dlouhodobé vystavení zkušebních vzorků klimatickým podmínkám. Zkušební vzorky hmot byly ponechány po dobu jednoho roku ve venkovním prostředí bez jakékoliv ochrany a poté byly podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku. Výsledná hodnota pevnosti byla vztažena k pevnosti v tlaku po 360 dnech zrání v laboratorním prostředí. Bohužel pokles pevností v tlaku po dlouhodobé expozici ve venkovním prostředí

byl značný, dosahoval hodnot 46 až 72 %. Bohužel celkové zhodnocení jednotlivých receptur mezi sebou není možné z důvodu nenalezení nebo úplného poškození některých zkušebních vzorků. Z výsledků lze ovšem zkonstatovat, že takového uložení výplňových hmot bez povrchové úpravy není vhodné. Pro delší trvanlivost výplňových hmot je třeba hmotu opatřit finální úpravou. Nejlepším materiálem pro finální úpravy bude takový materiál, který je na stejné surovinové bázi, aby se předešlo nežádoucím vlivům spolupůsobení.

Poslední vlastností stanovovanou na výplňových hmotách byla zvuková pohltivost. Z pohledu vážených činitelů zvukové pohltivosti α_w byla většina receptur výplňových hmot zatříděna do tříd C a D. Dle normy se jedná o materiály vysoko pohltivé a pohltivé. Tato vlastnost předurčuje výplňové hmoty pro použití do akusticky namáhaných prostředí.

Závěrem lze konstatovat, že se podařilo vyvinout výplňové materiály s velmi dobrými vlastnostmi, které by mohly konkurovat doposud používaným výplňovým materiálům. Aplikace vyvinutých hmot ve stavební praxi jistě přispěje k zlepšení náhledu na používání rychle obnovitelných surovin v konstrukčních prvcích.

9. ZÁVĚR

V rámci disertační práce byly vyvíjeny a následně zkoumány výplňové materiály na bázi přírodních rychle obnovitelných surovin a s využitím druhotných surovin (popílků a strusky). Stěžejní část disertační práce byla zaměřena na studium tepelně-technických, fyzikálně-mechanických a trvanlivostních charakteristik výsledných výplňových hmot. Cílem bylo nalézt přírodní, snadno obnovitelné surovinové zdroje, případně druhotné suroviny na bázi odpadních materiálů z průmyslu, které by byly vhodné pro výrobu výplňových hmot, jež by byla energeticky, ekologicky a ekonomicky úspornější v komparaci s dnes používanými výplňovými materiály. Záměrem výzkumu bylo získat materiály s dobrými fyzikálně-mechanickými, akustickými a tepelně-technickými vlastnostmi, které by se staly vhodnou alternativou k dnes běžně užívaným výplňovým materiálům.

Disertační práce má nesporný přínos hned v několika oblastech. Z ekologického hlediska je použití rychle obnovitelných surovin velkým přínosem, neboť výrazně šetříme pomalu obnovitelné zdroje surovin (např. dřevní hmotu), která může být efektivněji využita při stavebních aplikacích tam, kde ji nelze nahradit. Taktéž využití druhotných surovin přispívá k šetření životního prostředí (úspora energetických zdrojů, primárních surovin atd.). S faktem zpracování druhotných surovin a úsporou některých zdrojů je spjata i otázka ekonomická, v této sféře dojde také k pozitivnímu projevu. Poslední neméně důležitý je vědecký přínos výsledků a vyhodnocení disertační práce, který spočívá zejména v získání nových poznatků o spolupůsobení rychle obnovitelných surovin s hydraulickou maltovinou. Neopomenutelným vědeckým přínosem je bezesporu prokázání skutečnosti, že rychle obnovitelné suroviny se dají s úspěchem použít v konstrukcích s tepelně-izolační funkcí, bez použití dalších zateplovacích prostředků. Zásadním přínosem je využití druhotných a rychleobnovitelných surovin, při současném dosažení specifických vlastností finálních výrobků a jejich ekonomickém zvýhodnění.

Obecně by mohly být hrázděné stavby s konopným pazdeřím do budoucna zajímavou a výhodnou alternativou výstavby. Stavby na tomto principu vytváří pevný, odolný a vysoce užitný stavební izolant. Právě vápeno - konopné stavební materiály si v posledních letech získávají stále větší oblibu jak u ekologů (výrazně přispívají ke snížení emisí CO_2), tak u uživatelů domů, kde jsou aplikovány. Zvukotěsné a především tepelně-izolační vlastnosti dělají z kombinace konopí a pojiva vyhledávaný materiál všemi, kdo

chtějí šetřit životní prostředí, náklady na vytápění či chlazení. U budov, kde jsou, tyto materiály využity, již není nutno dodatečně tepelně stavbu izolovat.

Na základě dosažených výsledků v podobě základních fyzikálně-mechanických, tepelně-technických, akustických vlastností a zkoušek trvanlivosti vyvinutých výplňových hmot lze usuzovat, že tyto materiály jsou perspektivními alternativami k dnes běžně užívaným výplňovým materiálům na evropském stavebním trhu, kterými je zejména lehký beton, cihelná tvarovka a především materiály na přírodní bázi surovin. Z výsledků experimentální činnosti vyplývá, že navržené výplňové hmoty disponují velmi dobrými parametry pro použití na výstavbu svislých či vodorovných konstrukcí. Je však nutné neopomenout vyšší vlhkostní citlivost těchto přírodních materiálů. Ovšem použitá přírodní obnovitelná surovina je bezesporu výhodná v tom, že dokáže ve své struktuře zadržet přebytečnou vodu a v případě potřeby jí zase uvolní do okolního prostředí. Je bezesporu nutné při praktické realizaci s touto vlastností počítat.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] CHYBÍK, J., Přírodní stavební materiály, 1. vydání. Praha: Grada Publishing, a.s., 2009, 272 stran, ISBN978-80-247-2532-1.

[2] SVOBODA, L a kol. Stavební hmoty. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, s.r.o., 2005. 470 s. ISBN 80-8076-007-1.

[3] MINKE, G., MAHLE, F. Stavby ze slámy – Jak pořídit z balíků slámy standardní dům. 1. vyd. Praha: HEL, 2009. 143 s. ISBN 978-80-86167-31-2

[4] ADÁMEK, J. a kol. Vlastnosti a zkoušení stavebních materiálů. Brno: CERM, 1995. 96 s. ISBN 80-241-0609-7.

[5] TZB – info, [online], [cit. 2009 2-26]. Dostupný z WWW: http://www.tzb-info.cz/

[6] Časopis stavebnictví, [online], [cit. 2009 5-24]. Dostupný z WWW: http://www.casopisstavebnictvi.cz/

[7] SLADKÝ. V., Konopí – Šance pro zemědělství a průmysl, 1 vyd., Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací,62s,2004, ISBN 80-7271145-8

[8] Český statistický úřad, [online], [cit. 2015 3-30]. Dostupný z WWW: https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=statistiky#katalog=30840

[9] PFEIFEROVÁ, M., SRDEČNÝ, K., ŠIMEK, F.; Slaměný dům; ROSA: České Budějovice, 2001.

[10] MAKOVEC, J. Ekologie versus stavitelství - anebo proč stavět ekologicky. In Zdravé domy - Healthy houses, Přírodní materiály ve stavbách - Natural materials in buildings, Brno, 23. Listopadu 2005;

[11] Ekopanely CZ s.r.o. [online]. [cit. 2009 04-30]. Dostupný z WWW: http://www.ekopanely.cz/

[12] Jiho.českéstavby.cz, [online], [cit. 2009 5-24]. Dostupný z WWW: http://jiho.ceskestavby.cz/

[13] HERER, J. Císař nemá šaty, pravda o konopí. 1. vyd., Bystřice pod Hostýnem: Cannabis Sativa s.r.o. 1994. 141 s.

[14] Konopan – internetový obchod s produkty z konopí, [online], [cit. 2009 5-24]. Dostupný z WWW: http://www.konopan.cz/

[15] Konopa, o. s. - vše o konopí [online]. [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: http://www.konopa.cz/.

[16] Konopnářský svaz České republiky [online],. Dostupný z WWW: http://www.konopi.info/default.asp?ch=203&typ=1&val=35676&ids=1999

[17] Jihočeská univerzita České Budějovice – fakulta zemědělská (Databáze využití nepotravinářské zemědělské produkce), [online], [cit. 2009 5-24]. Dostupný z WWW: http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/

[18] ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. Pěstování rostlin. Praha [online]. 2010, [cit. 2010-04-01]. Dostupné z: http://etext.czu.cz/php/skripta/.

[19] RUMAN, M., KLVAŇOVÁ, L., Konopí – staronový přítel člověka, Chraštice, 2008, 36 s., ISBN 978-80-254-1825-3

[20] CONRAD, C. Konopí pro zdraví (Hemp for health). 1. vyd. Praha: Pragma, 2001. 135 s. ISBN 80-7205-834-7.

[21] KLVAŇOVÁ, L., KONOPÍ – Biomasa pro život. X, 2007, 24 s., ISBN 978-80-254-1149-0

[22] Legislativa pěstování konopí v ČR- zákon č. 167/1998 Sb. [online], [cit. 2008-04-15]. Dostupný z WWW: http://www.konopa.cz/soubory/o0000000472.pdf

[23] Biom.cz – vše o využití biomasy [online], [cit. 2009 2-26]. Dostupný z WWW: http://www.biom.cz/

[24] http://ekooko.cz/wp-content/uploads/2015/07/konop%C3%AD-stonek-vyu%C5%BEit%C3%AD.jpg

[25] Ekocentrum zelená pumpa – o konopí [online], [cit. 2009 2-26]. Dostupný z WWW: http://www.zelenapumpa.cz/

[26] Izolace konopí cz s.r.o., [online], [cit. 2009 5-24]. Dostupný z WWW: http://www.termo-hanf.de/

[27] CHYBÍK, J., Zelená pro přírodní stavební materiály, 7. G Sedmá generace, 18, č. 1, 2009b, s. 1-10. ISSN 1212-0499

[28] KUBÁNEK, V., Pěstování konopí a ekologické domy z pazdeří ve Francii, 2009, In: www.koniopa.cz

[29] VLČEK, M., Hlína konopí a rákos – znovuobjevené materiály pro zdravé bydlení, 2008, Zdravé domy, Brno, s. 41-48, ISBN 978-80-214-3645-0.

[30] Přírodní izolace, [online], [cit. 2015 4-15]. Dostupný z WWW: http://hempflax.com/producten/hempflax-producten-voor-de-bouw/hempflax-natuur-isolatie

[31] iMateriály.cz, [online], [cit. 2009 5-24]. Dostupný z WWW: http://www.imaterialy.cz/

[32] Cihlové konopí HESTIA, [online], [cit. 2009 6-05]. Dostupný z WWW: http://www.brique-isolation-chanvre.com/

[33] MEHA – Izolace podlahových konstrukcí, [online], [cit. 2009 6-08]. Dostupný z WWW: http://www.meha.de/

[34] Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí, [online], [cit. 2009 6-08]. Dostupný z WWW: http://www.cideas.cz/

[35] CHANVRIBLOC, [online], [cit. 2009 6-08]. Dostupný z WWW: http://www.chanvribloc.com/

[36] EASYCHANVRE , [online], [cit. 2009 6-08]. Dostupný z WWW: http://www.easychanvre.fr

[37] KEPRDOVÁ, Š. PŘÍPRAVA CEMENTOKONOPNÝCH DESEK A JEJICH VYUŽITÍ VE STAVEBNICTVÍ. In Příspěvky konference JUNIORSTAV 2016. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2016. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-5311- 1.

[38] Tradical® hemp and lime products [online], [cit. 2009-04-24]. Dostupný z www: http://www.lhoist.co.uk/tradical/hemp-lime.html

[39] VAVERKA J., HAVIŘOVÁ Z., JINDRÁK M. a kolektiv - Dřevostavby pro bydlení, Praha: Grada, 2008. 380 s. ISBN 978-80-247-2205-4

[40] KOBL, J., Dřevostavby:systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště, Praha: Grada, 2008, 317 s., ISBN 978-80-247-2275-7

[41] A Lhoist Group Company, stavební chemie, [online], [cit. 2010 12-10]. Dostupný z WWW: http:// www.lhoist.co.uk/

[42] Construire de Chanvre , [online], [cit. 2009 6-08]. Dostupný z WWW: http://www.construction-chanvre.asso.fr/

[43] DEXOR, stavební hmoty – interní technické materiály, [online], [cit. 2011 01-02]. Dostupný z WWW: http://www.dexor.cz/

[44] MABEKO, Prodej a distribuce přírodních produktů a stavebních materiálů [online], [cit. 2011 01-01]. Dostupný z WWW: http://www.mabeko.cz/

[45] HEMPCRETE UK, [online], [cit. 2015 6-05]. Dostupný z WWW: https://www.ukhempcrete.com/

[46] HEMPCRETE AU [online], [cit. 2015 6-02]. Dostupný z WWW http://www.hempcrete.com.au/

[47] LIMECRETE UK, [online], [cit. 2015 5-05]. Dostupný z WWW http://limecrete.co.uk/hempcrete/

[48] BÁRTA. R., CHEMIE A TECHNOLOGIE CEMENTU, Praha, ČSAV, 1961

[49] PYTLÍK, P. Technologie betonu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2000

[50] ŠAUMAN, Z. Maltoviny I. 1. vyd. Brno: PC-DIR spol. s r.o., 1993. 193 s. ISBN 80-214-0509-0.

[51] TAYLOR, P., C.; TAIT, R., B. Effects of fly ash on fatigue and fracture properties of hardened cement mortar. Cement and Concrete Composites [online]. Elsevier, 1999. Volume 21, Issue 3, p. 223–232. [vid. 8. listopadu]. ISSN 0958–9465. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946599000050

[52] Informace o ložovém popílku. [online], [cit. 2012 5-05]. Dostupný z WWW: http://www.ekologie-energie.cz/fosilni-paliva.html

[53] Informace o filtrovém popílku. Dostupné z Internetu: http://www.seminarky.cz/Vycistene-megawaty-5919

[54] AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. Progress in Energy and Combustion Science [online]. Elsevier, June 2010. Volume 36, Issue 3, p. 327–363. [vid. 8. listopadu]. ISSN 0360–1285. Dostupné z WWW: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128509000604

[55] URL:<http://waste.fce.vutbr.cz

[56] HOOTON, R., D.; EMERY, J., J. Glass content determination and strength development predistions vitrified blast burnace slag. ACI SP 79, Detroit, 1983. p. 943–962.

[57] MANTEL, D., G. Investigation into the hydraulic activity of five granulated blast furnace slag with eight different portland cements. ACI Materials Journal 91, 1994. p. 471–477.

[58] HOGAN, F., J.; ROSE, J., H. ASTM specification for ground iron blast furnace slag: Its development use and future. ACI SP 91, Detroit, 1986. p. 1551–1576.

[59] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J., Stavební akustika a zvukoizolační materiály. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 209 s. ISBN 80-214-2117-7.

[60] KUKLE, S.,GRAVITIS, J., PUTNINA, A., and STIKUTE, A.; The Effect of Steam Explosion Treatment on Technical Hemp Fibres, Environment Technology Resources Procedings of the 8th Internationa Scentific and Practical Conference. Volume 1, (2011), pp 230-237

[61] SEDELNIK, N.; Properties of Hemp Fibre Cottonised by Biological Modification of Hemp Hackling Noils, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, Vol. 12, No. 1 (2004), pp 58-60

[62] DAVID, A. and SEWARD, N.; 'Structure' in Metric Handbook: Planning and Design Data, ed. by David Littlefield, 3rd edn (Oxford: Elsevier, 2008)

[63] STEVE, A., Building with Hemp (Kerry: Seed Press, 2005)

[64] BEVAN, R. and WOOLLEY, T., Hemp Lime Construction: A Guide to Building with Hemp Lime Composites (Bracknell: BRE Press, 2008)

[65] BUNN, S., 'Wattle', in Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World: Volumn 1 Theories and Principles, ed. by Paul Oliver (Cambridge: Cambridge University press, 1997)

[66] DE BRUIJN, P., 'Hemp Concretes: Mechanical Properties using both Shives and Fibres' (Licentiate Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, 2008)

[67] DRZAL, L.T. and others, 'Biobased Structural Composite Materials for Housing an Infrastructure Applications: Opportunities and Challanges', in NSF-PATH Housing

Research Agenda and Workshop, Proceedings and Recomendations, ed. by Matt Syal, 2 (2004), pp. 129-140

[68] DUKE, J. A., Handbook of Energy Crops: Cannabis Sativa L (Unpublished, 1983)

[69] DWEIB, M. A. and others, 'All Natural Composite Sandwich Beams for Structural Application', Journal of Composite Structures, 63 (2004), 147-157

[70] EVRARD, A., DE HERDE, A. and MINET, J., 'Dynamical Interactions Between Heat and Mass Flows in Lime-Hemp Concrete', in Research in Building Physics and Building Engineering, ed. by Paul Fazio and others (London: Taylor and Francis, 2006), pp 69-77

[71] HAUTALA, M., PASILA, A. and PIRILA, J., 'Use of Hemp and Flax in Composite Manufacture: A Search for New Production Methods', Journal of Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 35 (2004), 11-16

[72] HIRST, E. and others, 'Characteristics of Low Density Hemp-Lime Composite Building Materials under Compression Loading', Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 28-30 June 2010

[73] MADSON, B. and others, 'Hemp Yarn Reinforced Composites: Yarn Characteristics', Journal of Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 38.10 (2007), 2194-2203

[74] ROBINSON, R., The Great Book of Hemp: The Complete Guide to the Environmental, Commercial, and Medicinal Uses of the World's Most Extraordinary Plant (Vermont: Park Street Press, 1996)

[75] SMALL, E. and MARCUS, D., 'Hemp: A New Crop with New Uses for North America', in Trends in New Crops and New Uses, ed. J. Janick and A. Whipkey (Alexandria: ASHS Press, 2002), pp. 284-326

[76] TICOALU, A., ARAVINTHAN, T. and CARDONA, F., A Review of Current Development in Natural Fiber Composites for Structural and Infrastructure Applications (Toowoomba: Engineers Austrailia, 2010)

[77] WILKINSON, S., 'A Study of the Moisture Buffering Potential Of Hemp in Combination with Lime and Clay-Based Binders' (unpublished master's thesis, Centre for Alternative Technology, 2009)

[78] ISAACS, N. Thermal insulation. *BUILD magazine*. 2007, č. 102, str. 110–111.

[79] BEVAN, R., WOOLEY, T., Hemp and Lime Construction: A Guide to Building with Hemp-Lime Composites [online]. [cit. 2014-12-05]. Dostupné z WWW: http://www.nnfcc.co.uk/tools/guide-to-building-with-hemp-lime-composites-nnfcc-07-001.

CITOVANÉ NORMY

[80] ČSN EN 844-1Kulatina a řezivo - Terminologie - Část 1: Obecné termíny společné pro kulatinu a řezivo. Praha: Český normalizační institut, 1997, 8 s.

[81] ČSN EN 197-1 Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Praha: Český normalizační institut, 2012, 36 stran.

[82] ČSN EN 196-2 Metody zkoušení cementu – Část 2: Chemický rozbor cementu. Praha: Český normalizační institut, 2013, 64 s.

[83] ČSN EN 459-1 ed. 2 - Stavební vápno - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Praha: Český normalizační institut, 2011, 48 s.

[84] ČSN EN 1097-3 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. Praha: Český normalizační institut, 1999, 16 s.

[85] ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor. Praha: Český normalizační institut, 2012, 20 s.

[86] ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. Praha: Český normalizační institut, 2003, 20 s.

[87] ČSN EN 196-3+A1 Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti. Praha: Český normalizační institut, 2009, 16 s.

[88] ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. Praha: Český normalizační institut, 2005, 28 s.

[89] ČSN 72 2071 - Popílek pro stavební účely - Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení. Praha: Český normalizační institut, 2011, 32 s.

[90] ČSN EN 196-6 Metody zkoušení cementu - Část 6: Stanovení jemnosti mletí. Praha: Český normalizační institut, 2010, 20 s.

[91] ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Český normalizační institut, 2009, 12 s.

[92] ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2009, 12 s.

[93] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2009, 20 s.

[94] ČSN 72 7012-3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku. Praha: Český normalizační institut, 1994, 8 s.

[95] ČSN EN 12667 Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku - Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu. Praha: Český normalizační institut, 2001. 60 s.

[96] ISO 8301 Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal resistance and related properties -- Heat flow meter apparatus

[97] ČSN EN 1609 Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení krátkodobé nasákavosti vody při částečném ponoření. Praha: Český normalizační institut, 2013, 12 s.

[98] ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Praha: Český normalizační institut, 1969, 8 s. + ZMĚNA Z1. Praha: Český normalizační institut, 2003. 2 s.

[99] ČSN ISO 10534-1 Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích - Část 1: Metoda poměru stojaté vlny. Praha: Český normalizační institut, 1999, 28 s.

[100] ČSN ISO 11654 Akustika – Absorbéry zvuku používané v budovách – Hodnocení zvukové pohltivosti. Praha: Český normalizační institut, 1998, 16 s.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

aj.	A jiné
apod.	A podobně
atd.	A tak dále
cca	Asi, přibližně
CA	Calciumaluminát
C_4AF	Tertakalciumaluminátferit
C_2F	Dikalciumferit
C_2S	Dikalciumsilikát
C_3S	Trikalciumsilikát
CFP	Carbon Footprint
ČR	Česká republika
ČSÚ	Český statistický úřad
EPS	Expandovaný polystyren
ETICS	External Thermal Insulating Composite Systems
EU	Evropská unie
event.	eventuálně
hm.	Hmotnostně
LCA	Life Cycle Assessment
max.	Maximálně, maximum
min.	Minimálně, minimum
např.	Na příklad
obr.	Obrázek
pozn.	Poznámka
př. n. l.	Před naším letopočtem
příp.	Případně
PVC	Polyvinylchlorid
Tab.	Tabulka
THC	Tetrahydrocannabinol (psychoaktivní látka)
tj.	To jest
tzv.	Tak zvaně, tak zvanou,…

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: *Příčný řez kmenem dřeva [1]* *13*
Obr. 2: *Třísky ze smrkového dřeva* *14*
Obr 3: *Řez Ekopanelem. [11]* *20*
Obr 5: *Druhy konopí: a) Konopí seté, b) Konopí indické, c) Konopí rumištní. [15]* *23*
Obr 6: *Pole technického konopí [16]* *25*
Obr 7: *Kombajn DEUTZ FAHR – TOP LINER pro kombinovanou sklizeň konopí. [15]* . *29*
Obr 8: *Sklízecí stroj typ Clipper s žacími lištami [21]* *29*
Obr 9: *Řez konopným stonkem [12]* *30*
Obr 10: *Technické konopí: a) v růstu [16]; b), c) různé frakce konopného pazdeří; d) vlákno.* *31*
Obr 11: *Ukázka všech produktů z konopí použitelné pro stavební využití [24]* *34*
Obr 12: *Schéma využití technického konopí [26]* *34*
Obr 13: *Konopné termoizolační rohože. [26]* *38*
Obr 14: *Konopné termoizolační desky HESTIA. [32]* *39*
Obr 15: *Izolační hmota MEHABIT. [33]* *40*
Obr 16: *Konopná termoizolační zdící tvarovka [34].* *41*
Obr 17: *Jílovo – konopné stavební kameny. [15]* *42*
Obr 18: *Stavba rodinného domu* *43*
při použití chanvriblocu. [35] *43*
Obr 19: *Chanvribloc B15. [35]* *43*
Obr 20: *Easychanvrebloc. [36]* *44*
Obr 21: *Povrch cementokonopné desky. [37]* *45*
Obr 22: *Role konopného filcu. [26]* *46*
Obr 23: *Hrázděná stavba [42]* *48*
Obr 24: *Dávkování směsi pro hrázděná zdiva [38, 41]* *51*
Obr 25: *Schéma skladby konstrukce [38, 41]* *52*
Obr 26: *Pracovníci při aplikaci výplňové hmoty [44]* *52*
Obr 27: *27 výrobků skupiny cementů pro obecné použití [81]* *57*
Obr 28: *Vzorek vysokoteplotního popílku (vlevo) a detail totožného vzorku (vpravo)* *61*
Obr 29: *Vzorek popílku z fluidního spalování (vlevo) a detail totožného vzorku (vpravo).* *63*
Obr 30: *Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – I. Etapa* *68*
Obr 31: *Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – II. Etapa* *68*

Obr 32: *Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – III. Etapa 69*
Obr 33: *Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – IV. Etapa 69*
Obr 34: *Schéma postupu řešení předkládané disertační práce – V. Etapa..... 70*
Obr 35: *Vicatův přístroj [87] 72*
Obr. 36: *Blainův přístroj, technické parametry [90] 75*
Obr 37: *Kuntova trubice: (1 - generátor; 2 – analyzátor; 3 – trubice; 4 – držák vzorku; 5 – sonda; 6 – mikrofon; 7 – reproduktor; 8 – vzorek; 9 – píst (dno) držáku; 10 – vzduchový polštář) [59]..... 80*
Obr 38: *Ukázka zkušebních vzorků výplňové hmoty o velikosti 100 x 100 x 100 mm..... 82*
Obr 39: *Ukázka zkušebního vzorků výplňové hmoty o velikosti 100 x 100 x 400 mm 82*
Obr 40: *Ukázka zkušebního vzorků výplňové hmoty o velikosti 300 x 300 x 50 mm 83*
Obr 41: *Třísky ze smrkového dřeva..... 87*
Obr 42: *Ukázka konopného pazdeří z Francie – A 87*
Obr 43: *Ukázka konopného pazdeří z ČR - B..... 87*
Obr 44: *Ukázka konopného pazdeří z ČR - C 88*
Obr 45: *Sláma vlevo při odebrání z kvádrového balíku, vpravo po nasekání 88*
Obr 46: *Graf křivky zrnitosti dřeva..... 89*
Obr 47: *Graf křivky zrnitosti konopí A..... 90*
Obr 48: *Graf křivky zrnitosti konopí B..... 91*
Obr 49: *Graf křivky zrnitosti konopí C..... 92*
Obr 50: *Výsledné křivky stanovení velikosti částic vybraných druhotných surovin 103*
Obr 51: *Grafické porovnání objemových hmotností navržených receptur v čase..... 107*
Obr 52: *Grafické porovnání pevností v tlaku navržených receptur v čase 108*
Obr 53: *Grafické porovnání součinitele tepelné vodivosti po 28 dnech zrání..... 108*
Obr 54: *Graf porovnání objemových hmotností po 60 dnech zrání navržených receptur v 2. etapě se základní recepturou navrženou v 1. etapě 111*
Obr 55: *Graf porovnání pevností v tlaku po 60 dnech zrání navržených receptur v 2. etapě se základní recepturou navrženou v 1. etapě..... 111*
Obr 56: *Graf porovnání součinitele tepelné vodivosti navržených receptur v 2. etapě se základní recepturou navrženou v 1. etapě..... 112*
Obr 57: *Graf porovnání objemových hmotností po 60 dnech zrání - optimalizovaná receptura 1IIA..... 115*
Obr 58: *Graf porovnání pevností v tlaku po 60 dnech zrání - optimalizovaná receptura 1IIA 115*

Obr 59: *Graf porovnání součinitele tepelné vodivosti - optimalizovaná receptura 1IIA.. 116*
Obr 60: *Graf porovnání objemových hmotností po 60 dnech zrání - optimalizovaná receptura 4IIBV 116*
Obr 61: *Graf porovnání pevností v tlaku po 60 dnech zrání - optimalizovaná receptura 4IIBV 117*
Obr 62: *Graf porovnání součinitele tepelné vodivosti - optimalizovaná receptura 4IIBV117*
Obr 63: *Graf porovnání objemových hmotností po 60 dnech zrání - optimalizovaná receptura 2IIBS3 ..... 118*
Obr 64: *Graf porovnání pevností v tlaku po 60 dnech zrání - optimalizovaná receptura 2IIBS3 ..... 118*
Obr 65: *Graf porovnání součinitele tepelné vodivosti - optimalizovaná receptura 2IIBS3 ..... 119*
Obr 66: *Graf porovnání objemových hmotností v čase výsledných receptur 123*
Obr 67: *Graf porovnání pevností v tahu za ohybu v čase výsledných receptur 124*
Obr 68: *Graf porovnání pevností v tlaku v čase výsledných receptur 125*

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: *Vybrané vlastnosti dřeva [4]* *12*
Tab. 2: *Fyzikálně-mechanické požadavky na cementy [81]* *58*
Tab. 3: *Výsledné sypné hmotnosti surovin* *88*
Tab. 4: *Sítový rozbor smrkových třísek* *89*
Tab. 5: *Sítový rozbor konopí A* *89*
Tab. 6: *Sítový rozbor konopí B* *90*
Tab. 7: *Sítový rozbor konopí C* *91*
Tab. 8: *Výsledné nasákavosti jednotlivých surovin* *92*
Tab. 9: *Výsledky rozboru výluhu smrkových třísek* *93*
Tab. 10: *Výsledky rozboru výluhu konopí A* *94*
Tab. 11: *Výsledky rozboru výluhu konopí B* *95*
Tab. 12: *Výsledky rozboru výluhu konopí C* *95*
Tab. 13: *Výsledky rozboru výluhu slámy* *96*
Tab. 14: *Výsledky počátků a doby tuhnutí u jednotlivých past* *97*
Tab. 15: *Výsledky měřených vlastností cementových malt v čase* *98*
Tab. 16: *Vyhodnocení kritérií daných normou ČSN EN 196-1 [81] pro konkrétní cement* *99*
Tab. 17: *Výsledky chemických analýz vybraných druhotných surovin* *100*
Tab. 18: *Výsledky stanovení měrné a sypné hmotnosti a měrného povrchu vybraných druhotných surovin* *101*
Tab. 19: *Jednotlivé hodnoty pro stanovení velikosti částic druhotných surovin* *102*
Tab. 20 *Výsledky mineralogického rozboru vybraných druhotných surovin* *103*
Tab. 21: *Složení základních receptur v hmotnostních %.* *106*
Tab. 22: *Výsledky jednotlivých zkoušek navržených receptur v 1. etapě* *106*
Tab. 23: *Výsledky jednotlivých zkoušek navržených receptur v 2. etapě + výsledky výchozích základních receptur* *110*
Tab. 24: *Výsledky jednotlivých zkoušek navržených receptu v 3. etapě* *113*
Tab. 25: *Výsledky měření objemových hmotností výsledných receptur výplňových hmot* *123*
Tab. 26: *Výsledky měření pevnosti v tahu za ohybu výsledných receptur výplňových hmot* *124*
Tab. 27: *Výsledky měření pevnosti v tlaku výsledných receptur výplňových hmot* *125*
Tab. 28: *Výsledky výpočtu koeficientu konstruktivnosti u zkušebních vzorků po 120 dnech zrání* *126*

Tab. 29: *Výsledky stanovení součinitele tepelné vodivosti po 28 dnech zrání ve vysušeném stavu výsledných receptur výplňových hmot 127*
Tab. 30: *Výsledky krátkodobé nasákavosti po 28 dnech zrání ve vysušeném stavu výsledných receptur výplňových hmot 127*
Tab. 31: *Výsledky pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání, po 25 a 50 cyklech zmrazování a rozmrazování výsledných receptur výplňových hmot 128*
Tab. 32: *Třídy zvukové pohltivosti dle ČSN EN ISO 11654 [100] 129*
Tab. 33: *Výsledky Třídy zvukové pohltivosti dle ČSN EN ISO 11654 [100] u výsledných receptur výplňových hmot 129*
Tab. 34: *Výsledky pevnosti v tlaku po roční venkovní expozici u výsledných receptur výplňových hmot 130*