



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

MOŽNOST VYUŽITÍ TECHNOLOGIE DUSANÉ HLÍNY PRO STAVBU RODINNÉHO DOMU

POSSIBILITY TO USE TECHNOLOGY OF RAMMED EARTH FOR BUILDING A
FAMILY HOUSE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Zadražil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. NIKOL ŽIŽKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3656 Městské inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program
Studijní obor	3656T025 Městské inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Lukáš Zadražil
Název	Možnost využití technologie dusané hlíny pro stavbu rodinného domu
Vedoucí práce	doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Soudani, L. et al. Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements, *Solar Energy* 141 (2017), p. 70–80.

Cui, K. et al. The coupling effects of freeze-thaw cycles and salinization due to snowfall on the rammed earth used in historical freeze-thaw cycles relics in northwest China, *Cold Regions Science and Technology* 160 (2019), p. 288–299.

Toufigh, V. et Kianfar, E. The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts, *Construction and Building Materials* 200 (2019), p. 616–629.

Gomes, M., I. et al. Rammed earth walls repair by earth-based mortars: The adequacy to assess effectiveness, *Construction and Building Materials* 205 (2019), p. 213–231.

Jain, D. et al. Enhanced thermal resistance of rammed earth blocks with recycled industry

by-products, *International Journal of Thermal Sciences* 138 (2019), p. 447–458.

GRAHAM, P. *Building Ecology: First Principles For a Sustainable Built Environment*, Blackwell Science Ltd, 2002, ISBN 10:0632064137.

Články v odborných časopisech, sbornících a jiná odborná literatura.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Ačkoliv je technologie dusané hlíny (RE – Rammed Earth) již po staletí celosvětově známou, představuje technologii, která je v ČR velmi málo používaná. Ovšem s aktuálně řešenými požadavky na trvale udržitelnou výstavbu a s tím související možnosti snižování negativních dopadů stavebnictví na životní prostředí, roste ve stavební praxi zájem o stavění z tzv. alternativních materiálů, mezi které lze zařadit právě dusanou hlínu. Aby bylo možné tuto technologii využít pro stavbu rodinného domu, nestačí pouze ekologický přínos tohoto materiálu, ale je třeba splnit požadované technické parametry a právě na tuto problematiku bude diplomová práce zaměřena. V práci proveďte:

1. Za použití tuzemské a zahraniční odborné literatury zpracujte rešerši zaměřenou na možnosti využití technologie dusané hlíny ve stavebnictví.
2. Uveďte příklady realizace staveb s využitím technologie dusané hlíny.
3. Popište stávající způsoby testování fyzikálně-mechanických vlastností dusané hlíny a navrhnete metodiku zahrnující optimalizaci složení směsi, výrobu zkušebních těles a způsob testování.
4. Navrženou metodiku ověřte na třech vzorcích hlíny, na základě dosažených výsledků proveďte optimalizaci.
5. Popište potřebné kroky, které umožní využití dusané hlíny pro stavbu rodinného domu s ohledem na platnou legislativu.
6. Na základě dosažených výsledků sestavte doporučení pro stavební praxi.

Rozsah práce 60–80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá možnostmi využití hlíny jako stavebního materiálu pro stavbu rodinných domů pomocí technologie dusané hlíny. Za použití tuzemské a zahraniční literatury je zpracována rešerše, ve které je popsán historický vývoj hliněného stavitelství, dále je zpracován přehled historických technologií hliněného stavitelství a samotný historický vývoj technologie dusané hlíny. Následně se práce zabývá velmi aktuální problematikou trvale udržitelné výstavby, která je s využitím přírodních materiálů, jako například hlína, úzce spjata. Dále práce popisuje samotnou technologii dusané hlíny s příklady již realizovaných staveb, jak na území České republiky, tak ve světě. V poslední části teoretické rešerše jsou uvedeny některé způsoby testování fyzikálně-mechanických vlastností dusané hlíny, používané v zahraničí. V rámci experimentální části se první etapa práce zabývá návrhem hliněných směsí pro tři konkrétní lokality (Dolany, Valchov a Dolní Těrlicko), pomocí výpočetního modelu v excelu. V dalších etapách experimentální části je navrhnutá a otestována metodika pro výrobu zkušebních těles pro tlakovou zkoušku a dále jsou provedeny ostatní vybrané zkoušky pro lepší znalost fyzikálně-mechanických vlastností navržených hliněných směsí. V poslední části je v práci rozebrána problematika legislativního procesu povolení staveb z dusané hlíny společně s doporučením pro stavební praxi.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hlína, technologie dusané hlíny, trvale udržitelná výstavba, cement, Dolany, Valchov, Dolní Těrlicko

ABSTRACT

This Diploma thesis deals with possibilities of utilizing earth as a building material for construction of detached houses using the rammed earth technology. Research in domestic and foreign literature led to description of the historical development of building from earth, overview of historical technologies and historical development of the technology of rammed earth. Subsequently, the thesis deals with nowadays very relevant problematics of sustainable construction, which is closely related to the use of natural materials, such as earth. Furthermore, the thesis describes the technology of rammed earth with examples of already realized buildings, both in the Czech Republic and other countries. The last part of the research describes selected methods of testing the physical-mechanical properties of rammed earth used abroad. The first section of experimental part deals with the design of earth mixtures for three specific sites (Dolany, Valchov and Dolní Těrlicko), using a computer model in Excel. The rest of experimental part contains the design of methodology for the production of test specimens for the pressure testing, and selected tests are performed for better knowledge of the physical-mechanical properties of the designed earth mixtures. The last part of the thesis discusses the problematics of legislative process of permitting rammed earth buildings and practical construction recommendations.

KEYWORDS

Earth, rammed earth technology, sustainable building, cement, Dolany, Valchov, Dolní Těrlicko

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Lukáš Zadražil *Možnost využití technologie dusané hlíny pro stavbu rodinného domu*. Brno, 2020. 128 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Možnost využití technologie dusané hlíny pro stavbu rodinného domu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 7. 1. 2020

Bc. Lukáš Zadražil
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Možnost využití technologie dusané hlíny pro stavbu rodinného domu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 7. 1. 2020

Bc. Lukáš Zadražil
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl velice rád poděkovat skvělé doc. Nikol Žižkové, Ph.D. za ochotu, pomoc, spolupráci, cenné informace, a především trpělivost při vedení diplomové práce. Poděkování patří také Ing. Michalovi Přikrylovi, který do práce přinesl cenné vědomosti, rady a nápady, bez kterých bych tato diplomová práce nebyla tak přínosná.

Dále bych chtěl poděkovat všem svým spolužákům, spíše už kamarádům, za společně strávené chvíle během celého studia, které jsem si užil a budou mi chybět.

V neposlední řadě patří největší dík mé rodině za psychickou a finanční podporu během celého studia. Především bych chtěl poděkovat mému otci, který se podílel na této diplomové práci výrobou nově navrhnutých forem pro zkušební tělesa, bez kterých by nebylo možné ve výzkumu dále pokračovat.

OBSAH

1	ÚVOD	6
2	CÍL PRÁCE	7
3	HISTORIE A VÝVOJ HLINĚNÝCH STAVEB	8
3.1	Historický přehled technologií hliněného stavitelství	8
3.1.1	Technologie nepálených cihel	8
3.1.2	Technologie hliněných válků	9
3.1.3	Technologie klasovité vazby zdiva.....	10
3.1.4	Technologie dusané hlíny	11
3.1.5	Hliněno-slaměné konstrukce v kombinaci se dřevem	12
3.1.5.1	Dřevěný výplet obalený hliněnou směsí	12
3.1.5.2	Trámová stěna obalená hliněnou směsí	12
3.2	Historický vývoj technologie dusané hlíny ve světě	13
3.2.1	Čína.....	14
3.2.2	Himaláj.....	15
3.2.3	Blízký východ a Střední Asie	15
3.2.4	Středomoří	15
3.2.5	Muslimská expanze	15
3.2.6	Pozdní středověká Evropa	16
3.2.7	Expanze do Ameriky.....	16
3.2.8	18. století v Evropě	16
3.2.9	Expanze v 18. a 19. století.....	17
3.2.10	20. století	17
3.2.11	Současnost	17
4	TRVALE UDRŽITELNÁ VÝSTAVBA	19

4.1	Udržitelnost budov	22
4.1.1	Tradiční přístup k výstavbě	22
4.1.2	„Udržitelný“ přístup k návrhu budov	22
4.1.2.1	Energie	24
4.1.2.2	Materiály	25
4.1.2.3	Voda	26
4.1.2.4	Odpady.....	27
4.2	Udržitelné navrhování	28
5	MOŽNOSTI VYUŽITÍ TECHNOLOGIE DUSANÉ HLÍNY VE STAVEBNICTVÍ.....	30
5.1	Popis technologie dusané hlíny	30
5.1.1	Hliněný materiál	30
5.1.2	Suroviny pro dusanou hlínu	32
5.1.3	Složení hliněné směsi pro dusání.....	32
5.1.4	Využití dalších materiálů pro dusanou stěnu.....	33
5.1.5	Příprava směsi	35
5.1.6	Bednění	35
5.1.7	Dusadla.....	36
5.1.8	Proces dusání.....	36
5.1.9	Otvory, instalace	37
5.1.10	Odbedňování.....	38
5.1.11	Ochrana dusané stěny před povětrnostními vlivy	38
5.1.12	Trendy vývoje dusaných stěn.....	38
5.2	Příklady staveb v České republice	39
5.2.1	Restaurace Hliněnka v Benicích u Prahy	39
5.2.2	Rodinný dům v Čelákovících	41
5.3	Příklady staveb ze světa	43
5.3.1	Sušárna bylin firmy Ricola AG, Laufen	43
5.3.2	Rammed Earth House Rauch.....	45

6 ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ DUSANÉ HLÍNY	47
6.1 Velká Británie.....	47
6.1.1 Úvod.....	47
6.1.2 Zkušební metody.....	48
6.1.2.1 Zkušební tělesa.....	48
6.1.2.2 Zhutnitelnost	48
6.1.2.3 Pevnost v tlaku	49
6.1.2.4 Smršťování.....	50
6.1.2.5 Pevnost v tahu za ohybu.....	50
6.1.2.6 Smyková pevnost	51
6.1.2.7 Zrychlený test vodní eroze	51
6.1.2.8 Odolnost proti otěru	53
7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	55
7.1 Metodika práce	55
7.2 Použité suroviny	59
7.2.1 Hlína.....	59
7.2.1.1 Vlhkost.....	59
7.2.1.2 Zrnitost.....	60
7.2.1.3 Zhutnitelnost	60
7.2.1.4 Výsledky laboratorních zkoušek odebraných hlín.....	60
7.2.2 Písek.....	63
7.2.3 Štěrk.....	64
7.2.4 Cement.....	64
7.3 I. Etapa – optimalizace složení hliněné směsi	66
7.3.1 Popis výpočetního modelu	66
7.4 II. Etapa – návrh metodiky výroby zkušebních těles pro tlakovou zkoušku..	70
7.4.1 Návrh hliněné směsi.....	70

7.4.2	Příprava hliněné směsi.....	71
7.4.3	Optimalizace tvaru zkušebního tělesa.....	73
7.4.4	Výroba a hutnící proces zkušebních těles podle navržené metodiky.....	74
7.4.4.1	Zkušební těleso válec 150×300 mm	74
7.4.4.2	Zkušební těleso krychle 100×100×100 mm	76
7.4.4.3	Zkušební těleso válec 80×160 mm.....	77
7.4.5	Výsledky tlakových zkoušek I. sady zkušebních těles.....	78
7.5	III. Etapa - optimalizace návrhu metodiky výroby zkušebních těles pro tlakovou zkoušku	84
7.5.1	Redukce tvaru zkušebního tělesa	84
7.5.2	Návrh nových hutnících forem	84
7.5.3	Popis výroby zkušebních těles v nových formách	86
7.5.3.1	Návrh hliněných směsí	86
7.5.3.2	Výroba zkušebních těles válce 80×160 mm	87
7.5.4	Výsledky tlakových zkoušek II. sady zkušebních těles.....	88
7.6	IV. Etapa - další prováděné zkoušky na testovaném materiálu.....	90
7.6.1	Pevnost v tahu za ohybu.....	91
7.6.2	Odolnost proti vodě	93
7.6.3	Stanovení součinitele tepelné vodivosti	97
7.6.4	Požární odolnost.....	99
8	LEGISLATIVNÍ PROCES POVOLENÍ STAVBY Z DUSANÉ HLÍNY.....	100
9	DOPORUČENÍ PRO STAVEBNÍ PRAXI	103
10	SHRnutí A DISKUZE VÝSLEDKŮ	104
11	ZÁVĚR.....	108
12	REJSTŘÍKY	110

12.1	Seznam použitých zdrojů	110
12.2	Seznam obrázků.....	113
12.3	Seznam tabulek.....	116
12.4	Seznam grafů.....	117
12.5	Seznam schémat	118

1 ÚVOD

Hlína, kámen a dřevo byly materiály, které se po tisíciletí používaly na výstavbu obytných staveb, ve kterých člověk žil bez újmy na zdraví. V dnešní době, kdy se v převážné většině staví z moderních materiálů (keramické tvárnice, beton), které mají oproti tradičním materiálům lepší mechanické vlastnosti, díky kterým lze stavět vyšší budovy při zachování stejné tloušťky stěn, se hlína, kámen a dřevo dostaly do skupiny materiálů, které nejsou v dnešní době až tak využívány.

Hlína, jakožto jeden z nejstarších stavebních materiálů byl využíván od počátku samotné existence člověka. Předností tohoto přírodního materiálu je nejen velká akumulace tepla, ale i jeho zdravotní nezávadnost a příznivé působení na člověka. Díky svým vlastnostem je hlína schopna pojmout vysoký obsah vzdušné vlhkosti a následně jí postupně uvolňovat do interiéru, čímž vytváří stabilní teplotně – vlhkostní mikroklima, které je příznivé například pro astmatiky.

Zároveň s těmito „historicky tradičními“ materiály úzce souvisí téma trvale udržitelné výstavby, které je v současné době diskutováno nejen mezi odborníky. Z ekonomického a environmentálního hlediska představuje výroba stavebních materiálů, výstavba budov a jejich následný provoz významnou spotřebu surovin a energetických zdrojů. Z těchto hledisek by mohla být technologie dusané hlíny, kterou se zabývá tato diplomová práce, jednou z mnoha možných variant výstavby, která je přívětivější k životnímu prostředí a dokáže tak lépe naplnit cíle trvale udržitelné výstavby.

2 CÍL PRÁCE

Tato diplomová práce se zabývá využitím technologie dusané hlíny pro stavbu obytných staveb. Práce si klade za cíl seznámit čtenáře s historií a vývojem technologie dusané hlíny a hliněného stavitelství všeobecně. Dále bude v teoretické části popsána velmi aktuální problematika trvale udržitelné výstavby a její souvislosti s hliněným stavitelstvím a následně bude popsána samotná technologie dusané hlíny (rammed earth) s příklady již realizovaných staveb, jak na území České republiky, tak ve světě. V poslední kapitole teoretické části budou uvedeny některé způsoby testování fyzikálně-mechanických vlastností dusané hlíny ze zahraničí.

V experimentální části se bude diplomová práce v první řadě zabývat návrhem hliněných směsí pro tři konkrétní lokality (Dolany, Valchov a Dolní Těrlicko), kde by měly vzniknout stavby z dusané hlíny. Dále se bude zabývat návrhem a optimalizací metodiky výroby zkušebních těles pro talkovou zkoušku hliněných směsí. Podle navržené metodiky budou vyrobena zkušební tělesa, která se následně podrobí tlakové zkoušce pro stanovení jejich výsledných pevností. V následující části se bude diplomová práce zabývat testováním dalších fyzikálně-mechanických vlastností navržených hliněných směsí, kterými jsou pevnost v tahu za ohybu, odolnost proti vodě a součinitel tepelné vodivosti – λ . V posledních kapitolách experimentální části bude popsána problematika legislativního procesu povolení stavby z dusané hlíny a následně bude napsáno doporučení pro stavební praxi.

3 HISTORIE A VÝVOJ HLINĚNÝCH STAVEB

O tom, že byl člověk stvořen z hlíny existují legendy mnohých národů už od počátku věků. Člověk byl hlínou obklopen. Využíval její vlastnosti v mnoha oblastech, ať už v léčitelství, nebo k výrobě keramiky a dalších předmětů, ale hlavně hlínu využíval jako stavební materiál snad už jen proto, že hlína je materiál snadno tvarovatelný a člověku blízký.

Nepálená hlína je považována za jeden z nejstarších a nejpoužívanějších stavebních materiálů. Z počátku se z něj stavěly stavby velmi jednoduché, jako například masivní ochranné stěny a valy, které nalezneme prakticky po celém světě. Postupem času se ovšem techniky zdokonalovaly a mohla se tak zvyšovat i náročnost staveb. Existuje několik základních technologií, které se v průběhu historie vyvíjely, ale stále jsou založeny na několika základních konstrukčních principech [1, 2].

Těmito technologiemi jsou:

- hloubení staveb do hlíny;
- kombinované stavby ze dřeva s hlínou, kde se hlína využívala ve formě omazávek, výplní hrázděných stěn atd.;
- monolitické masivní hliněné stěny, dusání hlíny do bednění (extrémně náročné a pracné);
- stavby skládané z kusového staviva na hliněnou maltu [3].

3.1 Historický přehled technologií hliněného stavitelství

3.1.1 Technologie nepálených cihel

Tato technologie se řadí vůbec mezi ty nejstarší a nejrozšířenější. Připravená hliněná směs, která se většinou skládala z proseté jemné hlíny, vody a slaměné řezanky, se hutnila do malé dřevěné formy. Velikost formy byla nejčastěji o rozměrech 150×300×70 – 100 mm.

Po udusání se dřevěná forma ihned odstranila a cihla se nechala sušit 2 dny na slunci. Po dvou dnech se cihla mohla přemístit do prostoru určeného k sušení, kde se uložila na boční stranu a nechala schnout 3 – 4 týdny. Po vysušení bylo možno cihly použít pro stavbu. Nepálené cihly se spojovaly hliněnou maltou [4]. Ukázkou zdiva z nepálených cihel můžeme vidět na obrázku č. 1.



Obrázek 1: Zdivo z nepálených cihel spojených hliněnou maltou [foto autor]

3.1.2 Technologie hliněných válků

Hliněné války byly ručně tvarované válce ze slámy a hlíny. Tato varianta tvořila kusové hliněné stavivo. Oproti nepáleným cihlám se války nenechávaly řádně uschnout a stačilo je připravit těsně před začátkem stavby. Po oschnutí se války před ukládáním do zdiva namáčely, aby k sobě lépe přilnuly.

V České republice byla tato technologie nejvíce rozšířená na Hané a Znojemsku, kde se do dnešní doby některé stavby dochovaly [4]. Ukázkou zdiva z hliněných váleků můžeme vidět na obrázku č. 2.



Obrázek 2: Zdivo z hliněných válek [foto autor]

3.1.3 Technologie klasovité vazby zdiva

Jedná se o unikátní konstrukci stěny, která byla objevena na střední Moravě, jako jediná na světě. Technologie přípravy byla obdobná jako u hliněných válek, až na to, že války byly trojúhelníkového tvaru. Příklad klasovité vazby zdiva můžeme vidět na obrázku č. 3.



Obrázek 3: Zdivo z trojúhelníkových válek poskládané do klasovité vazby [foto autor]

3.1.4 Technologie dusané hlíny

Tato technologie se společně s nepálenými cihlami řadí mezi ty nejstarší a nejvíce používané po celém světě. Lehce zavlhlá hliněná směs, která se skládala z hlíny, písku a kameniva, se po vrstvách 100 – 200 mm dusala do dřevěného posuvného bednění. Dusání se provádělo ručním pěchem. Zvláštní pozornost byla věnována především dusání kolem stěn bednění, aby byl povrch stěny co nejlépe ztuhlý a tím odolnější vůči klimatickým vlivům.

V České republice se jedná o méně rozšířenou technologii. Oproti zahraničním stavbám se u nás dusané stěny omítaly [4]. Příklad dusané stěny můžeme vidět na obrázku č. 4.



Obrázek 4: Příklad dusané stěny se sloupovým posuvným bedněním [foto autor]

3.1.5 Hliněno-slaměné konstrukce v kombinaci se dřevem

3.1.5.1 Dřevěný výplet obalený hliněnou směsí

Tento typ konstrukce byl staticky velmi odolný. Dřevěný výplet byl ručně nahazován a oplácáván hliněnou směsí. Na takto vytvořenou stěnu byla následně nanášena hliněná omítka. Příklad tohoto typu konstrukce můžeme vidět na obrázku č. 5.



Obrázek 5: Dřevěný výplet obalený hliněnou směsí [foto autor]

3.1.5.2 Trámová stěna obalená hliněnou směsí

Druhou velmi únosnou konstrukcí je stěna z dřevěných trámů obalená hliněnou směsí. Do dřevěných trámů byly navrtávány dřevěné kolíky, na které se následně zachytila ručně nanášená hliněná směs. Finální vrstvou byla opět hliněno-slaměná vyhlazená omítka. Příklad trámové stěny můžeme vidět na obrázku č. 6.



Obrázek 6: Trámová stěna obalená hliněnou směsí [foto autor]

3.2 Historický vývoj technologie dusané hlíny ve světě

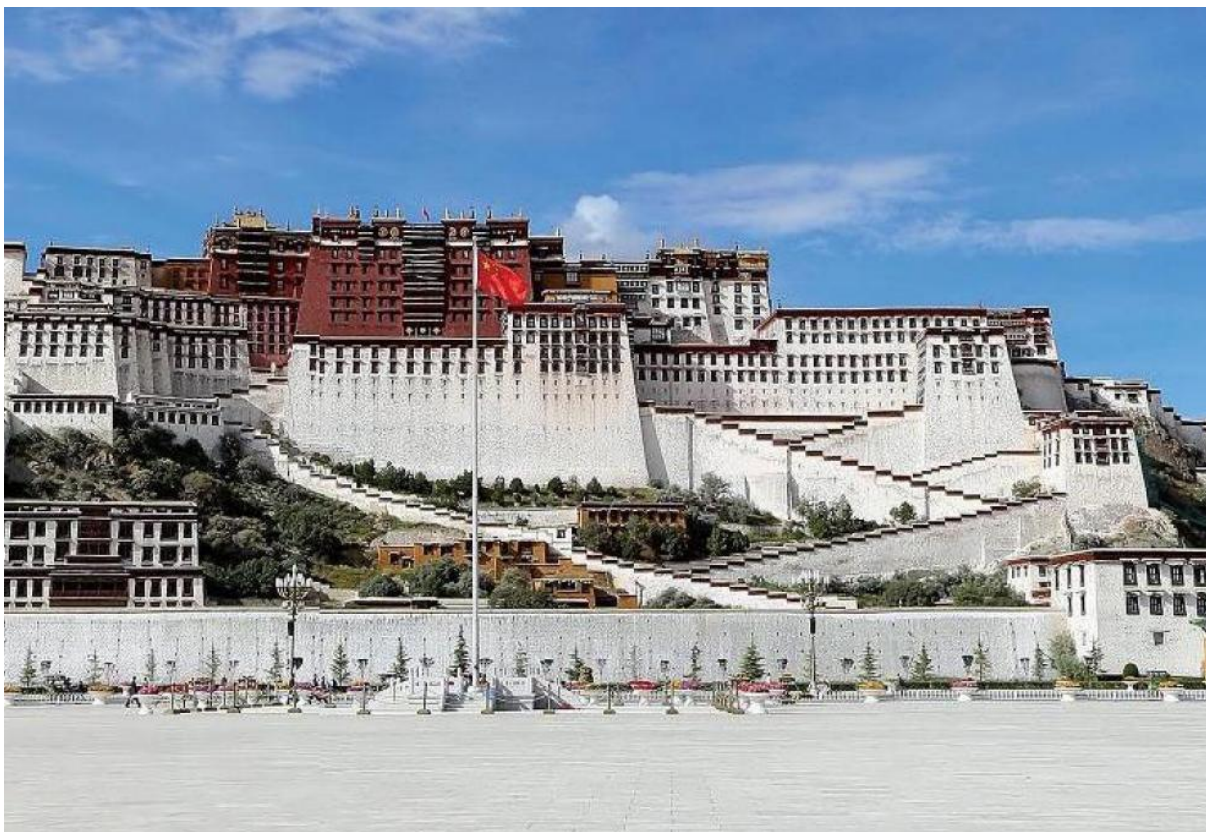
Technologie hliněných konstrukcí byly známy již více než 9000 let př. n. l. K masovému rozšíření hliněných staveb došlo především ve starověkých civilizacích, v oblastech vázaných na velké řeky. Jako příklad mohou posloužit nejstarší dochovaná kruhová obydlí z nepálených cihel na kamenné podezdívce z doby cca 8000 let př. n. l. nalezena v Palestině ve městě Jericho, které se zároveň pyšní nejstarším kontinuálně osídleným městem světa. Údajně v této době hliněné město dosahovalo rozlohy 40 000 m² [1, 5, 6].

Tato diplomová práce se zabývá právě technologií dusané hlíny. Je zde věnována kapitola historickému vývoji této technologie.

Dusaná hlína je technologie, kde se upravená sypká zemina hutní po vrstvách do demontovatelného bednění a vytváří tak masivní stěny. Mnoho zdrojů uvádí stejné příklady staveb postavených pomocí této technologie, jako např. palác Potála v tibetském hlavním městě Lhasa, který vidíme na obrázku č. 7, nebo části Velké Čínské zdi. Rozrůstání této technologie je však komplexnější, než je obvykle uváděno. Zdá se, že se

technologie dusané hlíny šířila po celém světě v řadě časových vln, z nichž je každá vyvolána odlišným souborem potřeb. Technologie dusané hlíny se nejvíce rozvíjela v Číně a oblastech kolem Středoziemního moře, odkud se následně šířila s pohybem národů do ostatních částí světa.

3.2.1 Čína



Obrázek 7: Palác Potála v tibetském hlavním městě Lhasa postavený kolem roku 700 n. l. [29]

V severní části Číny byly budovány nejjednodušší formy staveb z dusané hlíny. Nomádské národy začaly tvořit osady během éry Lung-shan (2310 – 1810 př. n. l.), kde tyto osady byly obklopovány obrannými zdmi právě z dusané hlíny. Jak osady rostly, rostla i složitost těchto obvodových zdí. Jedním z takových míst je oblast Taosi v provincii Shanxi, kde se nachází nejstarší observatoř na světě (cca 2000 př. n. l.), která má zeď z dusané hlíny o průměru 60 m. Odtud se potom dále technologie šířila do celé Číny a střední Asie.

3.2.2 Himaláj

Nejvíce staveb z dusané hlíny se nachází v království Ladakh, Mustang a Bhútán. V Himaláji je technika dusané hlíny považována za nejstarší stavební techniku. Byla používána i před použitím nepálených na slunci sušených cihel. Jako doklad o použití této technologie může být pevnost Basgo v království Ladakh, která byla postavena kolem roku 1300 n. l. Po vpádu muslimských národů do těchto království byla většina staveb zničena. Proto neexistují žádné důkazy o tom, zda se zde nacházely stavby z dusané hlíny i před tímto obdobím.

3.2.3 Blízký východ a Střední Asie

Důkazy o dusané hlíně jsou na blízkém východě velmi vzácné. V oblastech nebyl proveden dostatek archeologických průzkumů, a proto je identifikace nějakých nálezů obtížná. Stěny z nepálené hlíny naznačující technologii dusané hlíny byly nalezeny v Ománu a Íránu, ale nelze stoprocentně určit, že se jedná o tuto konkrétní technologii.

3.2.4 Středomoří

Další významnou oblastí technologie dusané hlíny je Středomoří. Jako první ji zde použilo fénické obyvatelstvo ve svých osadách. Féničané se rozšířili z Libanonu a založili početná města podél Středomoří včetně Kartága v roce 814 př. n. l. Fénické osady naznačují, že jak v severní Africe, tak ve Španělsku se tato technologie běžně používala.

Římané obdivovali technologii dusané hlíny, ale upřednostňovali spíše použití betonu. Avšak Vitruvius, římský architekt, který v letech 27 – 23 př. n. l. sepsal systematickou kompilaci římských stavebních technik uvádí, že ve městě Marseille byla technologie dusané hlíny používána.

3.2.5 Muslimská expanze

I když je zřejmé, že technologie dusané hlíny tu byla před a během římských časů, k masivnímu rozšíření mohlo dojít vlivem islámské expanze, kde byla tato technologie hojně používána. Po smrti Mohameda v roce 632 n. l. se muslimské armády rychle rozšiřovaly od Arabského poloostrova přes Persii a severní Afriku, kde muslimská přítomnost

trvala až do roku 1492. Jako příklad mohou být uvedeny městské hradby v Marrákeši nebo velké množství lidové architektury v Maroku.

3.2.6 Pozdní středověká Evropa

V roce 1492 byl ve Španělsku svržen poslední muslimský král Granady a tím byla definitivně ukončena muslimská vláda. Křesťanští panovníci zpočátku zaměstnávali muslimskou populaci jako řemeslníky, kteří měli osvojenou techniku dusané hlíny a jejich stavby se nachází skrz celé křesťanské Španělsko. Zavedením dělostřelectva se stavby z dusané hlíny začaly kombinovat s pálenými cihlami nebo kameny. I nadále sloužila technologie dusané hlíny jak pro vojenské, tak obytné stavby.

Dále ze Španělska se technologie dusané hlíny šířila přes Francii kolem roku 1660, kde se aluviální půdy ukázaly jako ideální pro tento typ konstrukce, až do Švýcarska, kde je nejstarší stavbou hrad Gonzenbach v přístavišti u Ženevy.

3.2.7 Expanze do Ameriky

Do Ameriky se technologie dusané hlíny dostala z Evropy, kam v roce 1549 poslal jezuitský misionář Manuel da Nobrega žádost, aby Evropa poslala řemeslníky schopné zvládnout technologii dusané hlíny. Následně v roce 1556 vznikl v Severní Americe na Floridě první dům právě pomocí této technologie, kde se použila směs hlíny a mořských mušlí. V následujících letech se technologie šířila ze Severní Ameriky dále do Jižní Ameriky.

3.2.8 18. století v Evropě

Převládající politická situace v Evropě na konci 18. století plná revolucí vedla k tomu, že technologie dusané hlíny začala být prosazována jako ekonomicky velmi výhodná stavební technika. Technologie se tak rozšířila po celé Evropě. Byla vynikající alternativou k tehdejší dřevě zástavbě, kterou často pohlcovaly a ničily mohutné požáry. Období tohoto rozkvětu však bylo v Evropě ukončeno počátkem 20. století, kdy se na trhu začíná objevovat pálená cihla a portlandský cement, s jejichž příchodem v následujících letech technologie dusané hlíny téměř zanikla.

3.2.9 Expanze v 18. a 19. století

Koncem 18. a 19. století došlo k prvním skutečně masovým migracím národů. Pohyb národů do Severní Ameriky, Austrálie a na Nový Zéland, vlivem například zlaté horečky v Kalifornii, přinesl dříve těmto zemím neznámé dovednosti a zvyky z nichž jednou byla i technologie dusané hlíny. Důkazem jsou stavby nacházející se ve všech zmíněných oblastech.

3.2.10 20. století

V období dvou světových válek se technologie dusané hlíny stala poměrně rychlou, a hlavně ekonomicky výhodnou variantou výstavby a rekonstrukce pro oblasti zdevastované válkou.

3.2.11 Současnost

V současné době, obzvláště v Evropě, zažívá technologie dusané hlíny nové znovuzrození. Může za to stále se zvyšující tlak na trvale udržitelnou výstavbu, kdy tato technologie může být konkurence schopnou alternativou výstavby ať už z jejího ekologického nebo ekonomického hlediska [7].

Na obrázku č. 8 můžeme vidět mapu historického vývoje rozšiřování technologie dusané hlíny po světě, která putovala společně s migrujícími národy.



Obrázek 8: Mapa světa s historickým vývojem rozšiřování technologie dusané hlíny [autor]

4 TRVALE UDRŽITELNÁ VÝSTAVBA

Na úvod této kapitoly je třeba vysvětlit pár základních otázek, které jsou nezbytné pro správné pochopení trvale udržitelné výstavby.

První z otázek je ta nejzákladnější: Co to vlastně je udržitelnost? Podle zákona č. 17/1992 Sb., O životním prostředí, zní definice udržitelného rozvoje takto:

„Udržitelný rozvoj je takový rozvoj, který současným i budoucím generacím zachovává možnost uspokojovat jejich základní životní potřeby, a přitom nesnižuje rozmanitost přírody a zachovává přirozené funkce ekosystémů.“ [8]

Druhá důležitá otázka zní: Jde v této problematice o naši planetu nebo o lidstvo? Správnou odpovědí je lidstvo. Život na Zemi za svoji existenci už přečkal několik „hromadných vymírání“. Mezi možné příčiny těchto událostí jsou řazeny také klimatické změny. Během největšího vymírání na rozhraní období Perm-Trias vyhynulo až 97 % mořského života a zhruba 70 % suchozemského [9]. Obnova biodiverzity pak trvala téměř 10 milionů let [10].

Někteří biologové si myslí, že jsme součástí dalšího hromadného vymírání [11]. Míra zapojení lidstva do toho procesu je nejasná, ale nezpochybnitelná. Nadměrný lov a rybolov, těžba nerostných surovin nebo odlesňování půd kvůli zemědělství, ovlivňují místní i světové ekosystémy. Planeta Země přežije a biodiverzita bude po čase obnovena stejně, jako při předchozích hromadných vymíráních [12]. Avšak jestli u toho budou naši potomci, to už je jiná otázka.

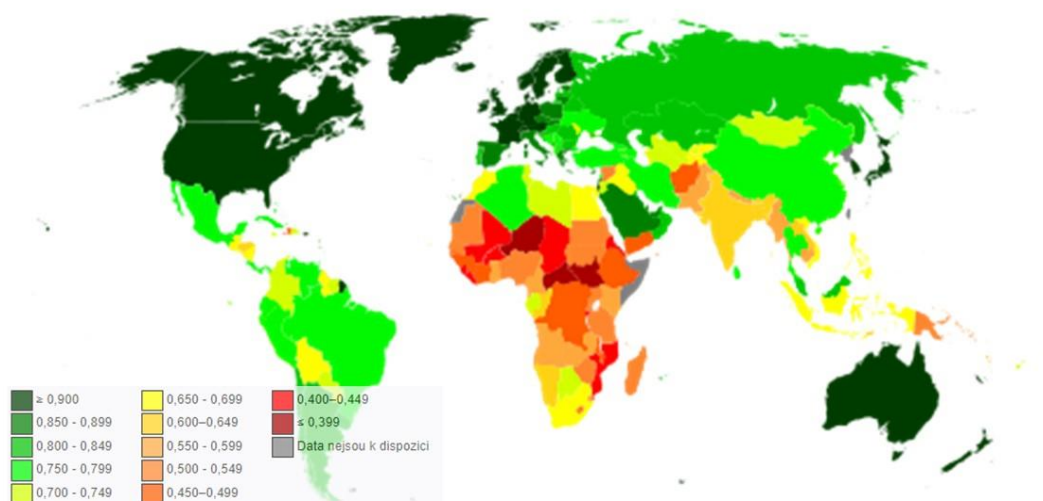
Třetí otázka zní: Můžeme udržitelnosti vůbec dosáhnout? Tenhle problém záleží na mnoha faktorech. Vyskytují se nám tu hned dva nejvýraznější problémy.

Tím prvním je nadměrný růst světové populace. Na Zemi máme k dispozici pouze omezený prostor a nepřiměřeně stoupající počet obyvatel klade čím dál vyšší nároky na životní prostředí.

Druhým výrazným problémem je lidský blahobyt. Deklarace lidských práv vydaná Organizací spojených národů říká, že „Všichni lidé se rodí svobodní a sobě rovní co do dů-

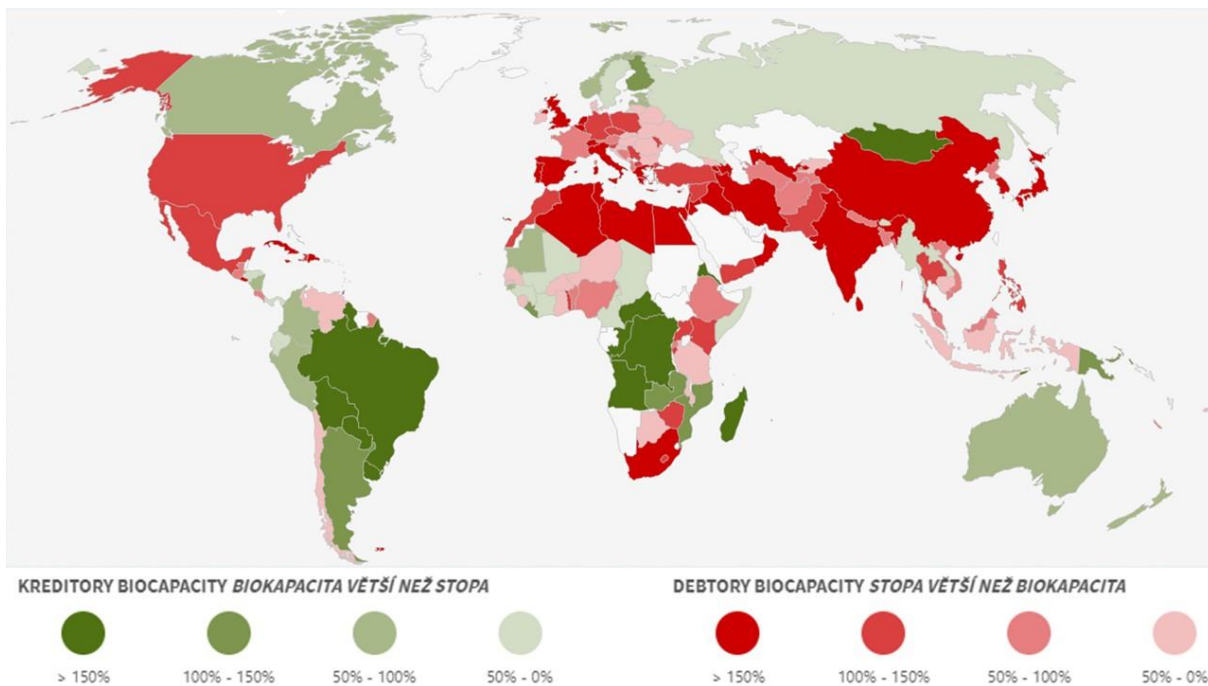
stojnosti a práv“. Z toho můžeme chápat, že všichni lidé by měli mít možnost žít ve stejně kvalitních podmínkách. Kvalita života se však v různých zemích značně liší. Dosažení vysoké kvality života by vyžadovalo mimo jiné i obrovské množství přírodních zdrojů [12].

Jednou z cest, jak kvantifikovat lidský blahobyť je tzv. Human Development Index (HDI), česky Index lidského rozvoje. Je to kombinace statistických dat o předpokládané délce života, délce školní docházky a výši příjmů (hrubý domácí produkt). Výsledná hodnota je poté kategorizována, jak můžeme vidět na obrázku č. 9. Čím vyššího indexu je dosaženo, tím vyšší je blahobyť v dané zemi [13].



Obrázek 9: Index lidského rozvoje (HDI) z roku 2018 [13]

V závislosti na výši lidského blahobytu ovšem pochopitelně roste i ekologická stopa, kterou daná země po sobě zanechává [14]. Celosvětovou mapu lidského blahobytu v závislosti na ekologické stopě můžeme vidět na obrázku č. 10.



Obrázek 10: Lidský blahobyt v závislosti na Ekologické stopě z roku 2018 [14]

Poslední, respektive čtvrtou otázkou trvale udržitelné výstavby, je v našem případě asi ta nejdůležitější. Týká se udržitelnost také budov? Rozhodně ano a v mnoha ohledech. Zefektivnění stavebnictví sníží již dříve zmíněnou ekologickou stopu a tím napomůže k udržitelnějšímu prostředí. Samotné stavebnictví má totiž velmi výrazné sociální a ekonomické dopady:

- 40 % veškeré vyprodukované energie na světě je podle IPCC (International Panel for Climate Change) spotřebováno v budovách [15];
- 40 % produkce odpadu je podle Eurostatu spojeno s budovami, respektive stavebnictvím [16];
- 1/3 emisí skleníkových plynů (anglicky Green House Gas, GHG) je podle IPCC spojována se stavebnictvím.

4.1 Udržitelnost budov

4.1.1 Tradiční přístup k výstavbě

V první řadě musíme změnit přístup k výstavbě abychom mohli dosáhnout udržitelnějšího navrhování budov. Výstavba a provoz budov byly podřízeny určitému sociálně-ekonomickému hodnocení. Výsledná budova byla běžně kompromisem mezi:

- pořizovacími náklady;
- kvalitou provedení;
- dobou výstavby.

Tento přístup má za cíl především krátkodobé sociálně-ekonomické zisky. Mnohem důležitější dlouhodobá hlediska jako užívání budovy během její životnosti nebo její interakce s okolním prostředím jsou brány v potaz pouze v omezené míře [12]. Tento přístup, který můžeme vidět na schématu č. 1, je v rozvinutých zemích postupně opouštěn.

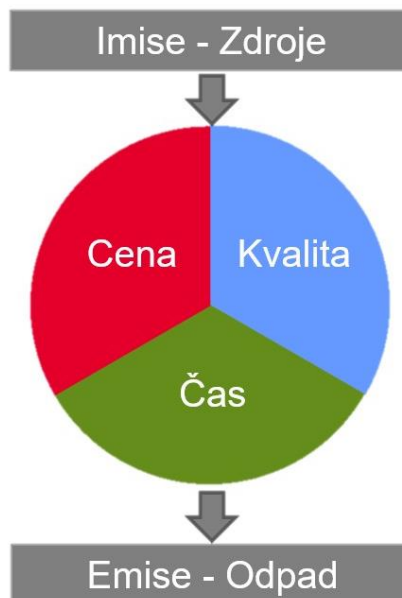


Schéma 1: Tradiční přístup k výstavbě [12]

4.1.2 „Udržitelný“ přístup k návrhu budov

Abychom dosáhli udržitelného přístupu navrhování budov, je potřeba najít rovnováhu mezi environmentálními a sociálně-ekonomickými dopady stavebnictví – návrh, výstavba, provoz a odstranění budov. Hovoříme o tzv. třech pilířích udržitelnosti (eko-

nomika, společnost a životní prostředí), jejichž provázání můžeme vidět na schématu č. 2.

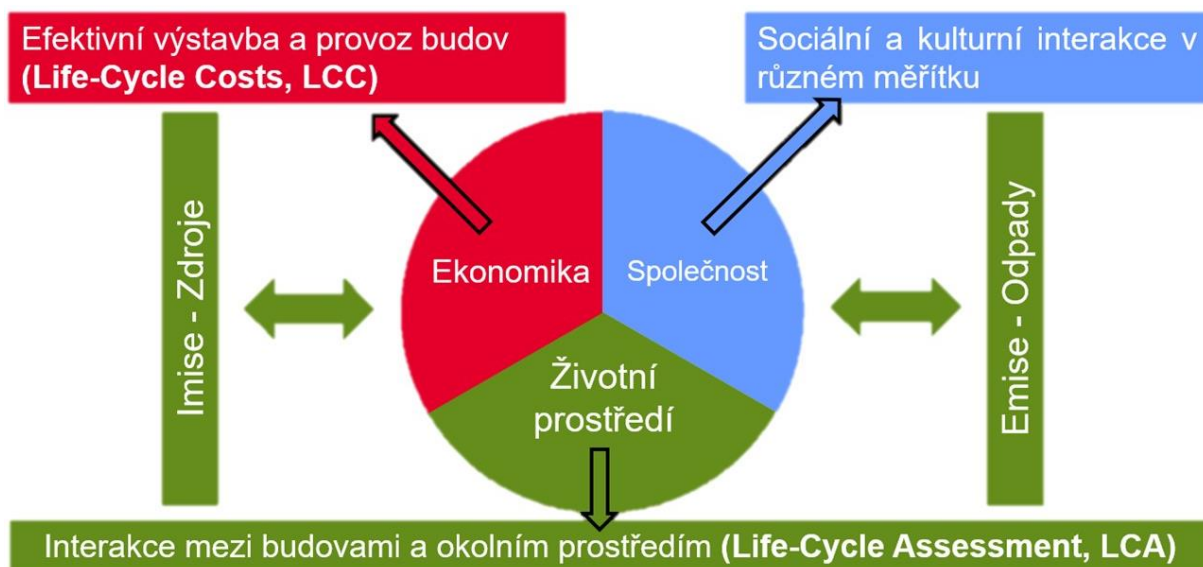


Schéma 2: Tři pilíře udržitelnosti [12]

Pokud chceme navrhovat udržitelné budovy, musíme vzít v úvahu kritéria, která ovlivňují výsledný dopad budovy na okolní prostředí. Těmi základními jsou:

- energie;
- použité materiály;
- spotřeba vody;
- nakládání s odpady;
- zábory půdy;
- lidské zdraví;
- náklady.

Kritéria v interakci se životním prostředím zahrnují například emise skleníkových plynů, eutrofizaci vod, acidifikaci půdy nebo vyčerpání přírodních zdrojů. Co se týče kritéria lidské zdraví, tak jde především o zdravé, bezpečné a komfortní vnitřní prostředí. Dle výzkumu „indoor generation“, který v roce 2018 prováděla společnost VELUX s analytickým ústavem YouGov ve 14 evropských a severoamerických státech včetně České republiky vyplívá, že dnešní generace tráví až 90 % veškerého času uvnitř budov. To rozhodně není zanedbatelné číslo a při návrhu budov by měla být kladena vysoká

pozornost právě komfortu vnitřního prostředí. V neposlední řadě zde máme uvedeno kritérium náklady, kde bychom měli brát v úvahu nejen náklady na samotnou výstavbu, ale především náklady na provoz budovy během její životnosti, které jsou často mnohem vyšší, než náklady na samotnou výstavbu. Bohužel v minulosti nebyla těmto nákladům věnována dostatečná pozornost a hlavními kritérii při rozhodování byly pořizovací cena a doba výstavby. Dalšími věcmi, které můžeme zahrnout mezi náklady a čím je můžeme snížit, je možná co největší snaha o využití dostupných místních zdrojů a snaha uplatnit levná tzv. „low-tech“ řešení [12, 17].

4.1.2.1 Energie

Spotřeba energie roste v závislosti na zvyšující se světové populaci a rychle rostoucímu rozvoji technologií. Většina energie je produkována z neobnovitelných zdrojů. Existují i jiné výrobní technologie, které jsou však v současné době pro jejich rozšíření limitovány ať už vysokými náklady, zdravotními a bezpečnostními riziky, nebo nízkou účinností.

Návrh udržitelných budov by měl počítat s vysokou účinností využití energie. To znamená:

- minimalizování spotřeby energie;
- vysoká účinnost přeměny energie;
- využití zdrojů energie šetrných k životnímu prostředí.

Mezi výraznými úsporami energie může být snaha o co největší snížení tepelných ztrát budov. Můžeme jen odhadovat, jak velkých úspor energie by se dosáhlo, kdyby všechny starší budovy byly renovovány v souladu s požadavky současných norem. Dalšími způsoby, jak efektivně snížit spotřebu energie mohou být například akumulace tepelné energie, kde se přebytečné teplo, které není možné momentálně spotřebovat, může vhodným způsobem ukládat (akumulovat) a využít později, nebo například zpětné získávání tepla pomocí tepelných výměníků.

Avšak nikdy nebudeme plně udržitelní jen díky úsporám. Většina zdrojů energie pracuje díky uhlí, zemnímu plynu, ropě nebo radioaktivním kovům. Na Zemi je jenom

omezené množství těchto materiálů a je jen otázkou času, kdy se vyčerpají. Proto by měla být snaha ve větší míře využívat obnovitelné zdroje energie, jako jsou slunce, vítr nebo voda [12].

4.1.2.2 Materiály

Ve většině případů, kdy se hovoří o trvale udržitelné výstavbě budov, zmiňuje se primárně jejich energetická náročnost, jak je energie získávána a jakých energetických úspor budova dosahuje. V budovách ale není zabudována pouze energie. Mezi důležité věci, které musíme brát v úvahu, patří bezesporu i samotný materiál, který je na stavbu trvale udržitelné budovy použit. Současné stavebnictví může životnímu prostředí škodit více než kdy dříve. Stačí se ohlédnout do doby před průmyslovou revolucí. Nízká technologická úroveň znamenala nízkou efektivitu výroby. V současné době moderní technologie zefektivnily výrobu a tím se mnohonásobně zvýšil objem produkce. Dále například dříve omezené možnosti činily dopravu na větší vzdálenosti velmi nákladnou, tím pádem byly na stavbách preferovány především místně dostupné materiály. V současnosti existuje volný trh s mnoha variantami dopravy, který minimalizuje ceny přepravy, což má za následek, že jsou preferovány hlavně cenově dostupné materiály. Díky těmto důsledkům se pak může stát, že doprava na velké vzdálenosti může mít horší dopady na životní prostředí než samotná výroba materiálů.

Každý materiál může být popsán různými způsoby. Jedním ze základních dělení je dělení podle dlouhodobé dostupnosti na:

- obnovitelné materiály;
- neobnovitelné materiály.

Hranice mezi obnovitelnými a neobnovitelnými materiály nemusí být příliš zřetelná. Často se uvádí, že obnovitelný materiál je ten, u kterého dojde k obnově v rámci lidských časových měřítek. My bychom se tedy v rámci udržitelnosti měli snažit o co největší využití právě obnovitelných materiálů.

Stavební materiály můžeme také popsat podle způsobu, jakým s nimi můžeme nakládat po skončení jejich životnosti. Dle tohoto dělení můžeme materiály rozdělit do tří kategorií:

- plnohodnotně recyklovatelné materiály;
- částečně recyklovatelné materiály;
- nerecyklovatelné materiály.

Pro lepší pochopení terminologie. Rozdíl mezi plnohodnotně recyklovatelným a částečně recyklovatelným materiálem je ten, že plnohodnotně recyklovatelným materiálem je možné po skončení jeho životnosti využít jako druhotnou surovinu. Jeho recyklace nebude mít negativní vliv na jeho vlastnosti, a tedy lze v případě potřeby využít recyklát pro výrobu původního materiálu. Zatímco částečně recyklovatelný materiál také lze využít jako druhotnou surovinu, ale v průběhu recyklace ztratí nebo se změní jeho původní vlastnosti a nelze ho využít k opětovné výrobě původního materiálu. Nerecyklovatelné materiály nelze po skončení životnosti použít jako druhotnou surovinu pro výrobu nových materiálů. Je možné je například energeticky využít nebo skládkovat.

Avšak, že je materiál obnovitelný a recyklovatelný ještě neznamená, že je udržitelný. Problém může představovat způsob jeho zpracování. Udržitelnost je nutno brát komplexně a měl by být hodnocen celý „životní cyklus“ materiálu, ve kterém hraje významnou roli také životnost. Otázkou tedy zůstává, které materiály používat abychom byli „udržitelní“? Univerzální odpověď pravděpodobně neexistuje. Měli bychom se snažit používat takové materiály, které budou kombinovat co nejvíce pozitivních vlastností, které jsou uvedeny výše [12].

4.1.2.3 Voda

S tématem trvalé udržitelnosti souvisí voda velmi úzce. Na naší planetě máme totiž pouze omezené zásoby pitné vody, a i přes to s ní plýtváme. Stále se zvyšující spotřeba vody souvisí s rostoucím rozvojem průmyslu a se zvyšující se životní úrovní obyvatel. Dalším problémem mohou být často zastaralé rozvody pitné vody především v rozvojových oblastech naší planety. V některých zemích jsou stále v provozu antické akvadukty

a podzemní kanály i přes to, že tyto staré systémy vykazují vysoké ztráty díky netěsnostem. Dále je problém s nakládáním s dešťovou vodou, která by se dala efektivně využívat. V zastavěných oblastech se dešťová voda téměř nevsakuje do zastavěných ploch a místo toho je bez užitku odváděna stokovou sítí mimo oblast.

Jak tedy nakládat, a především šetřit s vodou jak v interiéru, tak v exteriéru? V budovách je to možné především díky využití úsporných spotřebičů, které jsou v současné době běžně dostupné na trhu, jako například:

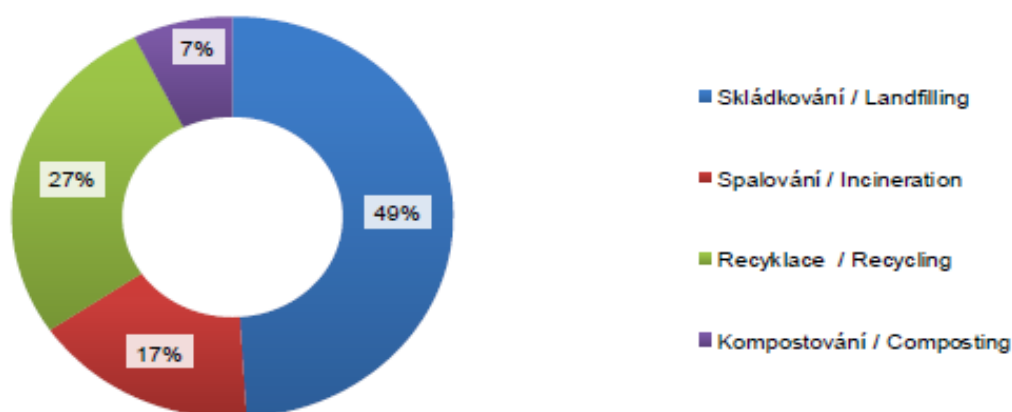
- úsporné myčky a pračky;
- vodovodní kohoutky s perlátory;
- záchody spořicí vodu dvojnásobným režimem splachování.

Úspory vody ve venkovním prostředí si vyžadují rozsáhlejší úpravy k tomu, abychom se mohli stát udržitelnějšími. Můžeme například:

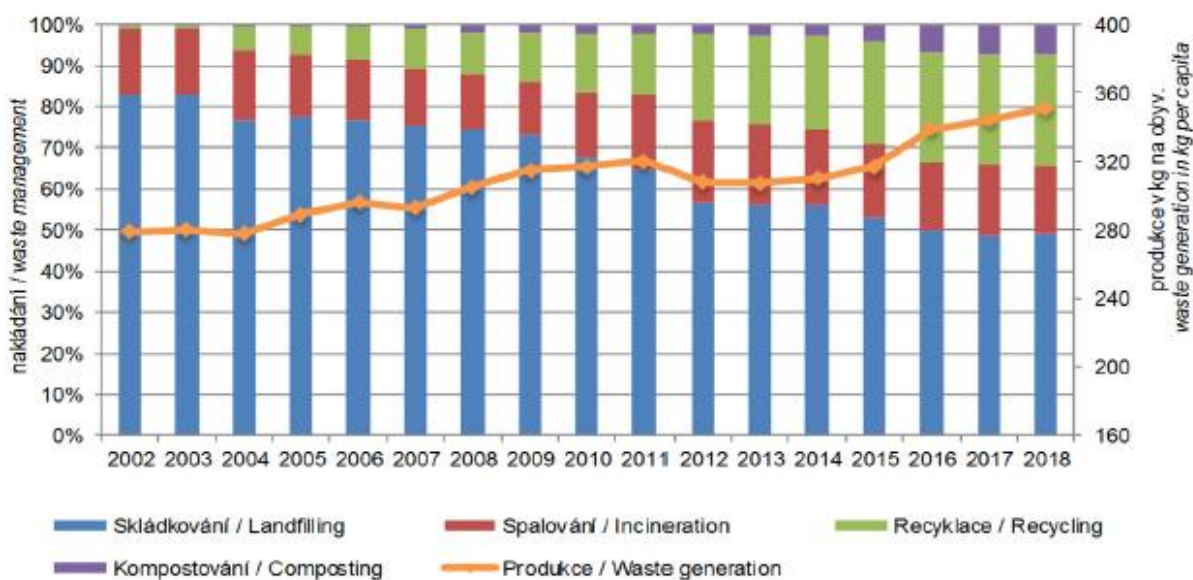
- jakékoliv terénní úpravy nebo budovy mohou být navrženy tak, aby neomezovaly schopnost ekosystému zadržovat vodu;
- pro závlahu rostlin, kterou nemůžeme omezit, můžeme využívat kapénkovou závlahu, která minimalizuje ztráty vody;
- dešťovou vodu můžeme jímat a dále využívat místo jejího odvodu bez využití [12].

4.1.2.4 Odpady

Dalším výrazným problémem je fakt, že produkujeme hodně odpadu. Například v roce 2018 vzniklo v České republice 28 353 238 tun odpadu. Při současném počtu obyvatel (10 668 641 obyv.) to znamená 2,658 tuny odpadu na obyvatele. Nejvýraznější položkou je právě stavební odpad (55,7 %), který se ovšem daří úspěšně recyklovat s využitím až 92 %. Naopak co se nedaří, tak nakládání s komunálním odpadem, jehož podíl je v celkové produkci odpadu 13,2 % a z toho téměř polovina (49 %) je likvidována skládkováním viz graf č. 1 [18, 19]. Vývoj produkce a nakládání s komunálním odpadem můžeme vidět v následujícím grafu č. 2.



Graf 1: Nakládání s komunálním odpadem v roce 2018 [18]



Graf 2: Vývoj produkce a nakládání s komunálním odpadem v letech 2002 - 2018 [18]

4.2 Udržitelné navrhování

Udržitelné nebo ekologické navrhování budov je komplexní obor, jehož rozsah i samotná definice nejsou přesně stanoveny. Při návrhu budov bychom měli brát v potaz:

- výběr pozemku: osazení a orientace budovy, terénní a zahradní úpravy;
- tvar budovy: provozní a dispoziční řešení;
- zdravé a komfortní vnitřní prostředí: denní osvětlení, kvalita vzduchu, eliminace škodlivin, tepelný komfort atd.;

- konstrukční řešení a použité materiály: vzduchotěsnost obálky, tepelné ztráty, obnovitelné materiály, trvanlivost, aplikace zelených střech a fasád atd.;
- využití obnovitelných zdrojů energie, zejména slunce a větru.
- Nakládání s vodou: například nahrazování pitné vody dešťovou při zalévání zahrady, nebo při splachování toalety.

Pokud při návrhu budovy zohledníme všechny výše uvedené body a podaří se nám plně využít potenciál místa stavby, můžeme dosáhnout výrazných ekonomických i environmentálních úspor, kterými jsou přirozené solární zisky, ventilace, chlazení, osvětlení atd. Všechny tyto úspory nám snižují konečnou energetickou náročnost budovy. Budova je tak méně závislá na dálkových dodávkách energie a využití místních materiálů snižuje environmentální dopady spojené s dopravou. Avšak jako každá věc i tahle má své negativní stránky. Mezi výrazná negativa můžeme zmínit například kolísavost množství energie z obnovitelných zdrojů. Dále, že některá potřebná opatření se mohou projevit až po delší době užívání, nebo fakt, že návrh takové budovy je komplikovanější, a tedy i dražší, protože je nutné zohlednit různé vnější vlivy [12].

5 MOŽNOSTI VYUŽITÍ TECHNOLOGIE DUSANÉ HLÍNY VE STAVEBNICTVÍ

Se stále se zvyšujícím mediálním zájmem týkajícím se probíhajících klimatických změn a diskuzí nebo politických debat o ekologické udržitelnosti, zažívá hlína jako stavební materiál opětovný boom a nachází si stále větší oblibu mezi veřejností. V současné době má hlína nejčastější využití ve formě hliněných omítek, ať už v běžných rodinných domech, tak i v betonových panelových domech. Ve světě je už pár desítek let běžné i použití hlíny jako hlavního nosného prvku konstrukce, ať už ve formě hliněných cihel, či ve formě stále více populárních dusaných stěn. Avšak v České republice je tohle zatím dosti problematické, především kvůli chybějící normové základně pro navrhování takových staveb. Ale i přes tuhle problematiku u nás už několik dusaných staveb stojí. Některé příklady těchto staveb jsou uvedeny níže v kapitolách 5.2 a 5.3 [1, 20, 21].

5.1 Popis technologie dusané hlíny

5.1.1 Hliněný materiál

Výraz hlína je z pohledu inženýrské geologie obvykle zemina, kterou podle zrnitosti dělíme na štěrk (2 – 60 mm), písek (0,06 – 2 mm), prach (0,002 – 0,06 mm) a jíl (zrna do 0,002 mm). Právě jíl je ze stavebního hlediska nejdůležitější složkou, protože obsahuje jílové minerály, které tvoří pojivou část hlíny a díky své krystalické mřížce jsou vždy menší jak 0,002 mm. Jílové minerály jsou v jílu zastoupeny různým podílem a podle jejich množství a druhu rozlišujeme různé druhy jílu s odlišnými vlastnostmi, jako například vaznost, nebo schopnost přijímat a opět vydávat vlhkost. Nejznámějšími jílovými minerály jsou ilit, montmorillonit a kaolinit. Mají tvar destiček s elektrostatickým nábojem, který je rozdílný na jejich ploškách a hranách, a právě tyto elektrostatické přitažlivé síly jsou podstatou vazné schopnosti jílových minerálů [1].

Vlastností hlíny je, že přidávkem vody, obsažené jemné částice, zvětšují svůj objem a zároveň i mění svoji konzistenci. Ta se může měnit postupně z tvrdé, kdy je zemina

zcela vysušená, přes pevnou, tuhou a měkkou až do tekuté. S přibývajícím množstvím vody soudržnost a pevnost jemnozrnných částic klesá a jejich objem narůstá. Při vysušování je to přesně naopak. Pevnost dusané hliněné stěny je tedy přímo závislá nejenom na množství a druhu jílových minerálů, ale také na obsahu vlhkosti. V této souvislosti je potřebné zmínit dvě největší pozitivní vlastnosti hliněného materiálu. Tou první je, že hlína dokáže poměrně rychle přijímat vodní páru ve formě vzdušné vlhkosti a opět ji do ovzduší dodávat. Druhou významnou vlastností hlíny je její vysoká tepelná akumulace, ale přitom její tepelný odpor se příliš neliší od pálené cihly [1].

Právě spolupráce hliněného materiálu s vlhkostí a vodou je u hliněných staveb zásadní, avšak její hodnocení závisí na úhlu pohledu. Jako vysoce pozitivní je hodnocena z hlediska zdravotního, protože hlína v interiéru, ať už ve formě masivních dusaných stěn, nebo pouze hliněných omítek, dokáže vytvářet stálé tepelně-vlhkostní mikroklima, které je příznivé pro pobyt člověka v takovém prostředí. Je ale dobré zmínit, že takové kvalitní a stabilní prostředí je podmíněno dostatečnou dodávkou vodní páry do ovzduší. Hlína totiž sama o sobě vlhkost nevytváří, ale pouze s ní pracuje. Avšak protože má každá mince dvě strany, tak je spolupůsobení hlíny s vodou hodnoceno také vysoce negativně především odpůrci hliněných staveb. Tím největším negativem je fakt, že kontakt hliněného materiálu s vodou, může ve větším množství způsobit pokles až úplnou ztrátu pevnosti, například při záplavách [1, 22].

Pro omezení přijímání vody se může do hliněných stěn přidávat cement. Přidání cementu do hliněné směsi je dokonce v některých zemích nařízeno platnou legislativou a normami. Přidáním cementu do hlíny postupně klesá vazná schopnost jílových minerálů vlivem tzv. hydratace cementu. Při narůstajícím množství cementu nad 5 %, začíná postupně hydratace převyšovat soudržnost jílových minerálů, které nemohou přijímat větší množství vody, a tím se toto zpevnění hliněného materiálu stává stabilnějším. V takovém případě se podle množství přidaného cementu, vlastnosti hliněné směsi více, či méně přibližují vlastnostem betonu [1, 20, 21].

Tím že jsem příznivcem hliněných staveb, tak bych rád na závěr této kapitoly zmínil ještě pár pozitivních vlastností tohoto materiálu. Hlína dokáže tlumit elektromagnetická

vlnění vytvářená člověkem. Dokáže zachycovat a pohlcovat škodliviny z ovzduší. Je to hypoalergenní materiál, a právě proto pobyt v takovém prostředí působí příznivě na astmatiky, a i na psychiku člověka. Z ekologických hledisek je třeba zmínit především energetickou úsporu při výrobě a mnohem lepší recyklaci po skončení životního cyklu takového objektu, oproti recyklaci objektů z dnes tradičních materiálů, jako jsou keramická cihla a beton [1].

5.1.2 Suroviny pro dusanou hlínu

Největší výhodou hliněného materiálu je, že se nachází prakticky na celém území naší planety a je ho všude dostatek. Podle zrnitosti a nerostného složení se hlína ve své skladbě liší místo od místa, a proto je způsob její úpravy závislý na složení hlíny. Z tohoto důvodu pro hliněné materiály neexistují, a ani nemohou existovat, jednotné receptury, které známe například z betonových směsí. Avšak z minulosti jsme převzali řadu praktických polních zkoušek, podle nichž lze přímo na místě plánované stavby nebo těžby hlíny zjistit, zda a do jaké míry je hlína vhodná pro stavební účely a následně na základě těchto zkoušek lze i určit, jak natěženou hlínu vhodně upravit. Tyhle zkoušky jsou ovšem dostačující pouze u staveb menšího rozsahu, jako jsou například jednotlivé dusané stěny. V případě rozsáhlejší výstavby je vhodné polní zkoušky doplnit i zkouškami laboratorními, které nám zaručeně upřesní vlastnosti konkrétní těžené hlíny.

5.1.3 Složení hliněné směsi pro dusání

Co se týče ideálního poměru složení hliněné směsi pro účely dusání, tak by hliněná směs měla obsahovat přibližně 50 – 70 % jemného štěrku a písku, 15 – 30 % prachu, 5 – 20 % jílu a minimálně 5 % cementu. Složka cementu není vždy nezbytně nutnou podmínkou, ale jeho přidáním docílíme vyšší výsledné pevnosti finální hliněné směsi. Ideální a nesprávný zrnitostní poměr hliněné směsi můžeme vidět na názorném obrázku č. 11.



Obrázek 11: Vhodné složení hliněné směsi pro dusání podle zrnitosti; a – vhodný poměr hrubých a jemných částic (směs vhodná pro dusání); b – příliš mnoho jemných částic (nehodné pro dusání); c – příliš mnoho hrubých částic (nehodné pro dusání) [24]

Velmi důležitou roli hraje také obsah vody ve směsi. Příliš mnoho vody totiž způsobí, že proces dusání nebude dostatečný, protože při určitém stlačení pevných částic dojde k tomu, že voda, která je nestlačitelná, vystoupá na povrch a zabrání tak dalšímu hutnění. V takovém případě by se v procesu vysychání začali na povrchu konstrukce tvořit smršťovací trhliny. Naopak příliš suchá směs se zase nespojí, protože jílové minerály nebudou mít dostatek vody, aby se mohly aktivovat. Ideální je mít směs mírně zavlhlou, tzn. že na první pohled působí jako suchá. Autor [20] uvádí, že optimální množství obsažené vody ve směsi je ve výši 11 %. Obsah vody se ale může lišit v závislosti na konkrétním složení směsi a vždy se doporučuje finální směs nejprve otestovat na vhodném testovacím vzorku a až podle výsledků zkoušet směs buď upravit, nebo přejít k samotné výstavbě.

5.1.4 Využití dalších materiálů pro dusanou stěnu

Při dusání nosných stěn je nutné počítat s tím, že při zatížení hotové stěny vzniknou ve stěně příčné tahy, kterým neumí hlína dostatečně odolávat a mohou zde vzniknout svislé podélné i příčné trhliny. Tomu lze zabránit několika způsoby. Tím prvním a nejzákladnějším je, že můžeme stěnu předdimenzovat a udělat podstatně širší, než je ve skutečnosti potřeba. To je ovšem dost neefektivní, jak už z pohledu zvýšené spotřeby materiálu, tak i z pohledu větších nároků na prostor, který by se dal využít smysluplněji. Mnohem vhodnější způsob, jak zachytit příčné tahy je použití výztuže. V minulosti se za tímto účelem do dusaných stěn vkládaly vrbové pruty nebo části větví ve více výškových

úrovních, nebo se do směsi přimíchávala slaměná řezanka, která plnila funkci rozptýlené výztuže. V dnešní době se k těmto účelům řezanka už nepoužívá, ale lze používat odpadní vlákna ze lnu či konopí a místo prutů se mohou do stěn ukládat tzv. geomříže, které se využívají například na zpevňování svahů a spolehlivě poslouží i v případě právě zachycení příčných tahů v konstrukci. Kvůli lepšímu ukotvení geomříží se do bednění ukládá hrubší štěrk anebo i menší kameny.

Další možností využití materiálů je použití barevných hlín nebo jílu a barevných hliněných směsí nebo pigmentů přírodního původu, které se mohou přimíchávat do jednotlivých hutnicích vrstev a tím vytvořit probarvenou stěnu jako například na obrázku č. 12.



Obrázek 12: Příklad probarvené hliněné dusané stěny [32]

V případě, že se uvažuje s ostrými hranami stěn, je možné je vyztužit vsypáním cementové směsi do bednění v namáhaných místech, ale je třeba si uvědomit, že pokud se bude jednat o pohledovou stěnu, bude na povrchu v místě použití přesně prokresleno použití cementu. Z tohoto důvodu je vhodnější udělat rohy stěn zkosené nebo zaoblené.

5.1.5 Příprava směsi

Mírně zavlhlá hliněná směs se zpracovává poměrně obtížně, přesto je nutná její dobrá homogenizace. Jemnozrnná hlína se předem zbaví větších kusů a hrudek a dobře se promíchá s pískem, štěrkem a v případě použití i s cementem. Teprve až v následujícím procesu hutnění dojde k požadovanému spojení jednotlivých zrn směsi s jílovými minerály a cementem. Pevnost stěny narůstá během procesu hydratace cementu a vysychání stěny, jejíž doba závisí především na tloušťce stěny a obsahu vody a zpravidla trvá několik týdnů, podobně jako u betonu.

5.1.6 Bednění

Historicky se k bednění dusaných stěn používalo bednění z dřevěných fošen a opěrných sloupků, které bylo prakticky totožné s tradičním dřevěným bedněním, které známe například z bednění betonových základových pasů. Bednění bylo demontovatelné a dalo se opakovaně používat. Vysoké bylo cca 1 m. U jednoho typu bednění se k zachycování příčných sil při hutnění bednění spojovalo příčnými tyčemi, které se zadusaly do stěny a vytahovaly se až při přesouvání bednění. Vzniklé díry se následně do datečně zaplňovaly nebo se v některých případech ponechaly nezaplněné pro funkci přirozené ventilace vnitřních prostorů například u hospodářských budov. V druhé variantě bednění tzv. sloupovém byly příčné fošny opřené o svislé dřevěné sloupy zaraženy do země, které se nahoře svazovaly provazem. Výhodou tohoto bednění bylo, že po něm nevnikaly díry ve stěně. Nevýhodou bylo, že sloupy musely být většího průměru. Z těchto důvodů se často na opěrné sloupy používaly trámy, které se po dokončení stěn použily jako krokve krovu. Po udusání příslušné části stěny se bednění rozebralo a přesunulo buď vertikálně nebo horizontálně na vydusání další části stěny. Tento proces se opakoval, dokud nebyla celá stěna hotová.

V dnešní době se pro dusané stěny používají moderní systémová bednění, která známe z betonových konstrukcí. Jejich velká variabilita nám umožňuje vytvořit jakékoliv tvary. Důležité je, aby vnitřní stěny bednění byly hladké a tím vznikl rovný pohledový povrch konstrukce. Tento typ bednění využijeme především u tlustších nosných stěn, protože jednotlivé moduly se skládají většinou na celou výšku stěny. Stěna musí být natolik

široká, aby zajistila dostatečný prostor pro pohyb pracovníka uvnitř bednění při procesu hutnění. U tenčích stěn je vhodnější použít dřevěné bednění, které lze provést v rozměrech podle potřeby. Uvnitř se dřevěné bednění pokryje hladkým materiálem (plech, OSB desky apod.) aby byl zajištěn hladký povrch konstrukce. Spojení se provádí pomocí stahovacích šroubů, ke kterým se v těsné blízkosti ukládají rozpěry, které se při dusání postupně odstraňují. Otvory, které zůstanou po odstranění šroubů, jsou malé a dodatečně se zaplní hliněnou směsí. Pokud máme v plánu vytvářet zkosené hrany rohů stěn, vložíme do rohu bednění upravenou např. trojúhelníkovou lať, která nám zkosení zajistí.

5.1.7 Dusadla

Dříve se používaly k dusání ruční pěchy, ať už dřevěné, nebo kovové. Pěchy vážily přibližně kolem 10 kg a práce s nimi byla tedy fyzicky náročná. V současnosti se k dusání používají především pěchy mechanické. Důležitá je plocha, se kterou přichází dusadlo do styku s hliněnou směsí. Ta by neměla být příliš velká, protože tlaková síla rozložená na větší plochu působí menším účinkem po ploše i do hloubky a tím snižuje účinnost hutnění. Z toho vyplývá, že čím menší je styčná plocha, tím kvalitnějšího dusání dosáhneme a naopak. Obvyklá velikost hutnicích hlavic se pohybuje kolem 100 cm².

Nejlepší tvar hlavic pro tyto účely je čtvercový, protože dokáže kvalitně zhutnit hliněnou směs podél bednění i v rozích. Také se někdy vyskytují dusadla s kruhovou hlavicí, ale ty jsou pro tento typ práce méně vhodná.

5.1.8 Proces dusání

Hliněné domy se v minulosti ukládaly obvykle na kamenné základy. V současné době se hliněná stavba zakládá na betonové základy, které jsou opatřeny izolací proti zemní vlhkosti. Na rozdíl od ostatních staveb se na izolaci neukládá přímo hliněné staviwo, ale nejprve dvě až tři vrstvy pálených cihel a až následně hliněný materiál, ať už se jedná o jakoukoliv hliněnou technologii.

Hliněná směs se do bednění sype z výšky menší jak 120 mm a ukládá se po vrstvách tloušťky 100 – 150 mm, podle používaného typu hutnicího prostředku. Hutnicím procesem se tloušťka vrstvy zmenší o třetinu až polovinu svojí původní výšky.

Dusání vrstvy se provádí nejprve ve směru podél bednění kolem okrajů stěny a postupuje se směrem ke středu. Poté se vrstva dusá příčným směrem a následně znovu podélně. Na dostatečném zhutnění stěny závisí její vzhled i výsledná pevnost. Nejdůležitější je dusání kolem stěn bednění, které nám zabezpečí pevnější povrch, odolnější proti povětrnostním vlivům. Vodorovnost jednotlivých vrstev se může kontrolovat vodorovnou. Před vsypáním další vrstvy by se měl povrch zhutněné vrstvy zdrsnit například vytvořením rýh ve vrstvě, abychom docílili lepšího provázání jednotlivých vrstev. Při odbednění stěny můžeme poté na povrchu vidět postup práce i kvalitu dusání jednotlivých vrstev. Při nedostatečném zhutnění bývají jednotlivé vrstvy kompaktní pouze u horního povrchu vrstvy a směrem dolů nabývá kyprosti, je méně zhutněná a může docházet i k vysypávání ze zdi. Proto se doporučuje si hutnicí proces nejprve vyzkoušet na vhodném zkušebním vzorku. Při pracovních přestávkách se nesmí přerušovat proces dusání jedné vrstvy. Nасыpaná vrstva se musí vždy nejprve dohutnit.

Vysychání dusané stěny probíhá pomalu, protože obsahuje vodu v celém svém průřezu, narozdíl od stěny z keramických cihle, kde je voda obsažena pouze ve spojovací maltě. Pevnost dusané stěny tedy stoupá postupně s jejím vysycháním. U vyšších nosných stěn se doporučuje jejich hutnění provádět po částech, protože hliněná směs je sama o sobě těžká a v nevyschlém stavu by nemusela vydržet nápor horních vrstev. Výška stěny dusané v jedné pracovní etapě by neměla přesahovat 1,0 – 1,5 m.

5.1.9 Otvory, instalace

Původně se otvory v dusaných konstrukcích vytvářely až dodatečně vyříznutím. Později se místa pro budoucí otvory vykládala cihlami, které se zadusaly do stěny a následně odstranily. V současnosti se otvory do stěny vybední a zhutní okolo. Otvory se bední vždy o něco vyšší, protože je potřeba počítat se sednutím stěny při vysychání a při jejím zatížení. Nad otvory se do stěny ukládají překlady, které musí být dostatečně tuhé, aby při dusání horních vrstev nedocházelo k vibracím a oddělování od hliněné směsi.

Je třeba si uvědomit, že do hotové pohledové stěny nelze dodatečně vysekávat drážky pro instalace. Proto je potřeba mít všechno dopředu dobře naplánováno a veškeré potrubí, krabice a instalace zadusat přímo do stěny. Dusaná konstrukce má dlouhou životnost, která je většinou delší než většina instalací. Proto je dobré počítat i s tímto faktem a udělat uložení instalací tak, aby byla později možná jejich výměna (například vést instalaci v trubkách). Další možností je vést instalace podlahou.

5.1.10 Odbedňování

Po odbednění stěny se ihned opraví případné nerovnosti povrchu a zaplní se vzniklé otvory po stahovacích šroubech. Při přesunu bednění do další částí hutnění je třeba pracovat opatrně, aby nedošlo k poškození již hotové část stěny.

5.1.11 Ochrana dusané stěny před povětrnostními vlivy

Ve vnitřním prostředí dusané stěny nepotřebují žádné zvláštní opatření, protože nejsou povětrnostními vlivy příliš namáhány. Naopak z vnější strany je důležité chránit dusané stěny proti povětrnostním vlivům, abychom zabránili degradaci stěny. Základem dobré ochrany je dobře namíchaná a důkladně zhutněná směs, která tuto odolnost zvyšuje. Nejúčinnějším opatřením je vytvoření takového přesahu střechy, který zabrání tomu, aby byla stěna přímo vystavena účinkům deště a docházelo tak ke škodám vlivem eroze dešťové vody.

5.1.12 Trendy vývoje dusaných stěn

V naší zemi jsou dusané stavby zatím ojedinělé, ale zájem o tyto stavby stále roste a lze očekávat jejich vzestup. Vlivem poměrně značné pracnosti při ručním provádění takového typu stavby, spěje vývoj hliněných staveb včetně dusaných konstrukcí k prefabrikaci. V současné době jsou v okolních zemích prefabrikáty vyráběny dvojitým způsobem. Prvním je, že se dřevěné rámy vyplní hliněnou směsí a následně se převezou na místo stavby, kde se spojí v jeden celek. Druhým způsobem je, že se celá konstrukce stavby vydusá v hale, kde se následně rozřeže na jednotlivé díly, které se převezou na staveniště a slepí se hliněnou hmotou. Výroba takových prefabrikátů má výhodu v tom, že je na jejich výrobu použit stálý zdroj hlíny, který zaručuje dobře prověřené vlastnosti.

Druhou výhodou je, že montáž na stavbě pak zabere relativně krátkou dobu v porovnání s ručním prováděním stavby. Nevýhodou prefabrikace je ten, že nám vznikají nové náklady spojené s dopravou materiálu na staveniště, a že samotná doprava vytváří další ekologickou zátěž na životní prostředí.

Bohužel se v posledních letech výzkum věnovaný hliněným konstrukcím provádí spíše jen v rámci studentských a doktorských prací. Mimo tyto práce není zatím vůle zahájit seriózní základní výzkum hliněného staviva, který by byl základním podkladem pro návrh norem, které jsou nezbytné pro projektanty pro návrh nosných hliněných konstrukcí. Přitom řada zemí (např. Rakousko, Anglie nebo Nový Zéland) těmito normami disponuje. I přes tuto skutečnost byly právě studentskými pracemi provedeny řady laboratorních zkoušek, které prokazují vhodnost hliněného materiálu pro stavby, ve kterých člověk tráví převážnou část svého života [1, 5, 20, 21, 22, 23].

5.2 Příklady staveb v České republice

5.2.1 Restaurace Hliněnka v Benicích u Prahy

Jedná se o dvoupodlažní restauraci, která je součástí Park Holiday Congress & Wellness Hotelu. Byla vybudována v roce 2006 právě pomocí technologie dusané hlíny a jejím autorem je doc. Ing. arch. Petr Suske. Materiálem pro stavbu restaurace byla hlína z výkopů pro základy wellness objektu. Stropní konstrukce v restauraci jsou dřevěné [24].



Obrázek 13: Dvoupatrový objekt restaurace Hliněnka se stěnami z dusané hlíny [24]



Obrázek 14: Interiér restaurace Hliněnka [24]

5.2.2 Rodinný dům v Čelákovících

Rodinný dům je proveden kombinací z hlíny a dřeva. Dům je nízkoenergetický se zelenou střechou. Vnější povrch hliněných stěn je opatřen dřevěným obkladem. Vnitřní povrchy tvoří z části hliněné omítky, z části jsou ponechány stěny z pohledové dusané hlíny a v koupelně a na WC je vytvořena omítka z tzv. tadelaktu (marocký štuk), jehož vlastností je, že je voděodolný [24].



Obrázek 15: Pohled na nosnou dřevěnou stěnu vyplněnou dusanou hlínou před instalací dřevěného obkladu [24]



Obrázek 16: Pohledová stěna z dusané hlíny v interiéru rodinného domu [24]



Obrázek 17: Koupelna rodinného domu v Čelákovících, kde byl na povrchovou úpravu použit voděodolný marocký štuk [24]

5.3 Příklady staveb ze světa

5.3.1 Sušárna bylin firmy Ricola AG, Laufen

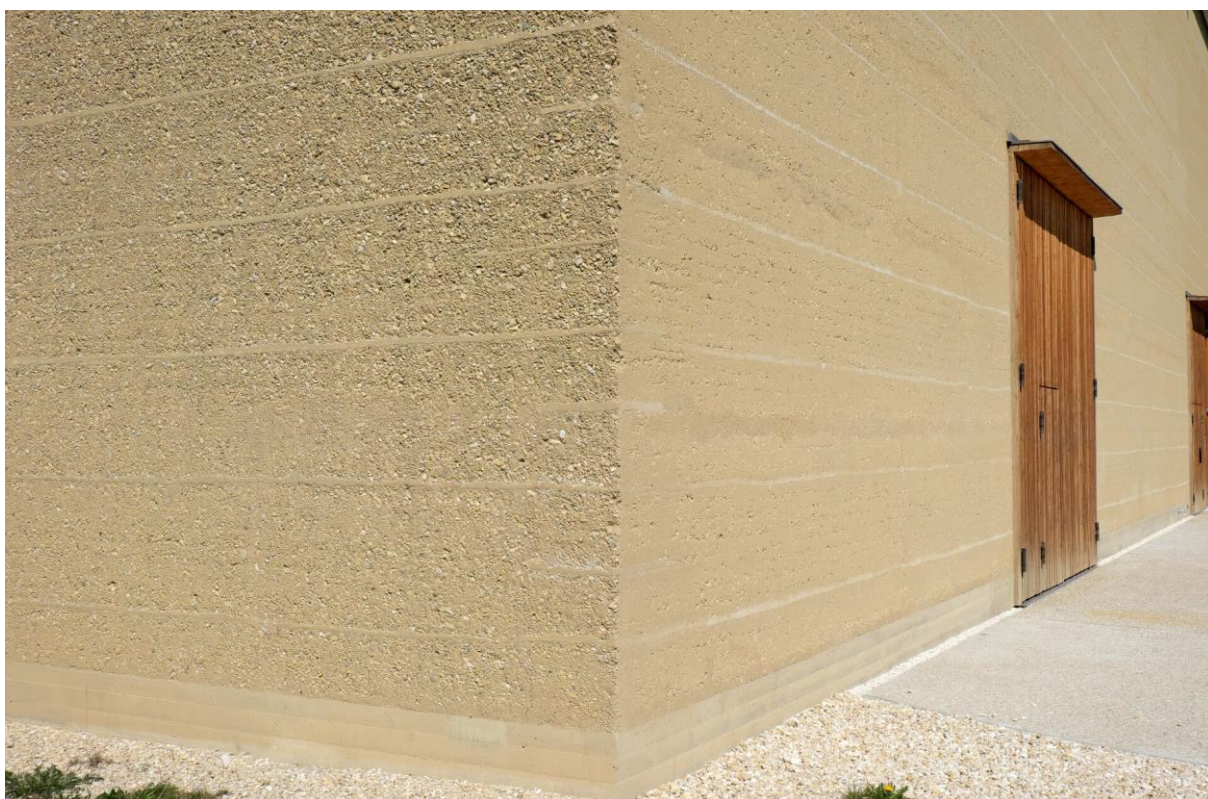
Hala sušárny byla vytvořena v roce 2013. Jejím autorem i zhotovitelem je v oblasti hliněných staveb uznávaný rakouský architekt Martin Rauch. Stavbu haly provedl pomocí prefabrikovaných panelů z dusané hlíny, která byla vytěžena z místního údolí Laufen. Její rozměry jsou 50×30 m a vysoká je 10 m. Jedná se zatím o největší a nejrozsáhlejší moderní stavbu z dusané hlíny [24].



Obrázek 18: Výrobní hala prefabrikátů Martina Raucha pro stavbu haly Ricola ve Švýcarském Laufenu [33]



Obrázek 19: Sušárna bylin firmy Ricola [33]



Obrázek 20: Detailní pohled na halu z prefabrikovaných dílců z dusané hlíny [33]

5.3.2 Rammed Earth House Rauch

Rodinný dům z dusané hlíny, který se nachází v rakouském městě Schlins. Dům vznikl spoluprací architektů Rogera Boltshausera, Thomase Kamma a Martina Raucha v letech 2006 - 2009. Jedná se o moderní budovu usazenou do svažitého terénu, jejíž veškeré svislé konstrukce jsou z dusané hlíny. Zajímavostí této stavby je, že v obvodových stěnách v určitých rozestupech byly jednotlivé hutnicí vrstvy prokládány placatými lomovými kameny, jak můžeme vidět na obrázku č. 21. Funkce těchto kamenů je taková, že vytváří bariéru pro šíření vodní eroze a tím přispívá k mnohem větší odolnosti celé dusané stěny proti povětrnostním vlivům. Z počátku se vlivem dešťových srážek z povrchu stěny vymyje jemný materiál a částečně se obnaží hrubé kamenivo, které se následně se zbývajícím výplňovým materiálem zatáhne a vytvoří tak téměř nepropustný vnější povrch stěny [25].



Obrázek 21: Vnější boční pohled na dusaný rodinný dům Rauch [25]



Obrázek 22: Pohled na schodiště uvnitř objektu [25]



Obrázek 23: Ukázka interiéru rodinného domu z dusané hlíny [25]

6 Způsoby testování fyzikálně-mechanických vlastností dusané hlíny

V současné době pro Českou republiku neexistují žádné normy, směrnice nebo návody, jak testovat fyzikálně-mechanické vlastnosti dusané hlíny. Existují však země, které některými z těchto dokumentů disponují. V této kapitole tedy budou uvedeny některé jejich příklady i se způsoby, jak lze fyzikálně-mechanické vlastnosti dusané hlíny testovat.

6.1 Velká Británie

Velká Británie doposud také nedisponuje legislativně platnou normou nebo Eurokódem, zabývajícími se dusanou hlínou. Mají však dobře zpracovanou směrnici s názvem *Dusaná hlína: Pokyny pro návrh a konstrukci*. Směrnice publikovaná v roce 2004 pokrývá většinu aspektů návrhu, testování a praktických příkladů potřebných k tomu, aby bylo možné získat dostatečné znalosti pro návrh a konstrukci budov z dusané hlíny. Směrnice se skládá ze tří technických sekcí:

- dodatek A – vlastnosti dusané hlíny;
- dodatek B – specifikace pro práce s dusanou hlínou;
- dodatek C – konstrukce stěn.

Testovací metody fyzikálně-mechanických vlastností jsou popsány v dodatku A – vlastnosti dusané hlíny, který si podrobněji popíšeme v následujících kapitolách.

6.1.1 Úvod

Úroveň a rozsah zkoušek materiálů z dusané hlíny závisí na konkrétní aplikaci a stáří použitého materiálu. Pokud se má použít materiál s prokázanými vlastnostmi, zvyšuje se důvěra v něj a zároveň se snižuje nejistota a související rizika. U dusané hlíny se zkoušky provádějí většinou na válcích speciálně připravených pro tento účel. V testech je obvyklé provádět klasifikaci zeminy, testovat obsah vlhkosti, pevnost v tlaku a posouzení smršťování sušením. Podle potřeby lze také provést zkoušky odolnosti proti

vodní erozi a oděru nebo pevnosti v tahu za ohybu a ve smyku. Zkušební podmínky pro vzorky by měly co nejvíce simulovat okolní nebo nejhorší možné případy v provozních podmínkách. Prefabrikace dusané hlíny, buď ve formě panelů nebo bloků, umožňuje otestovat jejich kvalitu ještě před samotnou instalací.

6.1.2 Zkušební metody

6.1.2.1 Zkušební tělesa

Zkušební postupy uvedené v následujících kapitolách se obecně provádějí na malých zkušebních tělesech, nejčastěji válcích nebo hranolech. Při přípravě těchto malých vzorků je třeba z použitého materiálu odstranit částice větší jak 19 mm, nejlépe prose- tím. Velké částice by totiž při použití v malých tělesech měly nepříznivý vliv na konečný výsledek. Pokud ale používáme materiál, kterým má významný podíl (20 – 30 %) částic větších jak 19 mm, doporučuje se testy provádět na zkušebních tělesech větších rozmě- rů, například krychle 300×300 mm nebo válec o průměru 300 mm. Dále by se však mělo postupovat podle níže uvedených postupů.

6.1.2.2 Zhutnitelnost

Zhutnitelnost suchého materiálu je primárně závislá na typu půdy, obsahu vlhkosti při zhutnění a na síle hutnění. Aby se dosáhlo maximálního zhutnění, je důležité, aby se při pěchování používal optimální obsah vlhkosti. Kompaktní energie jak pneumatického, tak ručního pěchování je však obtížné stanovitelná. Zkouška zhutnitelnosti a zkouška „drop“ jsou dva běžně používané postupy pro stanovení optimálního obsahu vlhkosti v materiálu dusané hlíny. Oba jsou uvedeny níže

Zkouška zhutnitelnosti

Při této zkoušce se vzorek půdy o známém obsahu vlhkosti zhutní do válcové for- my o objemu 1 litr (115×105 mm). Zhutňování se provádí v pěti vrstvách stejné tloušťky pěchem těžkým 4,5 kg, který dopadá 27krát na každou vrstvu z výšky 450 mm. Když se válec zhutní do své plné výšky, zaznamená se jeho „vlhká“ hmotnost, aby se stanovila jeho objemová hmotnost. Poté se vzorek vysuší v sušárně, aby se stanovil obsah vlhkosti

v půdě. Stejným způsobem se připraví nejméně 5 vzorků s různým obsahem vlhkosti a zaznamená se jejich objemová hmotnost a obsah vlhkosti. Po vysušení se vypočte obsah vlhkosti a objemová hmotnost za sucha a výsledky se vynesou do grafu. Z výsledné křivky je poté možné určit optimální obsah vlhkosti, ve které je zemina nejlépe zhutnitelná.

Zkouška „drop“

Obecně se předpokládá, že tato zkouška poskytuje dobrou aproximaci optimálního obsahu vlhkosti. Kulička z vlhké hlíny o průměru 40 – 50 mm se ručně zhutní. Poté se pustí přibližně z 1,5 m výšky na tvrdý rovný povrch. Pokud je hlína příliš suchá, kulička se rozpadne na mnoho malých kousků. Pokud se kulička rozpadne na několik větších kusů, dá se konstatovat, že je hlína velmi blízko svému optimálnímu obsahu vlhkosti. Naopak pokud kulička zůstane v jednom kuse, je hlína příliš vlhká. Tahle zkouška se široce používá přímo na stavbě během výstavby, a proto jí lze zařadit mezi tzv. in situ zkoušky.

6.1.2.3 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku představuje základní parametr pro kontrolu kvality dusané hlíny, stejně jako například u betonu. Zkouška pevnosti v tlaku se obvykle provádí na válcích 100×200 mm nebo 150×300 mm. Materiál by se měl do forem zhutňovat při optimálním obsahu vlhkosti. Hutnění se provádí 4,5 kg závažím, ale může být také specifikováno pneumatické hutnění. Maximální velikost zrna by neměla překročit 1/10 průměru válce. Pokud je z materiálu vyřazeno více než 20 – 30 % původního materiálu, může mít tato změna významný vliv na výslednou pevnost a měl by se použít větší reprezentativnější vzorek. Po zhutnění by se válce měly skladovat ve standardních podmínkách až do jejich vysušení. Pokud vzorky obsahují cement, měly by válce tvrdnout po dobu 28 dní. U vzorků je důležité, aby měly styčné plochy s lisem možná co nejvíce rovné. Proto se na povrchu může vytvořit vyrovnávací vrstva například ze sádry, která by neměla být tlustší jak 5 mm. Před vložením válců do lisu se musí změřit jeho rozměry a zvážit se. Následně se spočítá jeho objemová hmotnost. Zatížení na válec by mělo být bez nárazu a nepřetržitě

se zvyšovat konstantní rychlostí 0,2 N/mm² za minutu až do jeho porušení. Charakteristická pevnost v tlaku je dána vzorcem:

$$f_c = f_a - 1,65\sigma_{n-1}$$

kde: f_c = charakteristická pevnost v tlaku zkušební vzorku

f_a = průměrná pevnost v tlaku zkušební vzorku

σ_{n-1} = směrodatná odchylka zkušební vzorku

6.1.2.4 Smršťování

Zkouška je měřítkem toho, jak moc se dusaná hlína smrští po vysušení. Pro testování smrštění mohou být použity stejné typy zkušebních těles, jako u zkoušky pevnosti v tlaku. Stanovení lineárního smrštění závisí na měření celkových a relativních změn délky válcových těles. Měření lze provádět přímo s použitím celkové délky před a po vysušení, nebo přesněji za použití povrchových tenzometrických zařízení. Počáteční měření by měla být ihned o zhutnění a vyjmutí z formy a poté pravidelně během sušení. Sušení probíhá ve standardních laboratorních podmínkách. Měření smrštění se zastaví, když se již s časem nezmění a hmotnost válce zůstane konstantní.

6.1.2.5 Pevnost v tahu za ohybu

V souvislosti s dusanou hlinou neexistuje žádný uznávaný zkušební postup pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu. Ve většině případů ani není nutná znalost této pevnosti. Pokud je to však nezbytné, měly by se testy snažit stanovit pevnost v ohybu kolmou ke směru zhutnění. Ideálním tvarem tělesa je v tomhle případě hranol. Vzorky by měly být opět důkladně zhutněny a vysušeny ve standardních laboratorních podmínkách. Při zatěžování trámečku je zapotřebí vzít v úvahu vliv vlastní váhy při určování výsledné pevnosti v tahu za ohybu. Zatížení by mělo být bez nárazu a nepřetržitě se zvyšovat až do porušení. Porušení vzorku by mělo být obvykle v rozmezí 60 – 120 s od začátku zatěžování.

6.1.2.6 Smyková pevnost

Znalost smykové pevnosti může být vyžadována při návrhu pro posouzení odolnosti proti usmyknutí stěny z dusané hlíny. Smykovou pevnost lze stanovit pomocí krabicové zkoušky ve velkém měřítku (tj. krychle o velikosti 300×300 mm) nebo přímými testy na zkušebních panelech stěny z dusané hlíny, jak vidíme na obrázku č. 24. Příprava materiálu a zkušebního tělesa by měla v co největší míře simulovat podmínky přímo na stavbě.



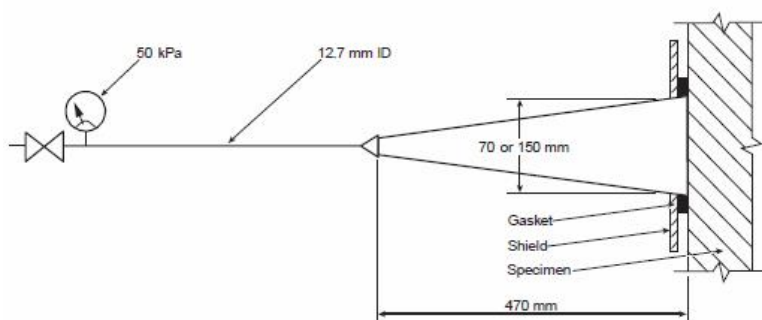
Obrázek 24: Zkouška smykové pevnosti na zkušebním panelu z dusané hlíny [26]

6.1.2.7 Zrychlený test vodní eroze

V současné době neexistuje žádný jednoduchý nebo spolehlivý test, který by předpovídal odolnost dusané hlíny proti vodní erozi. Pro tento účel doporučuje australská příručka Earth Building, ke stanovení relativní odolnosti proti vodní erozi, tzv. zrychlený test vodní eroze. Test spočívá v tom, že vzorky jsou vystaveny nepřetržitému proudu vody po dobu 60 minut nebo dokud voda nepronikne úplně skrz vzorek. Výsledek

z hlediska rychlosti vodní eroze je poté stanoven na základě hloubky průniku vodního proudu nebo času potřebného k úplnému průniku vzorku.

Za normálních okolností by měly být na zkoušku zrychlené vodní eroze připraveny 3 shodné vzorky o velikosti 300×300 mm (plocha zkušební vzorku) a tloušťky minimálně 100 mm. Speciální přístroj potřebný pro test, který vidíme na obrázku č. 25, se skládá z rozprašovací trysky o průměru 50 mm, vodního čerpadla, manometru, usazovací nádrže, filtračního síta a upevnění vzorku včetně clon a těsnění. Vzorky se do přístroje umísťují ve stejné orientaci, jako je poloha stěny v konstrukci, tzn. zhutňovací vrstvy jsou vodorovně. Každý vzorek je poté vystaven stříkající vodě po dobu 60 minut, nebo dokud voda neprojde skrz vzorek.



Obrázek 25: Přístroj pro zrychlený test vodní eroze [26]

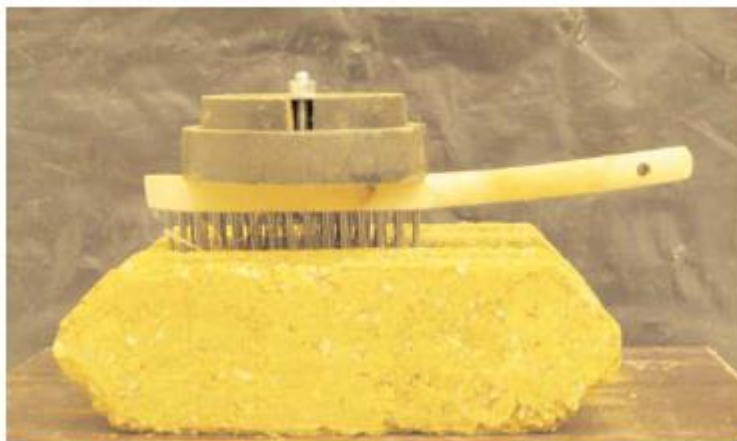
Na konci zkoušky se v milimetrech změří hloubka vodní eroze. Maximální naměřená hloubka se bere jako rychlost vodní eroze [mm/h]. Pokud vzorek selže za méně jak 60 minut, stanoví se rychlost vodní eroze z tloušťky vzorku dělené časem [h], ve které byl test zastaven.

6.1.2.8 Odolnost proti otěru

V současné době neexistuje univerzálně uznávaný test na vyjádření odolnosti proti otěru pro hliněné materiály. Laboratorní zkoušky obvykle zahrnují otěry povrchů drátěným kartáčem za stanoveného tlaku a následného měření úbytku materiálu. Zkoušení odolnosti proti otěru může být užitečné pro srovnání vlastností různých materiálů nebo ochranných povrchů, ale není pravděpodobné, že poskytne spolehlivou prediktivní informaci o budoucím chování materiálu. Níže je uveden jednoduchý zkušební postup vyvinutý pro bloky z dusané hlíny.

Základním cílem zkoušky je změřit odolnost povrchu dusané hlíny vůči otěru. Zkušební těleso z dusané hlíny je vystaveno abrazivnímu působení drátěného kartáče při konstantním vertikálním tlaku po daný počet cyklů. Povrchu zkušební tělesa z dusané hlíny by měl být upraven tak, aby reprezentativně napodoboval skutečnou konstrukci zdi. Zkušební těleso by mělo být o rozměrech 300×300×100 mm. Odolnost proti otěru se měří jako ztráta materiálu na povrchu zkušební tělesa. Na test se používá standardní drátěný kartáč. Pro zajištění konstantního vertikálního tlaku je na kartáč upevněno závaží o hmotnosti 3 kg, jak vidíme na obrázku č. 26. Zkušební těleso by mělo být pro testování poleženo na plocho. Zkušební těleso se nejprve zváží a poté je povrch tělesa podroben otěru drátěného kartáče, který zahrnuje 60 úplných cyklů (dozadu a vpřed = 1 cyklus) za 1 minutu. Během testu by neměl být vyvíjen žádný vertikální tlak. Šířka kartáčované oblasti by neměla přesáhnout šířku kartáče o více jak 2 mm. Kartáčování by mělo být po celé délce (300 mm) zkušební tělesa a během kartáčování by alespoň polovina povrchu kartáče měla zůstat v kontaktu s testovacím povrchem. Po dokončení kartáčování se opatrně odstraní veškerý zbývající uvolněný materiál a zkušební těleso se opět zváží. Otěruvzdornost je poté výsledek jako plocha kartáčovaného povrchu dělená re-

dukci hmotnosti způsobené kartáčováním [m^2/kg]. Směr kartáčování může být rovnoběžný nebo kolmý ke směru zhutněných vrstev. Za normálních podmínek lze na obou stranách zkušebního tělesa provést zkoušku více než jednou [26].



Obrázek 26: Zkouška odolnosti proti otěru [26]

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V rámci experimentální části diplomové práce byly testovány tři druhy hlín odebrané ze tří odlišných lokalit. Odběry hlín byly provedeny přímo na pozemcích, kde by v budoucnu měly stát rodinné domy z dusané hlíny. Těmi lokalitami jsou Dolní Těrlícko, cca 30 km jihovýchodně od Ostravy, obec Dolany, která leží 9 km jihozápadně od Olomouce a obec Valchov, cca 5 km jihovýchodně od Boskovic. Experimentální část diplomové práce navazuje na poznatky získané během vypracování bakalářské práce „*Využití materiálů na bázi dusané hlíny pro obytné stavby*“, především na její praktickou část, kde byla navrhována a vyzkoušena metodika výroby zkušebních těles pro tlakovou zkoušku. Dále se experimentální část diplomové práce zabývala testováním a sledováním dalších vlastností hliněného materiálu, kterými jsou:

- tepelná kapacita;
- pevnost v tahu za ohybu;
- odolnost proti vodě;
- požární odolnost.

7.1 Metodika práce

Experimentální část této diplomové práce byla rozdělena do čtyř etap.

- I. první etapa byla věnována optimalizaci složení hliněné směsi.

Před zahájením samotného výzkumu a všech experimentálních prací bylo nejprve zapotřebí nashromáždit potřebné informace a data týkající se řešené problematiky. Na základě těchto informací byl vytvořen početní model v Excelu, s jehož pomocí se dá editovat křivka zrnitosti hliněné směsi. Za pomoci tohoto modelu byla následně namodelována finální křivka zrnitosti hliněného materiálu a byl získán poměr zastoupení všech potřebných složek pro vytvoření hliněné směsi.

- II. druhá etapa se zabývala návrhem metodiky výroby zkušebních těles pro tlakovou zkoušku.

V rámci druhé etapy byly v první fázi, na základě předešlé etapy, navrženy dvě varianty hliněných směsí. V druhé fázi byly vybrány 3 referenční tvary zkušebních těles. Ve třetí fázi této etapy byly z obou variant hliněných směsí a všech třech tvarů zkušebních těles vyrobeny tři referenční vzorky dle navržené metodiky. V poslední fázi byla zkušební tělesa otestována na tlakovou pevnost a následně se provedlo vyhodnocení výsledků.

III. třetí etapa na základě získaných výsledků optimalizovala metodiku výroby zkušebních těles pro tlakovou zkoušku.

Na základě výsledků předešlé etapy byla vybrána nejlepší varianta hliněné směsi a byl vybrán nejvhodnější tvar zkušebního tělesa. Dále byly pro vybraný tvar zkušebního tělesa vyrobeny odpovídající formy a hutnicí přístroj. Za pomoci nového hutního přístroje byla vyrobena zkušební tělesa pro všechny vybrané lokality, která se následně otestovala na pevnost v tlaku a provedlo se vyhodnocení výsledků.

IV. poslední čtvrtá etapa byla zaměřena na testování dalších vlastností hliněné směsi pro její lepší znalost a využití ve stavbě rodinného domu.

Náplní čtvrté etapy bylo provést další zkoušky hliněného materiálu, které doplnily znalosti o vlastnostech navržených hliněných směsí. Pro doplňující zkoušky byla vyrobena zkušební tělesa totožným postupem jako pro zkoušku tlakové pevnosti. Následně vyrobená zkušební tělesa byla otestována na tepelnou kapacitu, pevnost v tahu za ohybu a odolnost proti vodě. V poslední řadě této etapy byly nastudovány informace o prováděných zkouškách hliněných směsí v rámci požárně bezpečnostní odolnosti, ale samotné zkoušky nebyly fyzicky na navržených hliněných směsích provedeny.

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

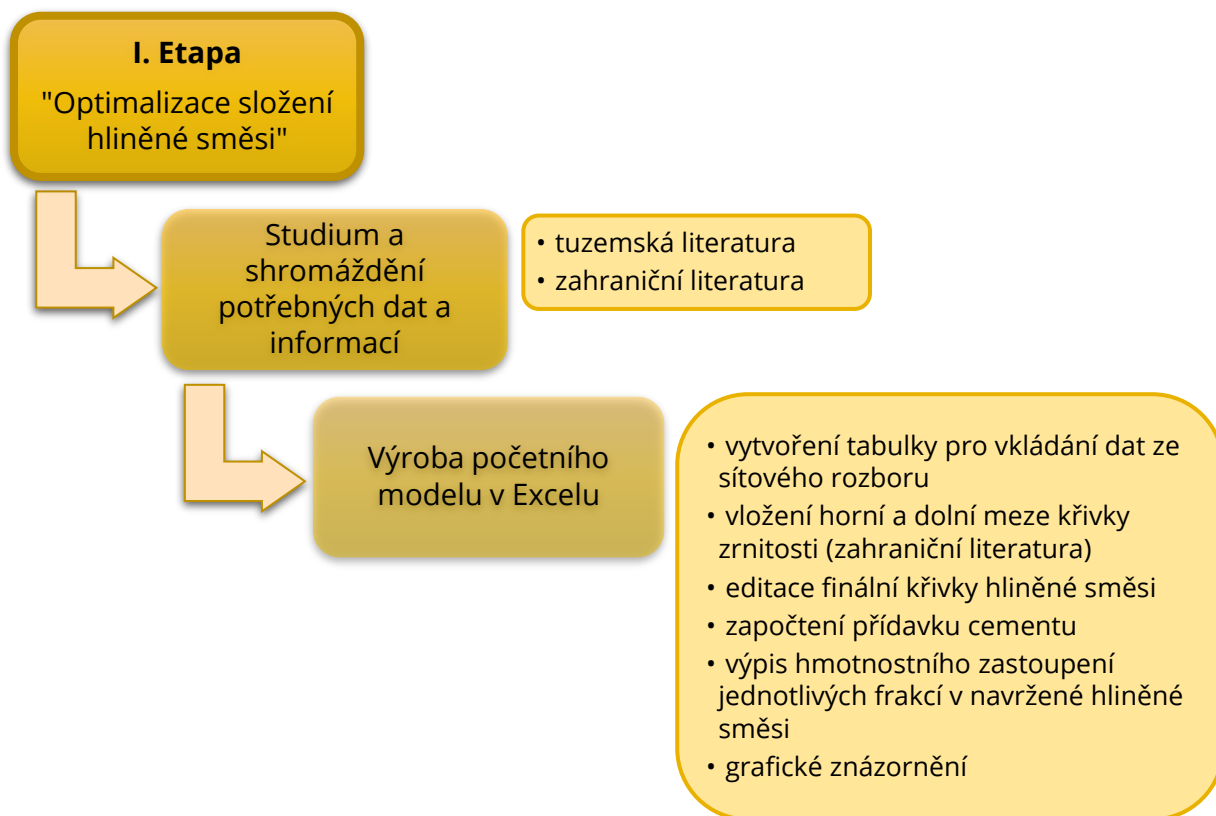


Schéma 3: Schéma postupu řešení předkládané diplomové práce – I. Etapa

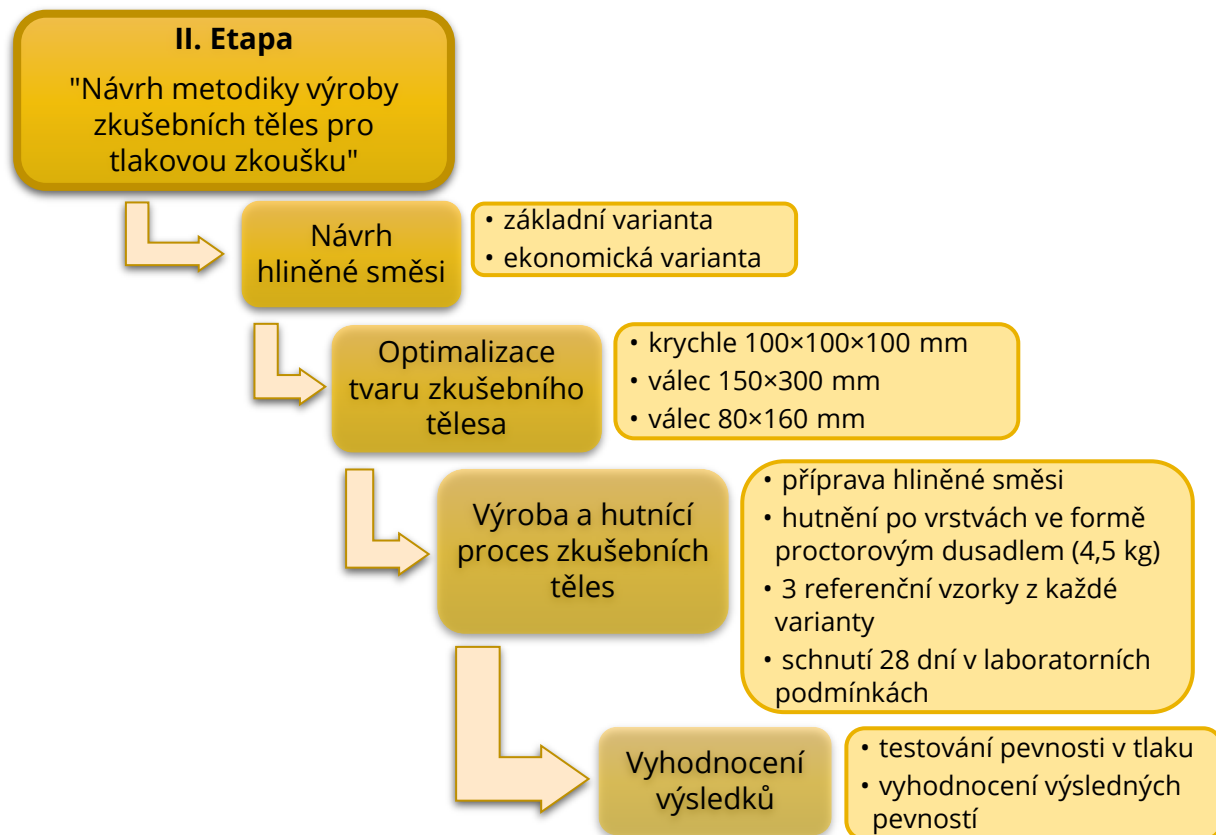


Schéma 4: Schéma postupu řešení předkládané diplomové práce – II. Etapa

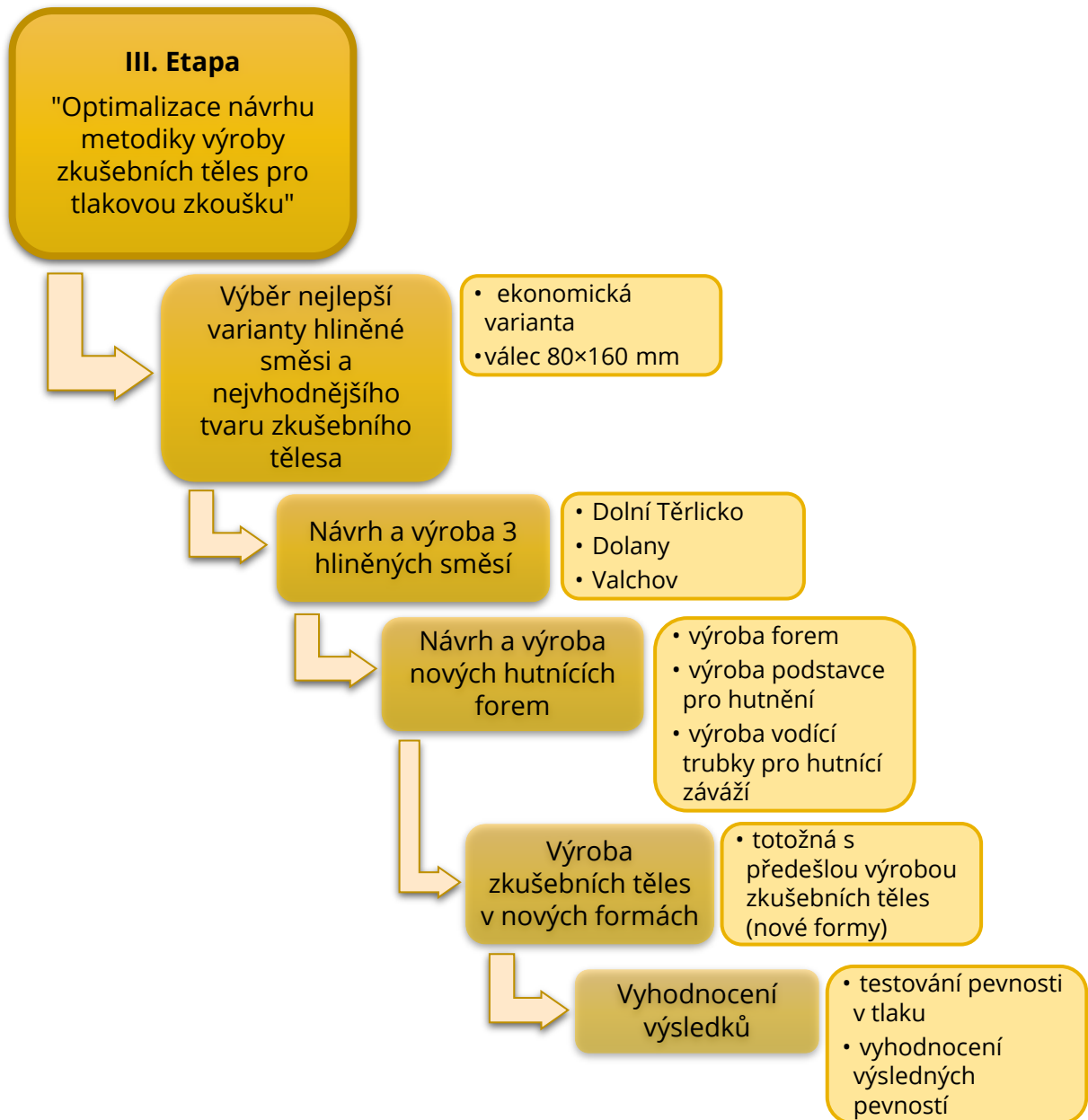


Schéma 5: Schéma postupu řešení předkládané diplomové práce – III. Etapa

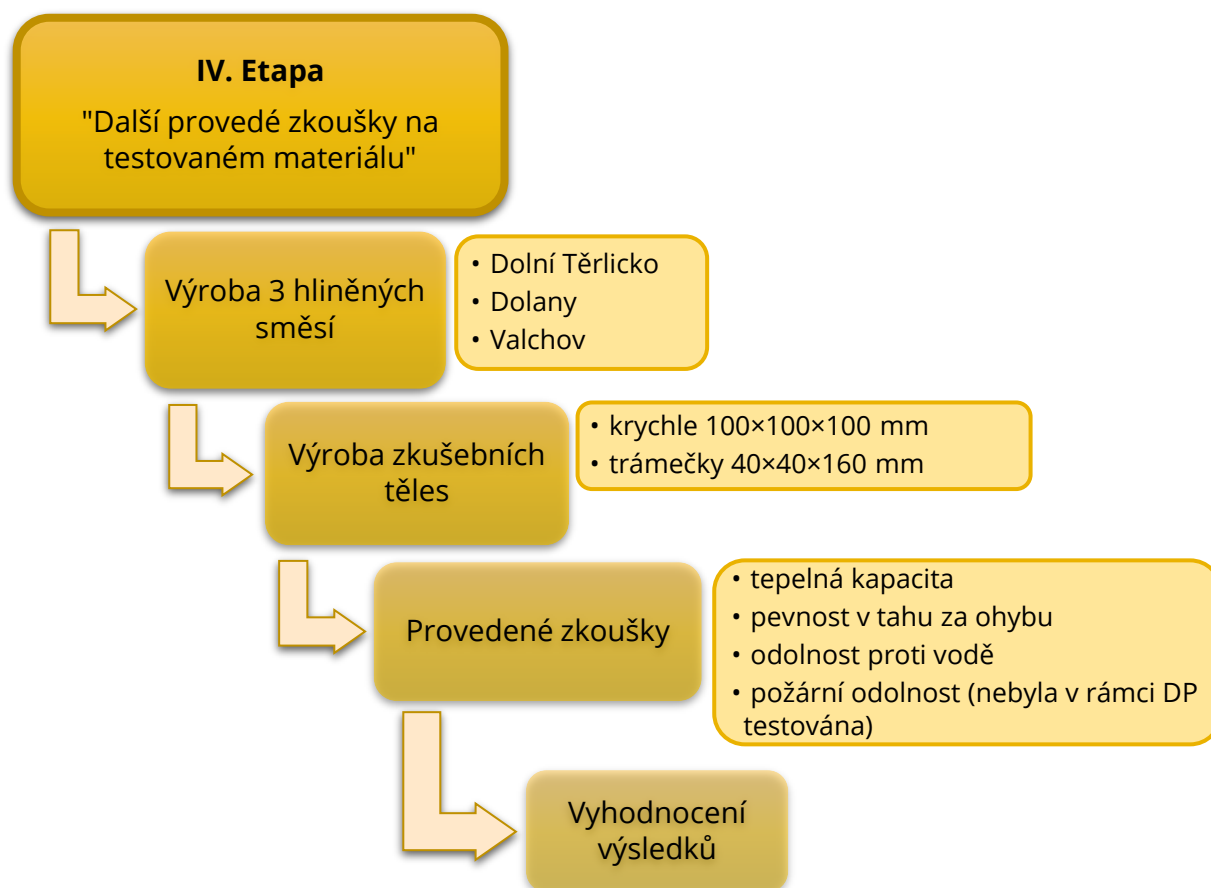


Schéma 6: Schéma postupu řešení předkládané diplomové práce – IV. Etapa

7.2 Použité suroviny

7.2.1 Hlína

Pro vhodné namíchání hliněných směsí, které byly použity na výrobu zkušebních těles, a které by se následně měly použít pro stavbu rodinných domů, bylo zapotřebí zjistit složení a obsah vlhkosti v odebraných hlínách, které jsou nejpodstatnější složkou výsledné hliněné směsi.

Z těchto důvodů byly na odebraných hlínách vyhotoveny laboratorní zkoušky pro vlhkost, zrnitost a zhutnitelnost, které byly provedeny na Ústavu geotechniky, FAST VUT.

7.2.1.1 Vlhkost

Zkouška stanovení vlhkosti byla provedena dle platné ČSN CEN ISO/TS 17892 – 1 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlh-

kosti zemin jako aritmetický průměr ze dvou stanovení vysušením při 105 °C do stálé hmotnosti.

7.2.1.2 Zrnitost

Zkouška zrnitosti byla stanovena dle ČSN CEN ISO/TS 17892 – 4 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti zemin kombinovanou zkouškou areometrické analýzy a síťového rozboru.

Podíl zrn nad 0,063 mm se stanovil proséváním přes normovou sadu sít. Velikost zrn pod 0,063 mm byla zjištěna nepřímo na základě proměnlivé rychlosti jejich sedimentace v suspenzi tzv. areometrickou metodou dle Casagrandeho.

7.2.1.3 Zhutnitelnost

Zhutnitelnost byla stanovena zkouškou Proctor Standard podle ČSN EN 13286 – 2 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti. Výsledek zkoušky je vyjádřen maximální objemovou hmotností suché zeminy ρ_{dmax} , které se dosáhne normovou zhutňovací energií.

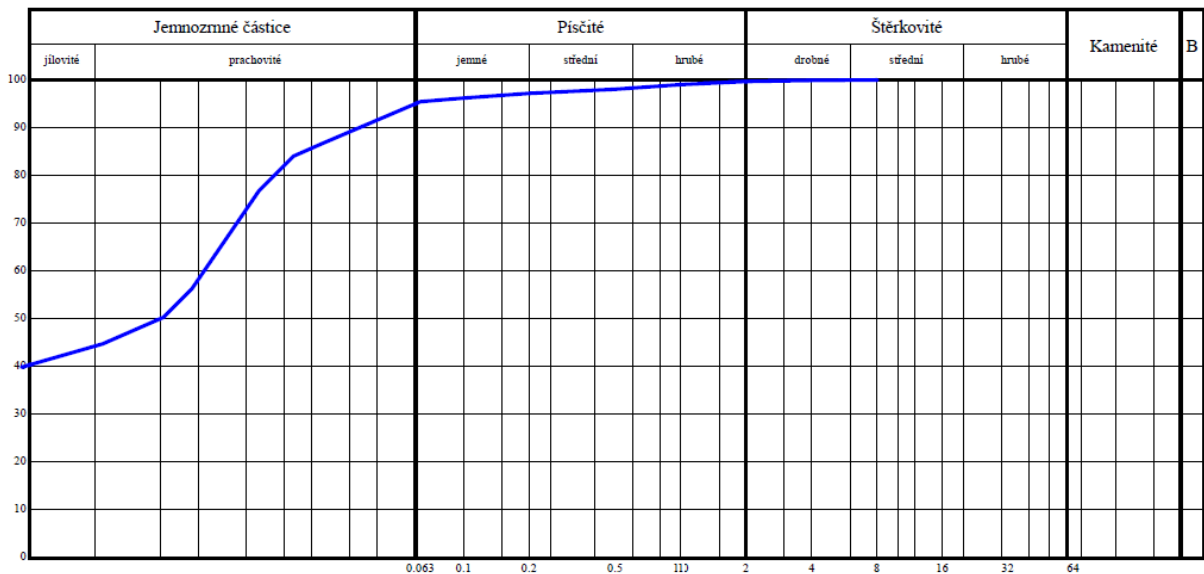
7.2.1.4 Výsledky laboratorních zkoušek odebraných hlín

Dolní Těrlícko

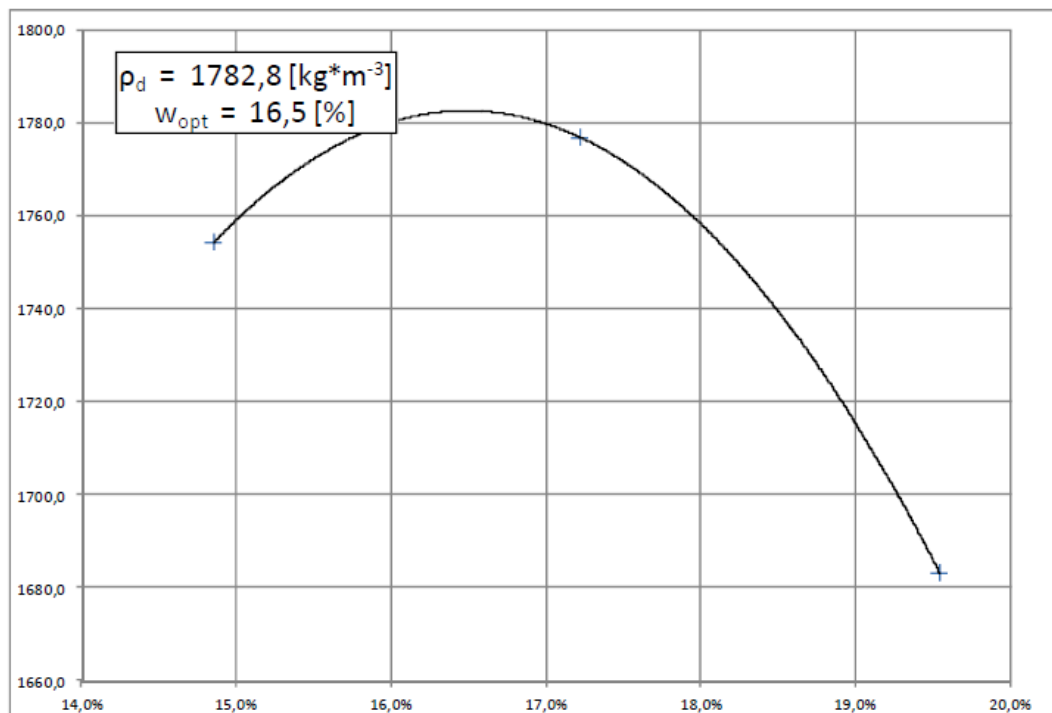
Výsledky zkoušky zrnitosti ukázaly, že se jedná o hlínu, která se skládá cca z 45 % jílu, 50 % prachu a 5 % písku. Podle křivky zrnitosti zeminy ČSN 73 6311 na grafu č. 3, se zemina zařídila do kategorie CI (jíl), F5 = ML (hlína s nízkou plasticitou).

Obsažená vlhkost v hlíně byla stanovena na 21,3 %.

Výsledky Proctorovy zkoušky stanovily optimální vlhkost ($w_{opt.}$) hlíny na 16,5 % a objemovou hmotnost hlíny v suchém stavu (ρ_d) na 1782,8 kg/m³, jak vidíme na grafu č. 4.



Graf 3: Křivka zrnitosti zeminy ČSN 73 6133 (Dolní Těrlícko)



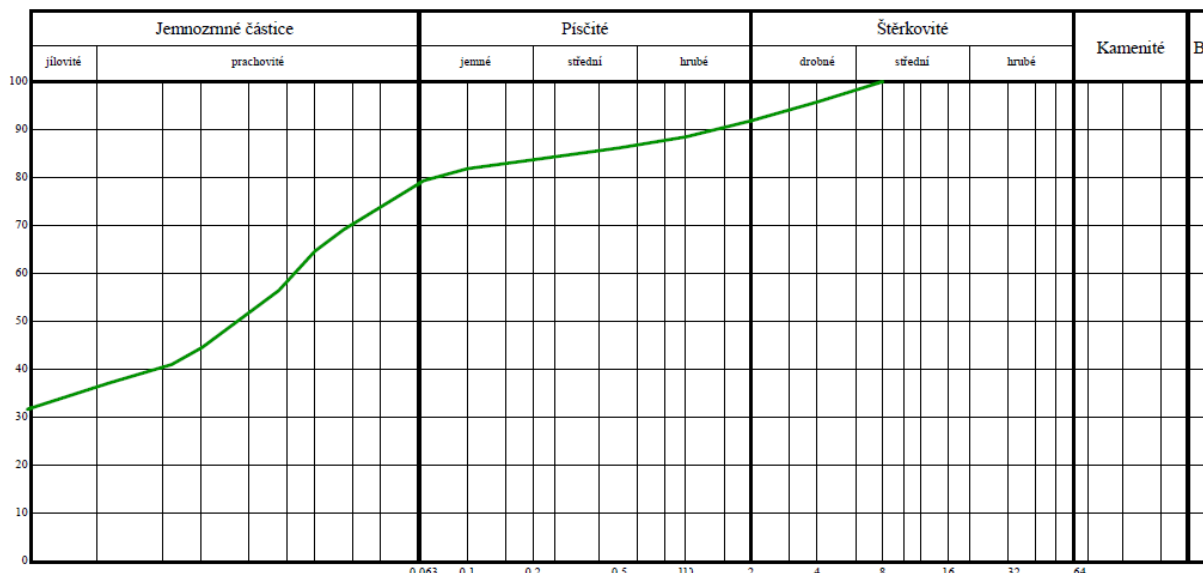
Graf 4: Graficky znázorněný výsledek zkoušky Proctor Standard (Dolní Těrlícko)

Dolany

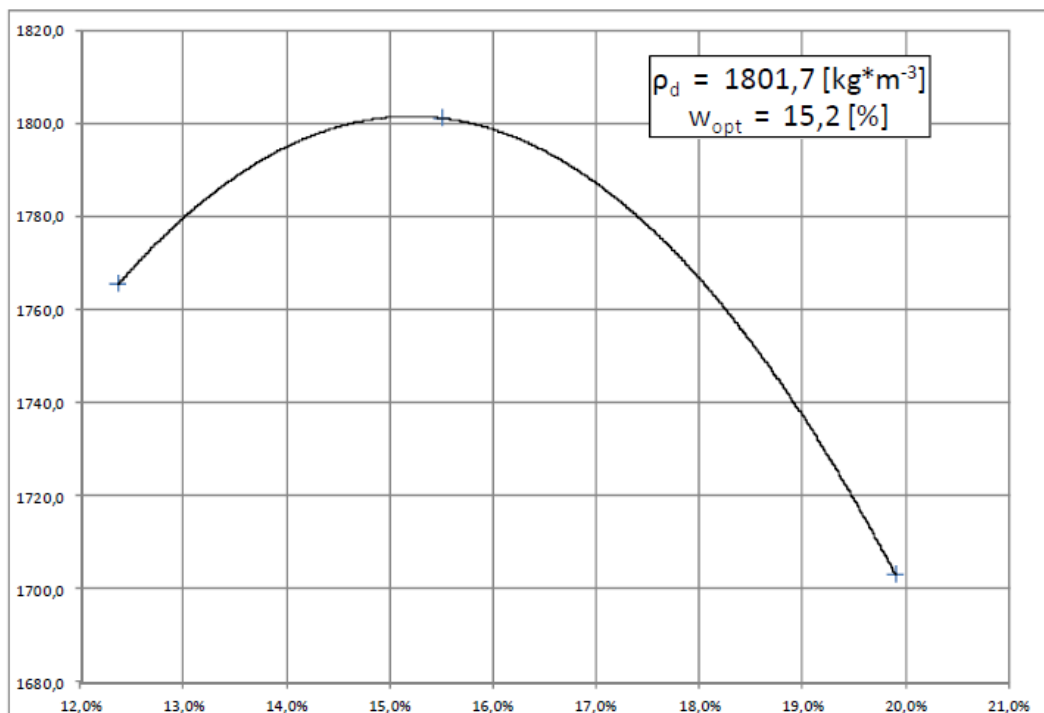
Výsledky zkoušky zrnitosti ukázaly, že se jedná o hlínu, která se skládá cca z 36 % jílu, 44 % prachu, 12 % písku a 8 % štěrku. Podle křivky zrnitosti zeminy ČSN 73 6311 na grafu č. 5, se zemina zatřídila do kategorie CI (jíl), F5 = ML (hlína s nízkou plasticitou).

Obsažená vlhkost v hlíně byla stanovena na 20,7 %.

Výsledky Proctorovy zkoušky stanovily optimální vlhkost ($w_{opt.}$) hlíny na 15,2 % a objemovou hmotnost hlíny v suchém stavu (ρ_d) na 1801,7 kg/m³, jak vidíme na grafu č. 6.



Graf 5: Křivka zrnitosti zeminy ČSN 73 6133 (Dolany)

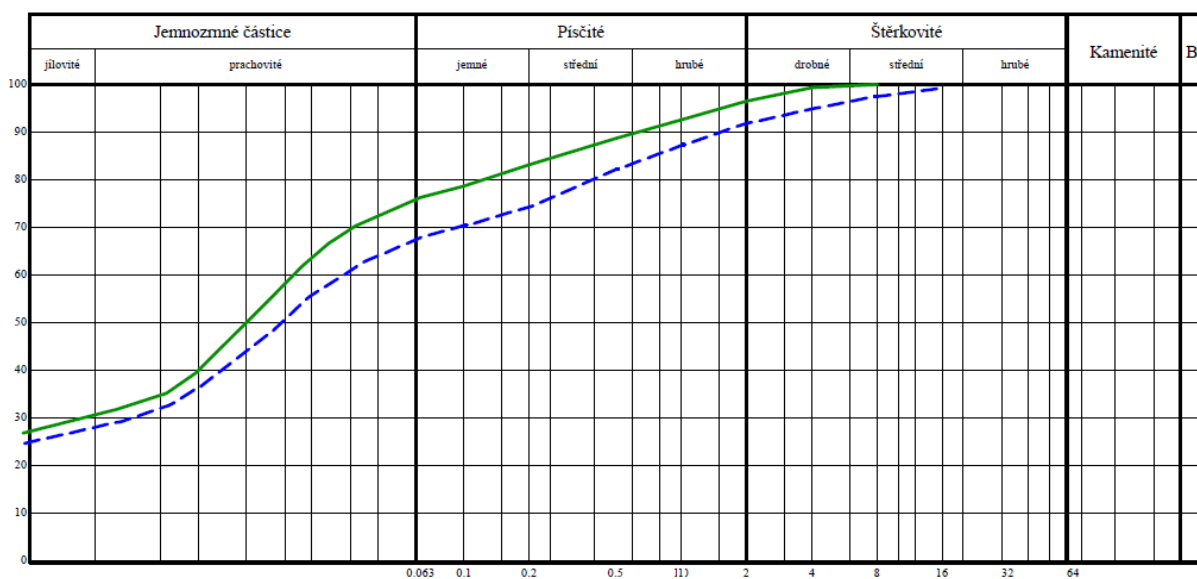


Graf 6: Graficky znázorněný výsledek zkoušky Proctor Standard (Dolany)

Valchov

Výsledky zkoušky zrnitosti ukázaly, že se jedná o hlínu, která se skládá cca z 30 % jílu, 46 % prachu, 20 % písku a 4 % štěrku. Podle křivky zrnitosti zeminy ČSN 73 6311 na grafu č. 7, se zemina zatřídila do kategorie saCl (písčité jíly), F5 = ML (hlína s nízkou plasticitou).

Obsažená vlhkost v hlíně byla stanovena na 15,2 %.



Graf 7: Křivka zrnitosti zeminy ČSN 73 6133 (Valchov)

7.2.2 Písek

Jednou z příměsí, která byla použita do hliněné směsi, byl písek frakce 0/4 mm z Bratčic, který vidíme na obrázku č. 27.



Obrázek 27: Písek frakce 0/4 z Bratčic

7.2.3 Štěrk

Další důležitou použitou příměsí bylo kamenivo, a to konkrétně štěrk frakce 4/8 mm a jako hrubší kamenivo štěrk frakce 8/16 mm. Hrubší frakce štěrku 8/16 mm byla použita pouze při výrobě zkušebních těles tvaru válce o rozměrech 150×300 mm. Při výrobě ostatních zkušebních těles (válec 80×160 mm, krychle 100×100×100 mm a trámeček 40×40×160 mm) byla vzhledem k velikosti zkušebních těles použita pouze frakce 4/8 mm.



Obrázek 28: Štěrk frakce 4/8 mm (vlevo) a štěrk frakce 8/16 mm (vpravo)

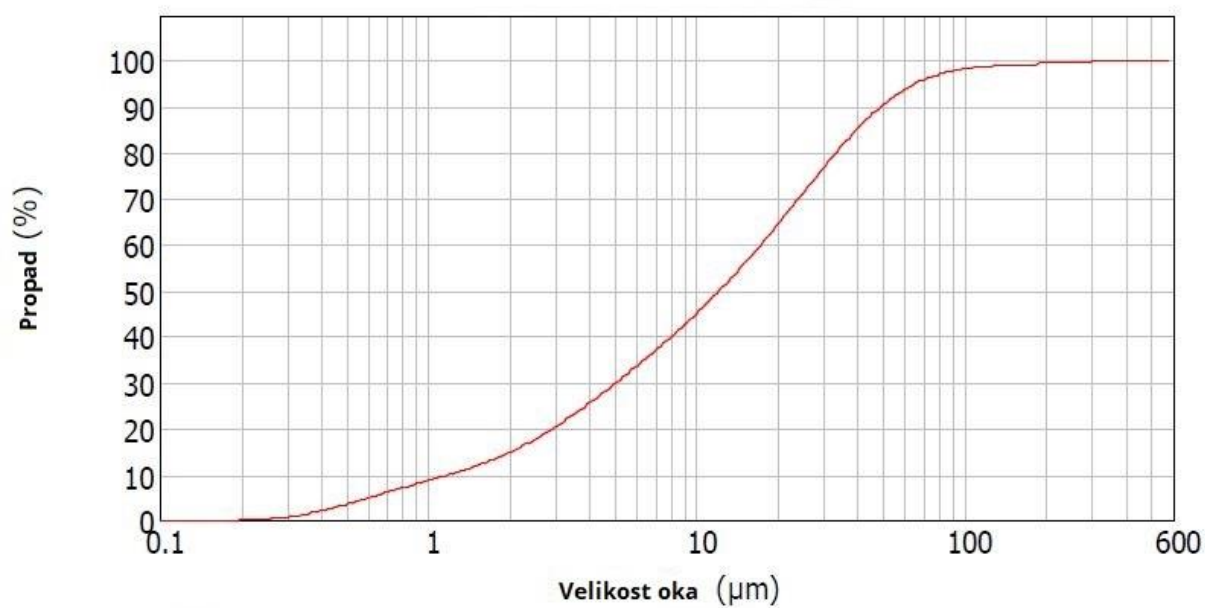
7.2.4 Cement

Poslední složkou do všech hliněných směsí byl jako pojivo použit cement v zastoupení 7 % z celkové hmotnosti směsi. Konkrétně byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R. Jeho vlastnosti jsou vypsány v tabulce č. 1 a na grafu č. 8 je vidět křivka zrnitosti použitého cementu.

Tabulka 1: Vlastnosti používaného cementu CEM I 42,5 R

Vlastnost	Hodnota					
	1 den	2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
Pevnost v tlaku [MPa]	14	30	53	60	66	67
	1 den	2 dny	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	4	6	8	9	9	9

Normální konzistence [%]	27,4									
Počátek tuhnutí [min]	183									
Konec tuhnutí [min]	242									
Objemová stálost [mm]	0,9									
Měrný povrch [m ² ·kg ⁻¹]	4,8									
Měrná hmotnost [kg·m ⁻³]	3110									
Sypná hmotnost [kg·m ⁻³]	980									
Hydratační teplo [J·g ⁻¹]	310									
Chemické složení [%]	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl ⁻	K ₂ O	Na ₂ O	
	63,7	19,6	4,8	3,3	1,4	3,1	0,040	0,75	0,19	



Graf 8: Křivka zrnitosti používaného cementu CEM I 42,5 R

7.3 I. Etapa – optimalizace složení hliněné směsi

Cílem první etapy bylo navrhnout, jakým způsobem optimalizovat složení hliněné směsi, aby bylo dosaženo kvalitních výsledků a finální hliněná směs mohla být použita pro stavbu rodinného domu. K těmto účelům musela být v první řadě prostudována tuzemská i zahraniční literatura, zabývající se danou problematikou, pro získání klíčových informací a poznatků. Zároveň byla snaha o vytvoření systému, který by návrh hliněné směsi v co největší míře usnadnil a zjednodušil. Na základě těchto požadavků byl vytvořen univerzální výpočetní model v excelu, s jehož pomocí lze provést návrh hliněných směsí pro konkrétní stavby. Celý popis tohoto modelu bude rozveden v následující kapitole a bude odkázán na následující tabulku č. 2 a graf č. 9.

7.3.1 Popis výpočetního modelu

V první části tabulky zleva je vidět, že byla tabulka rozdělena podle frakcí a jednotlivých velikostí ok v sadě sít, používaných pro laboratorní zkoušky stanovení zrnitosti materiálu. Tabulka je tedy členěna dle jednotlivých frakcí na jíl, prach, písek, štěrk a kámen. Z toho vyplývá, že vstupními daty do tabulky jsou výsledky ze zkoušky zrnitosti jednotlivých druhů hlín, které se zadají do světle zelených polí v oranžovém úseku „STÁVAJÍCÍ MATERIÁL“. Pravidlem celé tabulky je, že pole označená světle zelenou barvou se dají editovat dle konkrétních potřeb. Ostatní pole zůstávají bez zásahu do nich.

Zároveň se v první části tabulky nachází dva modře označené sloupce „HORNÍ MEZ“ a „DOLNÍ MEZ“. Tyto dva sloupce znázorňují pevně dané zrnitostní křivky, které byly převzaty z odborné literatury zabývající se výstavbou pomocí technologie dusané hlíny. Prostor mezi těmito dvěma mezemi zaručuje, že finální křivka navržené hliněné směsi spadající do tohoto prostoru, bude dosahovat dostatečných pevností potřebných pro stavbu rodinného domu.

Další, nejpodstatnější částí tabulky je tmavě zelený úsek „EDITACE KŘIVKY“. V tomto úseku jsou nejdůležitějšími sloupci „PŘÍDAVEK FRAKCE“ a „STABILIZÁTOR“. Právě do sloupce „PŘÍDAVEK FRAKCE“ lze podle potřeb editovat procentuální přídavky jednotlivých zrnitostních frakcí a tím upravovat výslednou křivku zrnitosti hliněné směsi. Druhý

sloupec je pro stabilizátor, v tomhle případě pro cement. Ten lze upravovat procentuálním zastoupením v hliněné směsi a model následně na základě zrnitostní křivky cementu rozpočítá jeho zastoupení do příslušných zrnitostních frakcí.

Následující částí tabulky je červený úsek „UPRAVENÝ MATERIÁL“. Tento úsek je informativní a znázorňuje procentuální zastoupení jednotlivých frakcí (jíl, prach, písek, štěrk a kámen) ve finální navržené hliněné směsi. Zároveň jsou pole s výslednými hodnotami procentuálního zastoupení doplněny odkazy s informacemi získanými během studia potřebné literatury, jako například, že optimální množství jílu v hliněné směsi je v rozmezí 20 – 40 % atd. Tyto informace obsažené v buňkách slouží k lepší kontrole během samotné editace hliněné směsi.

Poslední část tabulky s názvem „TESTOVACÍ ZÁMĚS“ slouží k usnadnění práce před samotným zahájením výroby zkušebních těles. Do světle zelené buňky se v gramech zadá množství hliněné směsi potřebné pro výrobu zkušebních těles a model sám následně na základě procentuálního zastoupení rozpočítá potřebné množství jednotlivých příměsí, kterými jsou původní hlína, písek, štěrk a cement.

Pod samotnou tabulkou se dále nachází ještě oranžově zbarvený řádek, který nám informativně udává, kolik procent původního materiálu je obsaženo v nově navržené hliněné směsi.

Celá editační tabulka je poté propojena s grafem (graf č. 9), ve kterém jsou vyneseny všechny zrnitostní křivky. Tohle grafické znázornění slouží k lepší orientaci a usnadnění práce při samotné editaci křivky hliněné směsi.

Tabulka 2: Názorný příklad tabulky vytvořeného výpočetního modelu

Vel.řita (mm)	HORNÍ MEZ		DOLNÍ MEZ		STÁVAJÍCÍ MATERIÁL			EDITACE KŘIVKY			UPRAVENÝ MATERIÁL			TESTOVACÍ ZAMĚS	
	procento propadu	na sítě [%]	HRUBÉ DĚLENÍ	procento propadu	PŘÍDAVEK FRAKCE	ZÚSTÁTEK NA SÍTĚ STABILIZÁTORU	HRUBÉ DĚLENÍ	STABILIZÁTOR	ZÚSTÁTEK NA SÍTĚ FINÁLNÍ SMĚSI	HRUBÉ DĚLENÍ	procento propadu	hmotnost jednotlivých komponentů záměsi (g):	celková hmotnost záměsi (g):		
KAMENY	125,0000	0,0000	0,00	100,0000	0,00	0,0000	0,00	množství stabilizátoru v hotové směsi:	0,0000	0,00	100,0000	0,0	5000,0		
	90,0000	0,0000	0,00	100,0000	0,00	0,0000	0,00		0,0000	100,0000	0,0				
	63,0000	0,0000		100,0000	0,00	0,0000			0,0000	100,0000	0,0				
	45,0000	0,0000		100,0000	0,00	0,0000			0,0000	100,0000	0,0				
	32,0000	0,0000	0,13	100,0000	0,00	0,0000	17,52		0,0000	100,0000	0,0				
ŠTĚRK	16,0000	0,0000		100,0000	0,00	0,0000		7%	0,0000	100,0000	0,0				
	8,0000	0,0000		100,0000	20,00	11,6279				10,8140	89,1860	540,7			
	4,0000	0,1310		99,8690	10,00	5,8901	44,52			5,4778	83,7082	273,9			
	2,0000	0,2220		99,6470	7,00	4,1988				3,9049	79,8033				
	1,0000	0,6700		98,9770	7,00	4,4593			4,1472	75,6562					
PÍSEK	0,5000	100,00	4,44	98,0530	7,00	4,6070	27,00		4,2845	71,3717			350,0		
	0,2000	76,00		97,1700	7,00	4,5831			4,2823	67,1094					
	0,1000	65,50		96,2200	7,00	4,6221			4,2985	62,8108					
	0,0630	60,00		95,4260	7,00	4,5314			4,2142	58,5966					
	0,0225	54,50		86,7750	0,00	5,0297			4,6776	53,9190	233,9				
	0,0165	53,50		84,0560	0,00	1,5808			1,5402	52,3789	77,0				
	0,0114	52,00		76,8040	0,00	4,2163			4,6911	47,6877	234,6				
PRACH	0,0056	49,50	55,46	56,4080	0,00	11,8581	32,25		11,6581	36,0297	582,9				
	0,0041	46,00		50,4010	0,00	3,4924			5,1380	30,8917	256,9				
	0,0022	39,00		44,8360	0,00	3,2355			5,3190	25,5727	265,9				
	0,0009	29,00		39,9640	0,00	2,8326			3,9643	21,6084	198,2				
JÍL	0	39,9640	39,96	0,0000	0,00	23,2349	23,23		21,6084	0,0000	1080,4		2703,5		
													5000,0000		

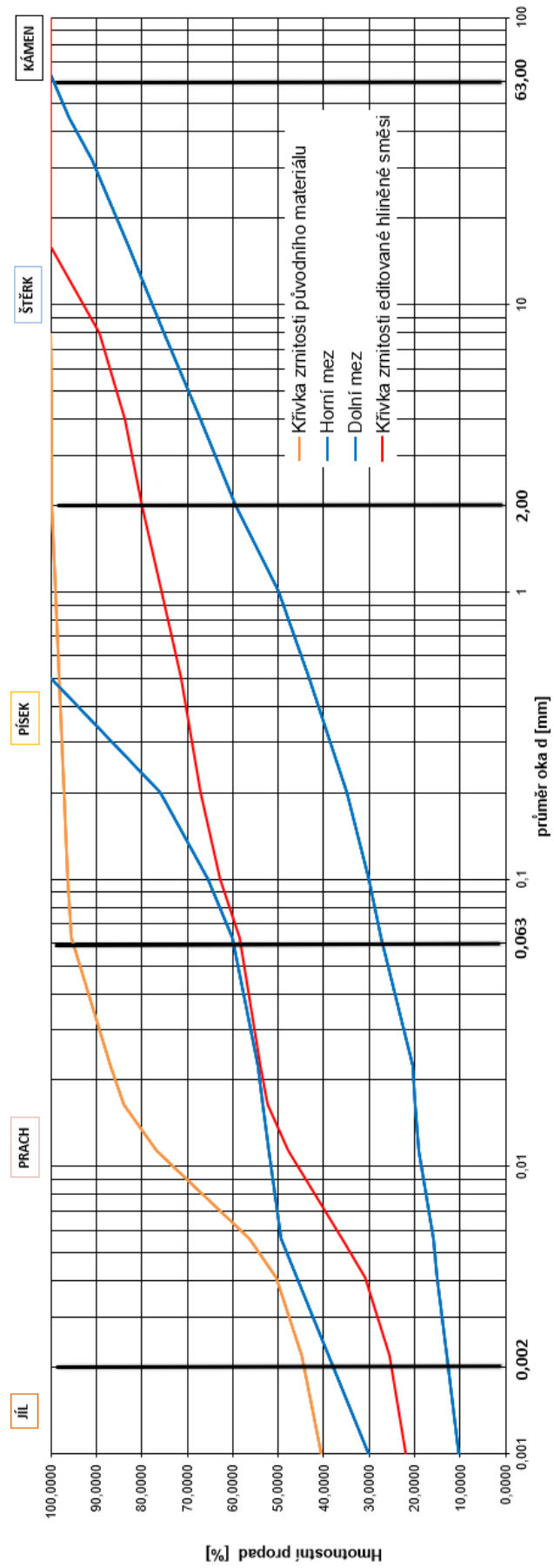
objem původního materiálu=Σ= 100,00

Σ= 72,00

objem směsi bez stabilizátoru= 172,00

objem směsi se stabilizátorem= 184,95

zastoupení původního materiálu ve směsi se stabilizátorem= **54,07%**



Graf 9: Ukázka grafu propojeného s tabulkou ve výpočetním modelu 9

7.4 II. Etapa – návrh metodiky výroby zkušebních těles pro tlakovou zkoušku

Samotná výroba zkušebních těles a jejich následné testování bylo provedeno v prostorách výzkumného Centra AdMas (Advanced Materials, Structures and Technologies), FAST VUT.

7.4.1 Návrh hliněné směsi

Pro návrh hliněné směsi byla v rámci druhé etapy vybrána pouze lokalita Dolní Těřlicko. Důvodem bylo, že hlína ze zmíněné lokality byla testována už v rámci bakalářské práce, takže byly zajištěny podklady pro porovnání výsledků staré a nově navržené metodiky.

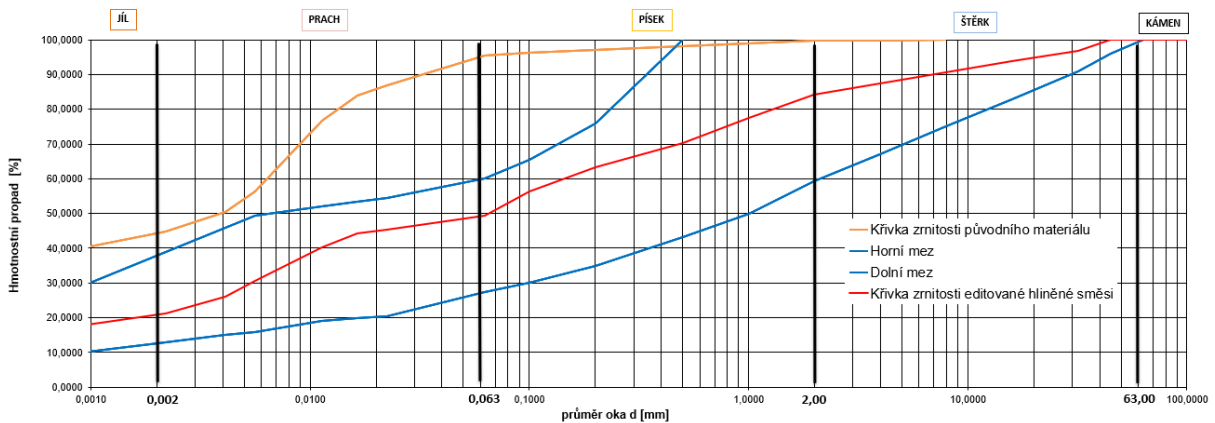
Návrh nové hliněné směsi byl proveden pomocí výpočetního modelu, který vznikl v rámci první etapy. Pro výrobu zkušebních těles byly navrženy dvě varianty hliněných směsí:

- základní varianta;
- ekonomická varianta.

Základní varianta měla charakterizovat směs, která se se svojí zrnitostní křivkou podobala co nejvíce zrnitostní křivce původního materiálu a zároveň se přibližovala středu mezi horní a dolní mezí, jak vidíme na grafu č. 10. Naopak ekonomická varianta se se svojí křivkou zrnitosti snažila co nejvíce přiblížit horní mezi a tím docílit co největšího využití původního materiálu, jak vidíme na grafu č. 11.

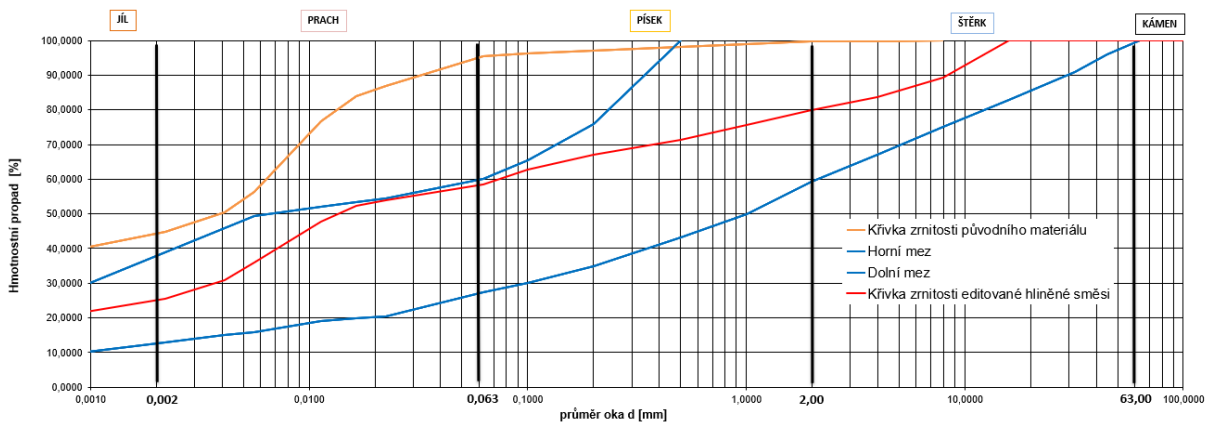
Na grafech vidíme, že rozdíl ve využití původního materiálu byl přibližně 10 %.

zastoupení původního materiálu ve směsi se stabilizátorem= 44,29%



Graf 10: Graf křivky zrnitosti navržené základní varianty (Dolní Těrlicko)

zastoupení původního materiálu ve směsi se stabilizátorem= 54,07%



Graf 11: Graf křivky zrnitosti navržené ekonomické varianty (Dolní Těrlicko)

7.4.2 Příprava hliněné směsi

Příprava hliněné směsi probíhala následovně. V první řadě bylo potřeba původní hlínu ručně rozdrolit, protože obsahovala velké spleené kusy, kvůli kterým by během míchání, a především hutnění nedošlo k dokonalému zhutnění a v konstrukci zkušebního tělesa by vznikaly velké vzduchové kapsy. Rozdíl před a po rozdrolení je patrný na obrázku č. 29.

Do takto rozmělněné hlíny byly následně přisypány ostatní komponenty, které se předem přesně navázily dle hodnot z výpočetního modelu. Těmito složkami byly písek, jemný štěrk frakce 4/8 mm, hrubší štěrk frakce 8/16 mm a cement v zastoupení 7 % z hmotnosti hlíny.



Obrázek 29: Hlína před rozdrolením (vlevo) a hlína po rozdrolení (vpravo)

Takto připravená směs byla následně přichystána k míchání v laboratorní míchačce. Kvůli velkému objemu hliněné směsi byla pro míchání použita vertikální míchačka s nuceným oběhem, kterou vidíme na obrázku č. 30. Vzhledem k poměrně vysokému obsahu vlhkosti (20,3 %), které prokázaly laboratorní zkoušky, nebylo zapotřebí do směsi přidávat záměsovou vodu. Doba míchání byla ve velké míchačce stanovena na 10 minut, a to z důvodu, že po uplynutí 10 minut nebyl v jemnosti konečné hliněné směsi patrný žádný rozdíl. Vzniklou směs můžeme vidět na obrázku č. 31.

Stejným postupem byla připravena i druhá (ekonomická) varianta hliněné směsi.



Obrázek 30: Míchání směsi ve vertikální kruhové míchačce s nuceným oběhem



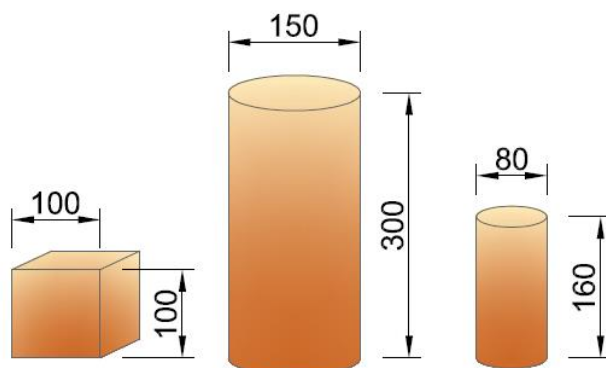
Obrázek 31: Hliněná směs po 10 minutách míchání

7.4.3 Optimalizace tvaru zkušebního tělesa

V rámci první etapy byly pro výrobu zkušebních těles vybrány a následně otestovány tři varianty tvarů zkušebních těles. Tím základním tvarem pro porovnání výsledků byl válec 150×300 mm, který se běžně používá pro zkušební tělesa betonových směsí a byl použit i v rámci bakalářské práce. Jako druhá varianta zkušebního tělesa byla zvolena krychle o rozměrech 100×100×100 mm, taktéž běžně používána pro testování betonových směsí. Třetí variantou byl zvolen válec o rozměrech 80×160 mm, a to hned ze dvou důvodů. Prvním byla nutnost zachování stejného štíhlostního poměru, jaký je i u válce 150×300 mm. Tím druhým důvodem bylo, že používané dusadlo, které bude popsáno v následující kapitole, mělo kruhový průměr dusané plochy 78 mm. Z tohoto důvodu byl zvolen průměr válce 80 mm, aby při hutnicím procesu, byla celá plocha zkušebního tělesa hutněna rovnoměrně.

Cílem této optimalizace bylo otestovat a porovnat výsledné pevnosti se základní variantou válce 150×300 mm, a to především z důvodů časové i fyzické úspory při výrobě zkušebních těles, kdy výroba jednoho zkušebního tělesa (válec 150×300 mm) zabrala

přibližně 45 minut. Schematické znázornění použitých tvarů zkušebních těles můžeme vidět na obrázku č. 32.



Obrázek 32: Tři varianty testovaných zkušebních těles

7.4.4 Výroba a hutní proces zkušebních těles podle navržené metodiky

Připravené hliněné směsi, popsané v předchozích kapitolách byly následně hutněny do připravených forem odpovídajícím tvarům navržených zkušebních těles.

7.4.4.1 Zkušební těleso válec 150×300 mm

Pro výrobu zkušebního tělesa (válec 150×300 mm) byly použity stejné formy, které se používají pro zkušební tělesa z betonových směsí. Formy byly vymazány odbedňovacím olejem a na dno formy byl položen vystřižený kruh z kancelářské fólie, aby se zabránilo přilepení zkušebního tělesa ke stěnám formy.

Hutnění se provádělo po vrstvách cca 100 mm (sypké směsi), kde se každá hutnicí vrstva vlivem hutnění zredukovala přibližně na 1/3 své původní tloušťky. Každá vrstva byla zhutněna 20 rázy použitého dusadla. Celé zkušební těleso se tedy skládalo z 8 – 9 zhutněných vrstev a vážilo přibližně 12 kg. Pro proces samotného hutnění bylo při výrobě všech zkušebních těles použito největší možné dusadlo ze sady pro Proctorovy zkoušky. Dusadlo váží 4,5 kg a jeho výhodou je, že je pevně zajištěna dráha i výška (50 cm) dopadajícího závaží (obrázek č. 33).



Obrázek 33: Proctoro dusadlo 4,5 kg (vlevo) a hutnění vrstvy ve formě válce 150×300 mm (vpravo)

Celkově byla vyrobena tři zkušební tělesa od každé varianty hliněné směsi, která byla po odformování uložena v prostředí $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ teploty a $(80 \pm 5) \%$ relativní vlhkosti (obrázek č. 34). Podmínky se zvýšenou vlhkostí byly zvoleny z důvodů podpoření lepší hydratace cementu, kde zkušební tělesa zrála po dobu 28 dní.



Obrázek 34: Odformování zkušebního tělesa (vlevo a uprostřed) a uložení zkušebních těles (vpravo)

7.4.4.2 Zkušební těleso krychle 100×100×100 mm

Pro výrobu zkušebního tělesa krychle byly použity formy, které se používají pro testování betonových směsí. Formy byly předem vymazány odbedňovacím olejem, aby se zabránilo přilepení zkušebního tělesa ke stěnám formy.

Hutnění celého zkušebního tělesa se provádělo ve 3 – 4 vrstvách a jeho váha byla přibližně 2 kg. Na rozdíl od hutnění válce 150 × 300 mm se každá vrstva, vzhledem k velikosti tělesa, hutnila pouze 10 rázy proctorova dusadla. Další odlišnou věcí oproti výrobnímu procesu válce 150×300 mm byl rozdíl tvaru zkušebního tělesa a hlavy použitého dusadla (krychle × válec). To bylo vyřešeno tím, že pro hutnění jednotlivých vrstev byla z překližky vyrobena roznášecí deska o stejném rozměru, jako vnitřní rozměr formy. Rázy dusadlem byly tedy na hutnicí vrstvy vedeny přes vyrobenou roznášecí desku, která zajistila rovnoměrné zhutnění vrstvy po celé její ploše, jak je vidět na obrázku č. 35.



Obrázek 35: Dusání zkušeb. tělesa pomocí roznášecí desky (vlevo) a odformované zkušební těleso (vpravo)

Celkově byla vyrobena tři zkušební tělesa od každé varianty hliněné směsi, která byla po odformování (obrázek č. 36) uložena v prostředí (23 ± 2) °C teploty a (80 ± 5) % relativní vlhkosti (obrázek č. 34). Podmínky se zvýšenou vlhkostí byly zvoleny z důvodů podpoření lepší hydratace cementu, kde zkušební tělesa zrála po dobu 28 dní.

7.4.4.3 Zkušební těleso válec 80×160 mm

Zkušební tělesa válce 80×160 mm byla vyráběna až dodatečně nezávisle na výrobě předchozích dvou variant. Pro výrobu těchto zkušebních těles byla použita už pouze jedna varianta hliněné směsi (ekonomická varianta) s tím rozdílem, že z důvodu velikosti zkušebního tělesa, byl do hliněné směsi použit pouze štěrk frakce 4/8 mm. Zároveň se zde vyskytoval problém absence forem odpovídajícího rozměru, protože se takový rozměr zkušebního tělesa v žádných jiných prováděných zkouškách stavebních materiálů nenachází. Bylo tedy nutné vyrobit na míru formy pro odpovídající rozměr zkušebního tělesa.

Jako základ v první etapě testování pro tento typ zkušebního tělesa byla zvolena bezešvá ocelová trubka s vnitřním průměrem 80 mm a tloušťkou stěny 3,5 mm, určená pro tlaková zařízení. Trubka byla následně nařezána na požadovaný délkový rozměr (160 mm).

Hutnění bylo prováděno stejným způsobem jako u předešlých zkušebních těles. Průměr hlavy Proctorova dusadla má rozměr 78 mm, tudíž bylo zajištěné rovnoměrné zhutnění po celé ploše dusané vrstvy. Dusání celého zkušebního tělesa se skládalo ze 4 – 5 vrstev, která se každá zhutnila 10 rázy dusadlem (obrázek č. 36). Váha jednoho zkušebního tělesa byla v průměru 1,85 kg.

Celkově byla vyrobena tři zkušební tělesa, která byla po odformování uložena v prostředí (23 ± 2) °C teploty a (80 ± 5) % relativní vlhkosti. Podmínky se zvýšenou vlhkostí byly zvoleny z důvodů podpoření lepší hydratace cementu, kde zkušební tělesa zrála po dobu 28 dní, stejně jako u předchozích dvou variant (obrázek č. 36).



Obrázek 36: Výroba zkušebních těles (válec 80×160 mm) v rámci I. Etapy (vlevo), odformované zkušební těleso (uprostřed) a uložení zkušebních těles (vpravo)

7.4.5 Výsledky tlakových zkoušek I. sady zkušebních těles

V rámci I. Etapy byla všechna vyrobená zkušební tělesa (válc 150×300 mm, krychle 100×100×100 mm a válce 80×160 mm) po vyschnutí (28 dní) otestována na pevnost v tlaku.

Před samotnou zkouškou pevnosti v tlaku byla nejprve všechna zkušební tělesa přeměřena a zvážena, jak můžeme vidět v přehledné tabulce č. 3.

Tabulka 3: Parametry zkušebních těles v rámci I. Etapy

Označení zkušebního tělesa	Průměr / hrana [mm]	Výška [mm]	Váha [kg]
Krychle 100×100×100 mm ZÁKLADNÍ VARIANTA			
KZ1	102,23 / 100,84	101,71	2,16
KZ2	100,20 / 103,15	101,33	2,16
KZ3	102,33 / 101,70	100,29	2,18
Krychle 100×100×100 mm EKONOMICKÁ VARIANTA			
KE1	101,88 / 101,81	100,18	2,21
KE2	102,76 / 101,11	100,40	2,23
KE3	101,58 / 100,85	101,55	2,22
Válec 150×300 mm ZÁKLADNÍ VARIANTA			
VZ1	150,07	301,72	11,93
VZ2	150,11	301,48	11,57
VZ3	150,04	302,57	11,44

Válec 150×300 mm EKONOMICKÁ VARIANTA			
VE1	150,35	301,08	11,83
VE2	150,39	300,94	11,86
VE3	150,76	300,75	11,82
Válec 80×160 mm EKONOMICKÁ VARIANTA			
MVE1	81,17	167,41	1,89
MVE2	81,15	165,61	1,88
MVE3	81,17	166,45	1,89

Po změření a zvážení byla zkušební tělesa převezena ke zkušebnímu laboratornímu lisu, kde následně proběhla zkouška na zjištění pevnosti v prostém tlaku. Každé zkušební těleso bylo jednotlivě uloženo do lisu a bylo rovnoměrně zatěžováno konstantní rychlostí 0,2 N/mm² za minut až do jeho porušení. Příklady porušení zkušebních těles můžeme vidět na obrázku č. 37.



Obrázek 37: Příklady porušení zkušebních těles při provádění zkoušky pevnosti v prostém tlaku

Z takto naměřených hodnot byly vypočteny výsledné pevnosti v prostém tlaku všech zkušebních těles a výsledky byly následně zpracovány a graficky znázorněny pro přehlednější vyhodnocení.

Výsledná pevnost v tlaku byla vypočítána pomocí vztahu:

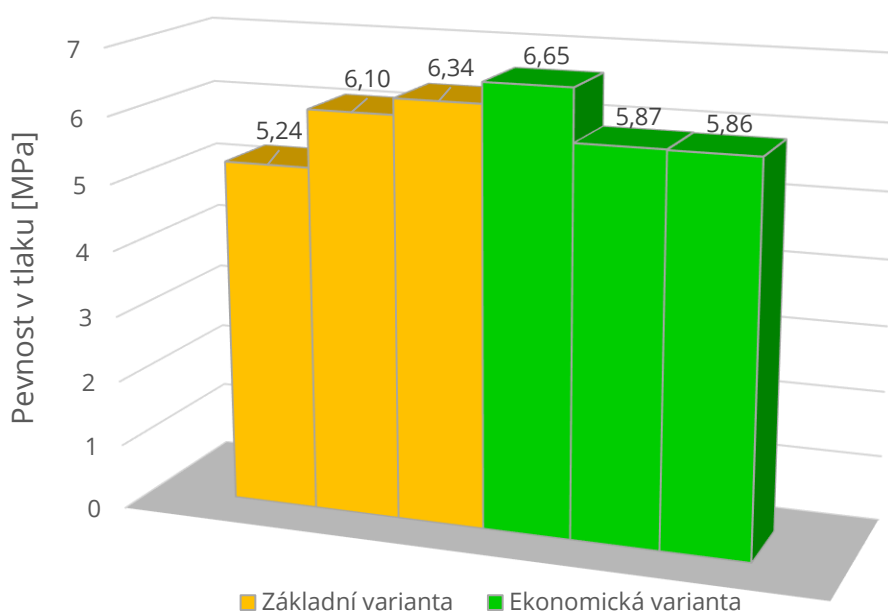
$$R = \frac{F}{A}$$

F - síla [N]
A - tlačná plocha [mm²]

Jako první vyhodnocení bylo provedeno porovnání základní a ekonomické varianty hliněné směsi. Výsledky hodnot můžete vidět v tabulkách č. 4, 5 a grafické znázornění v grafech č. 12 a 13.

Tabulka 4: Výsledné pevnosti základní a ekonomické varianty hliněné směsi na zkušebním tělese krychle 100×100×100 mm

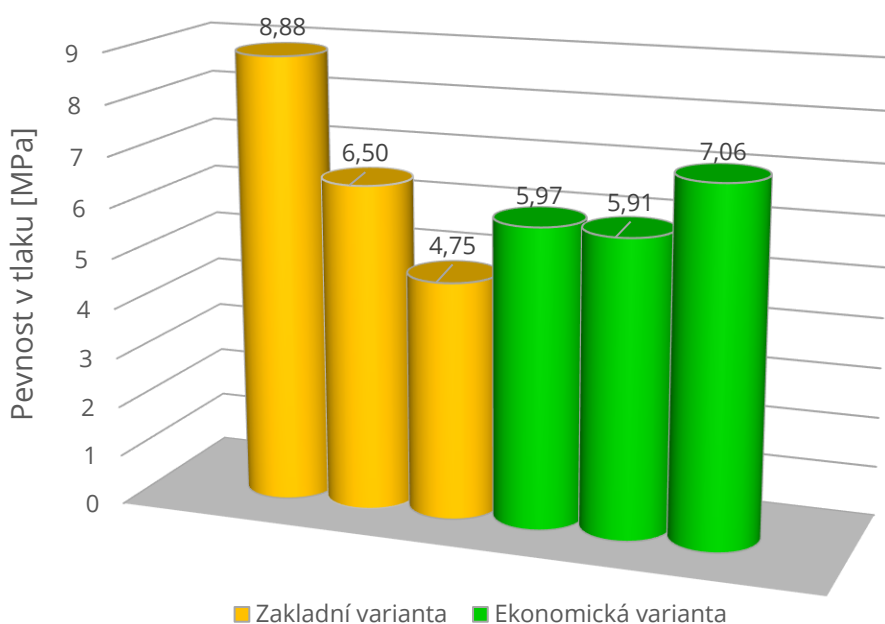
Základní varianta			Ekonomická varianta		
Ozn.	Pevnost v tlaku σ [MPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Ozn.	Pevnost v tlaku σ [MPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
KZ1	5,24	2060	KE1	6,65	2120
KZ2	6,10	2070	KE2	5,87	2140
KZ3	6,34	2090	KE3	5,86	2130
$\bar{\sigma}$	5,89	2070	$\bar{\sigma}$	6,13	2130



Graf 12: Porovnání výsledků tlakové pevnosti základní a ekonomické varianty hliněné směsi (krychle 100×100×100 mm)

Tabulka 5: Výsledné pevnosti základní a ekonomické varianty hliněné směsi na zkušebním tělese válec 150×300 mm

Základní varianta			Ekonomická varianta		
Ozn.	Pevnost v tlaku σ [MPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Ozn.	Pevnost v tlaku σ [MPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
VZ1	8,88	2240	VE1	5,97	2210
VZ2	6,50	2170	VE2	5,91	2220
VZ3	4,75	2140	VE3	7,06	2200
$\sigma =$	6,71	2180	$\sigma =$	6,31	2210



Graf 13: Porovnání výsledků tlakové pevnosti základní a ekonomické varianty hliněné směsi (válců 150×300 mm)

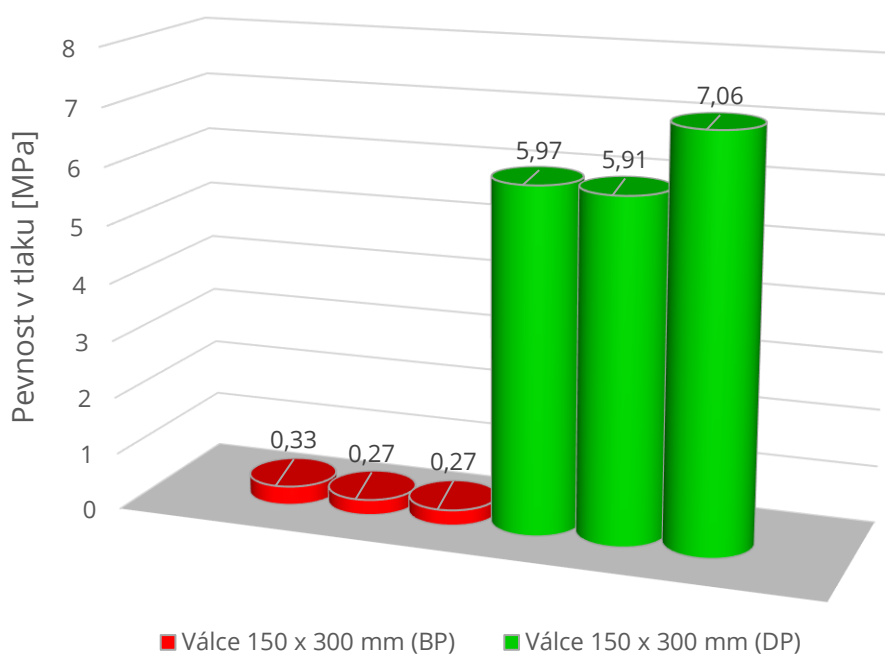
V porovnání výsledků obou zkušebních těles (krychle i válce) bylo zjištěno, že ekonomická varianta hliněné směsi v obou případech vykazuje stabilnější výsledky a v případě krychle dokonce dosahuje i maximální dosažené pevnosti. Z těchto důvodů byla pro další průběh testování používána už pouze jenom ekonomická varianta hliněné směsi.

Dále v rámci I. Etapy proběhlo porovnání výsledků dosažených pevností v rámci bakalářské práce a v rámci diplomové práce dle nově navržené hliněné směsi a nové metodiky výroby zkušebních těles. Porovnání bylo provedeno na válcích 150×300 mm a na hliněné směsi z oblasti Dolní Těrlícko, tak aby byly zajištěny stejné základní vstupní

hodnoty pro obě dvě práce a porovnání výsledků mělo vypovídací hodnotu. Výsledky porovnání vidíme v tabulce č. 6 a na grafu č. 14.

Tabulka 6: Výsledné pevnosti zkušebních těles v rámci bakalářské práce (BP) a v rámci diplomové práce (DP)

Válec 150×300 mm (BP)			Válec 150×300 mm (DP)		
Ozn.	Pevnost v tlaku σ [MPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Ozn.	Pevnost v tlaku σ [MPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
1	0,33	1710	1	5,97	2210
2	0,27	1750	2	5,91	2220
3	0,27	1740	3	7,06	2200
$\bar{\sigma}$	0,29	1730	$\bar{\sigma}$	6,31	2210



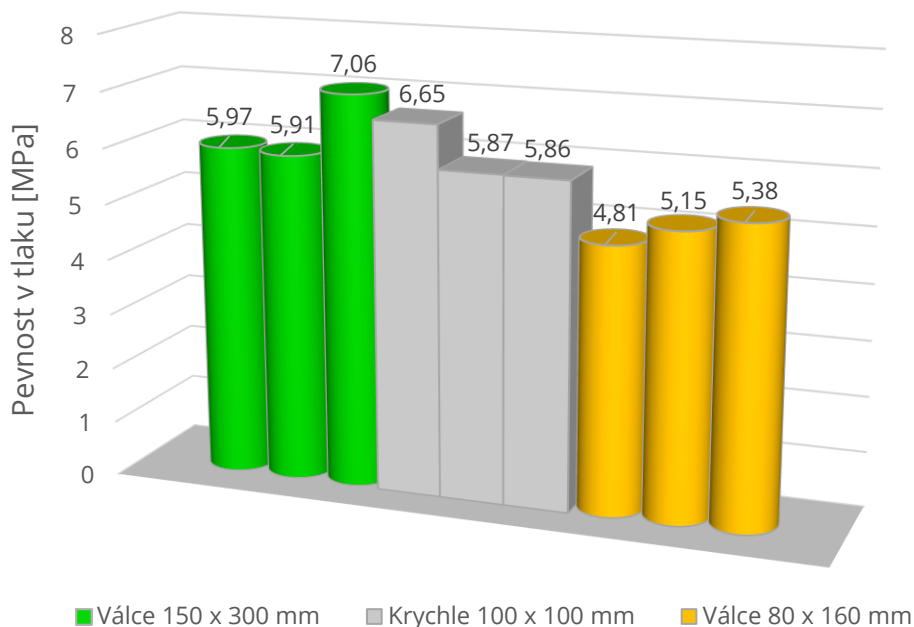
Graf 14: Porovnání výsledků tlakové zkoušky s bakalářskou prací (oblast Dolní Těrlicko)

Na výsledcích tlakové zkoušky je vidět diametrální rozdíl v dosažených pevnostech, který je způsoben pouze správnou úpravou hliněné směsi a dostatečným zhutněním zkušebního tělesa.

V poslední fázi I. Etapy bylo následně ještě provedeno porovnání výsledných pevností všech tří testovaných zkušebních těles (krychle 100×100×100 mm, válec 150×300 mm a válec 80×160 mm). Porovnání bylo provedeno na ekonomické variantě hliněné směsi z oblasti Dolní Těrlicko. Výsledné hodnoty jsou vidět v tabulce č. 7 a na grafu č. 15.

Tabulka 7: Výsledné pevnosti 3 typů testovaných zkušebních těles (oblast Dolní Těrlicko)

Krychle 100×100×100 mm (Dolní Těrlicko)		
Ozn.	Pevnost v tlaku σ [MPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
1	6,65	2120
2	5,87	2140
3	5,86	2130
$\bar{\sigma}$	6,13	2130
Válce 150×300 mm (Dolní Těrlicko)		
Ozn.	Pevnost v tlaku σ [MPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
1	5,97	2210
2	5,91	2220
3	7,06	2200
$\bar{\sigma}$	6,31	2210
Válce 80×160 mm (Dolní Těrlicko)		
Ozn.	Pevnost v tlaku σ [MPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
1	4,81	2180
2	5,15	2190
3	5,38	2190
$\bar{\sigma}$	5,11	2190



Graf 15: Porovnání výsledných pevností 3 typů zkušebních těles na hliněné směsi z oblasti Dolní Těrlicko

7.5 III. Etapa – optimalizace návrhu metodiky výroby zkušebních těles pro tlakovou zkoušku

7.5.1 Redukce tvaru zkušebního tělesa

Na základě výsledků z předešlé etapy, kde byly porovnány výsledné pevnosti všech tří variant zkušebních těles, byla vybrána, jako nejvhodnější varianta pro následující testování, varianta válce o rozměrech 80×160 mm, a to hned z několika důvodů. Tím prvním důvodem byla časová úspora při výrobě zkušebního tělesa v porovnání s válcem o rozměrech 150×300 mm, kde byla doba výroby zkrácena z původních 45 minut přibližně o 2/3, tj. na 15 minut. Druhým důvodem bylo na základě dosažených pevností, přiklonění se na co nejvíc bezpečnou stranu, kde válce 80×160 mm dosahují nejmenších výsledných pevností (graf. č. 15). Varianta krychle 100×100×100 mm nebyla zvolena z důvodu obtížnějšího zhutnění hran zkušebního tělesa, které po odformování vykazovaly známky drolení.

7.5.2 Návrh nových hutnicích forem

Z důvodu obtížného odformování zkušebního tělesa válce 80×160 mm v rámci II. Etapy, kde se zkušební tělesa v některých případech vůbec nepodařilo dostat ven (obrázek č. 38) a musela tak být z formy odstraněna a opakovaně vyráběna, bylo nezbytné navrhnout a následně vyrobít odpovídající formy pro zvolený typ zkušebního tělesa.



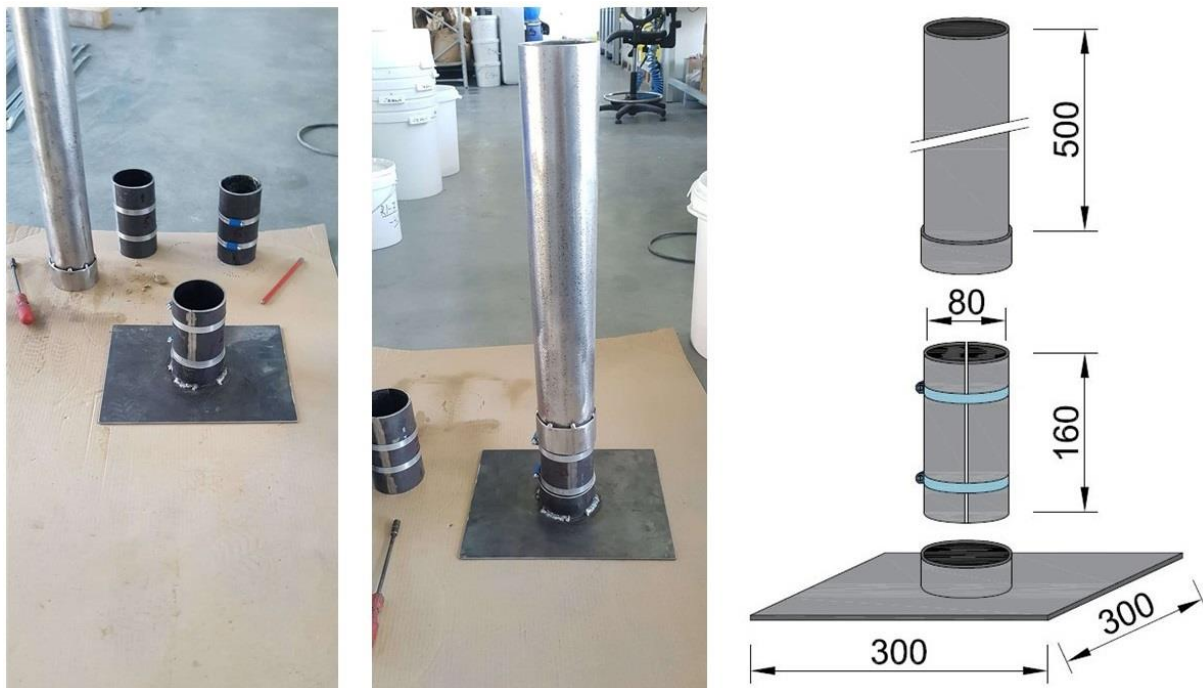
Obrázek 38: Příklad nezdařeného odformování zkušebního tělesa

Na základě těchto zjištěných skutečností byly navrženy a vyrobeny formy, ve kterých byla následná výroba zkušebních těles značně usnadněna. Nové formy byly vyrobeny z původně použitých bezešvých ocelových trubek o vnitřním průměru 80 mm, které byly podélně rozříznuty na dvě půlky. Následně byl vnitřní povrch trubky vyleštěn, aby se minimalizovalo přilepení zkušebního tělesa ke stěnám nové formy. Dále byl na hranu vzniklého řezu zpětně přivařen ocelový proužek o tloušťce 2 mm, z důvodu úbytku materiálu vlivem řezu, tak aby byl zpětně zajištěn vnitřní průměr trubky 80 mm (obrázek č. 39). Obě dvě půlky byly následně spojeny odnímatelnými šroubovacími sponami. Celkově bylo tímto způsobem vyrobeno 9 kusů forem.



Obrázek 39: Příklad vyrobené nové formy pro zkušební těleso válec 80×160 mm

Zároveň byl k formám vyroben i podstavec pro lepší uchycení formy a vodící trubka pro proctorovo dusadlo (4,5 kg), která usnadnila proces samotného hutnění. Spolu dohromady tak vznikl nový hutnicí přístroj navržený přímo pro výrobu zkušebních těles válce o rozměrech 80×160 mm. Ukázkou nového hutnicího přístroje můžete vidět na obrázku č. 40.



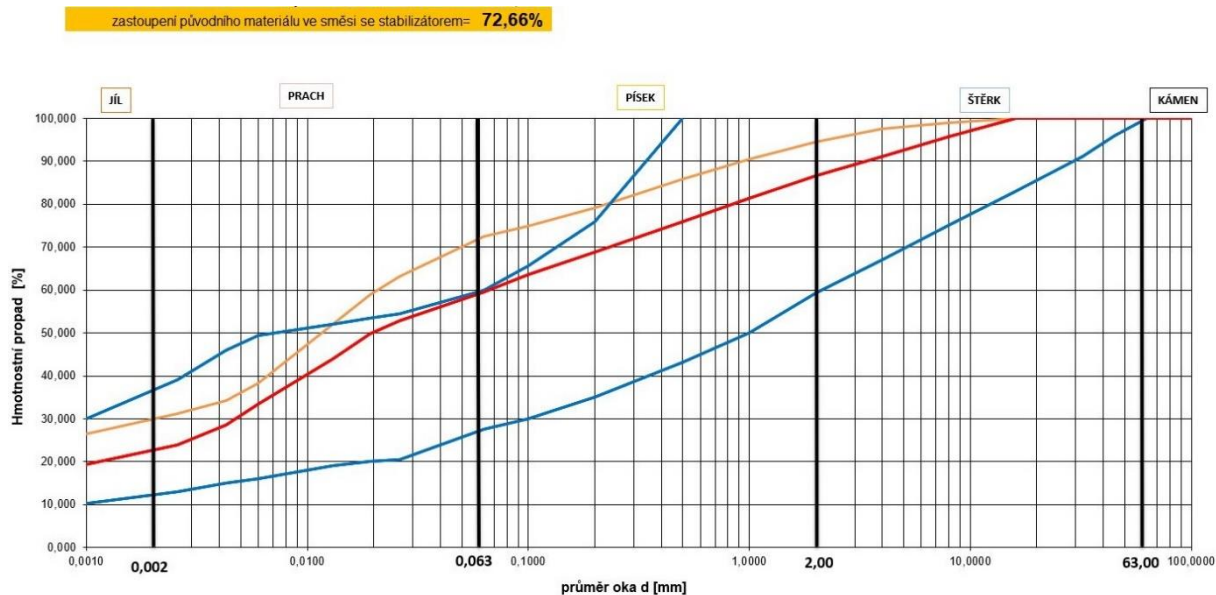
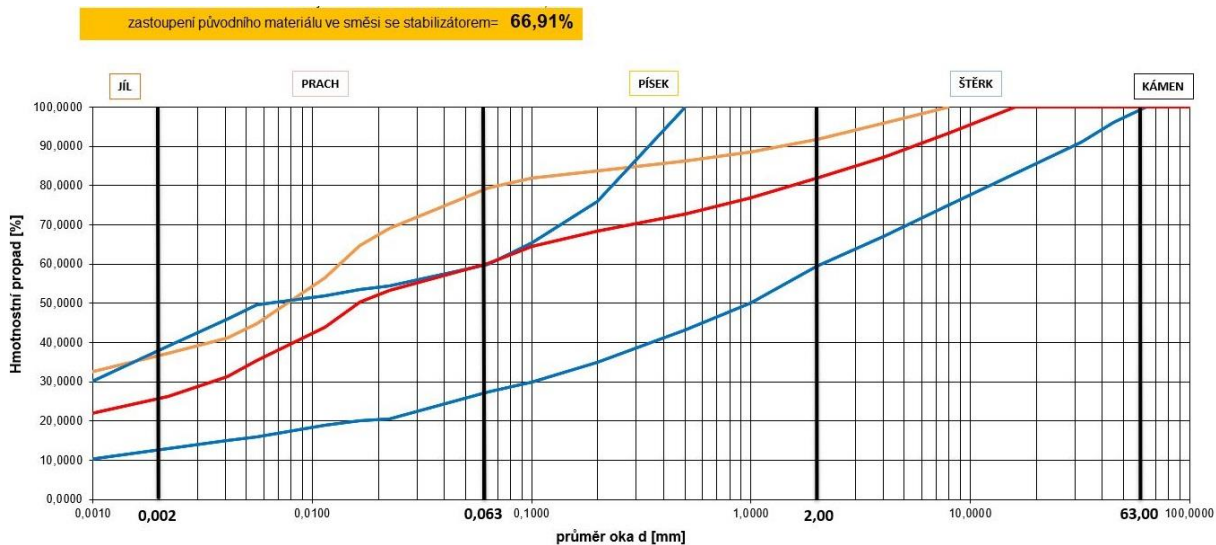
Obrázek 40: Nový hutnicí přístroj pro výrobu zkušebních těles válce 80×160 mm

7.5.3 Popis výroby zkušebních těles v nových formách

V rámci III. Etapy byly v první fázi navrženy hliněné směsi pro zbylé testované lokality (Dolany a Valchov). Z navržených hliněných směrů byly následně vyrobeny 3 zkušební tělesa od každé varianty, pomocí nově vyrobeného hutnicího přístroje v rámci této etapy.

7.5.3.1 Návrh hliněných směrů

Z poznatků vyplývajících z II. Etapy byly pro zbylé dvě lokality (Dolany a Valchov) navrženy ekonomické varianty, stejně jako v případě lokality Dolní Těrlicko. V obou případech tedy byla snaha navrhnout křivku zrnitosti co nejbliže horní mezi, aby bylo zajištěno využití co největšího podílu původního materiálu. Navržené křivky hliněných směrů vidíme na grafech č. 16 a 17. Ve všech navržených hliněných směsích bylo použito 7 % zastoupení cementu. V případě Dolan můžeme vidět zastoupení původního materiálu téměř 67 % a v případě Valchova dokonce 73 %.



7.5.3.2 Výroba zkušebních těles válce 80×160 mm

Výroba zkušebních těles byla provedena pomocí nového hutnického přístroje. V první řadě byla smontovaná forma vystříkána silikonovým sprejem (zamezení přilepení zkušebního tělesa ke stěně formy) a vložena do podstavce, aby byla zajištěna její stabilita během procesů hutnění. Dále byla do takto upevněné formy vsypána navržená hliněná směs. Následně byla na formu nasazena vodící trubka, kterou bylo pouštěno proctorovo

dusadlo (4,5 kg) v procesu hutnění. Hutní proces probíhal obdobně jako při výrobě zkušebních těles v rámci II. Etapy. Tedy hutnění každé vrstvy 10 rázy proctorova dusadla, které dopadalo volným pádem na hutněnou vrstvu z výšky 50 cm. Celé zkušební těleso se skládalo přibližně ze 4 – 5 takto zhutněných vrstev.

Celkově bylo vyrobeno 9 zkušebních těles (obrázek č. 41), od každé lokality 3 referenční zkušební tělesa. Po odformování byla tělesa uložena v podmínkách (23 ± 2) °C teploty a (80 ± 5) % relativní vlhkosti. Podmínky se zvýšenou vlhkostí byly zvoleny z důvodů podpoření lepší hydratace cementu, kde zkušební tělesa zrála po dobu 28 dní, stejně jako v předchozí etapě.



Obrázek 41: Vyrobena zkušební tělesa v rámci III. Etapy

7.5.4 Výsledky tlakových zkoušek II. sady zkušebních těles

V rámci III. Etapy byla všechna vyrobená zkušební tělesa po vyzrání (28 dní) otestována na pevnost v tlaku.

Před samotnou zkouškou pevnosti v tlaku byla nejprve všechna zkušební tělesa přeměřena a zvážena, jak můžeme vidět v přehledné tabulce č. 8.

Tabulka 8: Parametry zkušebních těles v rámci III. Etapy

Označení zkušebního tělesa	Průměr [mm]	Výška [mm]	Váha [kg]
Valchov			
V1	81,74	166,04	1,86
V2	81,62	165,71	1,87
V3	81,66	166,30	1,90
Dolany			
D1	80,80	165,46	1,86
D2	81,07	163,77	1,84
D3	81,00	164,69	1,85
Dolní Těrlicko			
T1	81,17	167,41	1,89
T2	81,15	165,61	1,88
T3	81,17	166,45	1,89

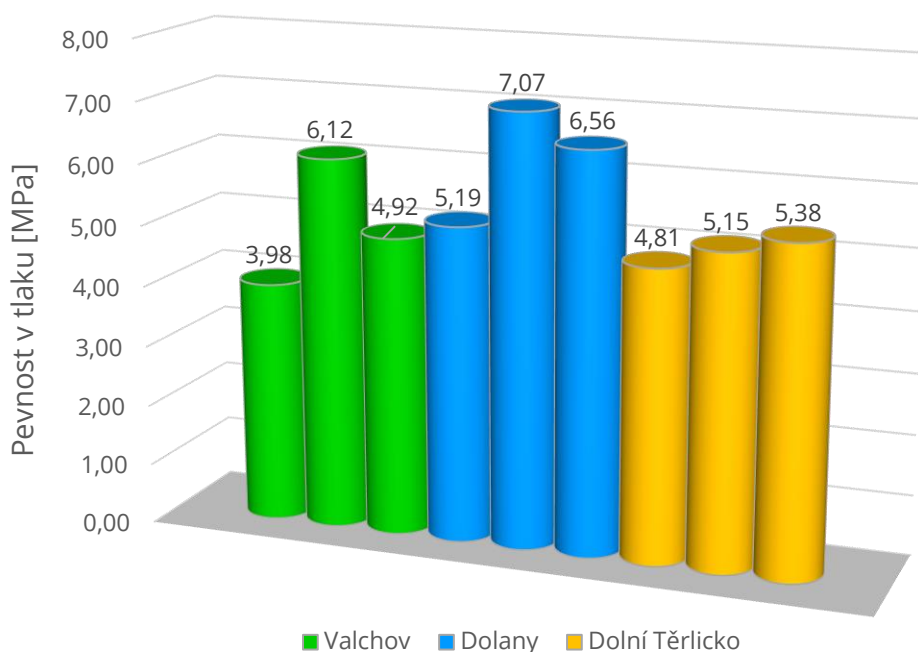
Po změření a zvážení byla zkušební tělesa převezena ke zkušebnímu laboratornímu lisu, kde následně proběhla zkouška na zjištění pevnosti v prostém tlaku. Každé zkušební těleso bylo jednotlivě uloženo do lisu a bylo rovnoměrně zatěžováno konstantní rychlostí $0,2 \text{ N/mm}^2$ za minut až do jeho porušení, stejným způsobem jako v rámci II. Etapy.

Vypočtené výsledné pevnosti byly poté zpracovány do tabulky č. 9 a následně graficky porovnány v grafu č. 18.

Tabulka 9: Výsledné pevnosti testovaných těles v rámci III. Etapy

Valchov		
Ozn.	Pevnost v tlaku σ [MPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
1	3,98	2140
2	6,12	2150
3	4,92	2180
$\bar{\sigma}$	5,01	2160
Dolany		
Ozn.	Pevnost v tlaku σ [MPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
1	5,19	2200
2	7,07	2170

3	6,56	2180
∅=	6,27	2180
Dolní Těrlicko		
Ozn.	Pevnost v tlaku σ [MPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
1	4,81	2180
2	5,15	2190
3	5,38	2190
∅=	5,11	2190



Graf 18: Výsledky 3 lokalit testovaných hliněných směsí (válec 80×160 mm)

7.6 IV. Etapa - další prováděné zkoušky na testovaném materiálu

V rámci poslední IV. Etapy byla v první fázi vyrobena zkušební tělesa odpovídající prováděným zkouškám popsaným níže. Všechna zkušební tělesa byla vyrobena z navržených hliněných směsí 3 lokalit (Dolany, Valchov a Dolní Těrlicko) popsaných v předcházejících kapitolách. Pro zkoušku stanovení součinitele tepelné vodivosti (λ) a odolnosti proti vodě byla vyrobena zkušební tělesa tvaru krychle o rozměrech

100×100×100 mm. Pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu byla vyrobena zkušební tělesa tvaru trámeček o rozměrech 40×40×160 mm. Pro každou zkoušku byly vyrobeny 3 ks zkušebního tělesa pro každou lokalitu. Celkově tedy bylo vyrobeno 18 ks krychle 100×100×100 mm a 9 ks trámečku 40×40×160 mm.

Po odformování byla tělesa uložena do podmínek $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ teploty a $(80 \pm 5) \%$ relativní vlhkosti. Podmínky se zvýšenou vlhkostí byly zvoleny z důvodů podpoření lepší hydratace cementu, kde zkušební tělesa zrála po dobu 28 dní, stejně jako v předchozích etapách (obrázek č. 42).



Obrázek 42: Vyrobená zkušební tělesa ve formách (vlevo), odformovaná zkušební tělesa (uprostřed) a uložení zkušebních těles (vpravo)

7.6.1 Pevnost v tahu za ohybu

Metoda pevnosti v tahu za ohybu byla určena na zkušebních trámečkách o rozměrech 40×40×160 mm obdobně jako u testování cementových směsí. Zkušební tělesa byla zkoušena na zkušebním stroji s parametry uvedenými v normě ČSN EN 196-1. Trámečky byly jednotlivě uloženy do zkušebního lisu na boční stranu (kolmo na směr hutnění) na válcové podpory, jak můžeme vidět na schématu č. 7.

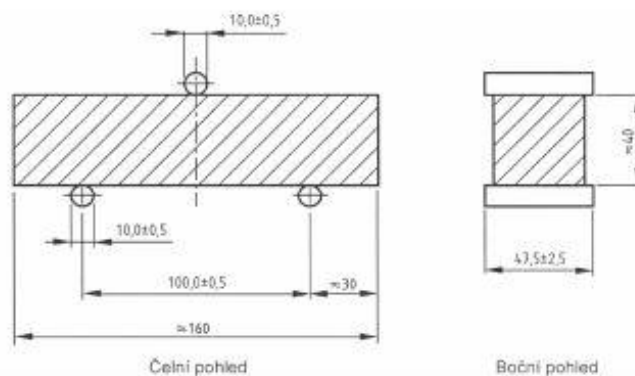


Schéma 7: Schéma uložení trámečku do trojosého zkušebního lisu

Dolní podpory jsou od sebe osově vzdáleny 100 mm a horní zatěžovací váleček působí uprostřed podpor. Zatěžování bylo provedeno rovnoměrnou rychlostí 50 ± 10 N/s až do zlomení trámečku (obrázek č. 43). Síla zatížení při zlomení se zaznamenala a výsledná hodnota byla stanovena aritmetickým průměrem ze tří hodnot vypočtených dle vztahu:

$$R_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}]$$

F – síla zatížení při zlomení [N]

l – vzdálenost mezi podporami [mm]

b – šířka čtvercového průřezu trámečku [mm]

h – výška čtvercové průřezu trámečku [mm]



Obrázek 43: Příklady testovaných zkušebních trámečků

Tabulka 10: Výsledky pevností v tahu za ohybu testovaných zkušebních trámečků

Označení zkušebního tělesa	Váha [kg]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Pevnost v tahu za ohybu R_f [MPa]	σ [MPa]
Valchov				
V1	0,566	1810	0,21	0,20
V2	0,558	2110	0,23	
V3	0,562	2100	0,17	
Dolany				
D1	0,551	2080	0,16	0,16
D2	0,552	2100	0,16	
D3	0,539	2090	0,16	
Dolní Těrlicko				
T1	0,557	2030	0,20	0,17
T2	0,562	2100	0,18	
T3	0,573	2090	0,14	

Výsledné pevnosti v tahu za ohybu znázorněné v tabulce č. 10 ukazují, že tahová pevnost hliněných směsí je podle očekávání výrazně nízká. Ovšem na obrázku č. 43 je patrné, že některé zkušební trámečky zůstaly po provedení zkoušky v kuse bez celkového rozlomení. Tudíž lze konstatovat, že navržené hliněné směsi vykazují nepatrné známky vaznosti hliněného materiálu.

7.6.2 Odolnost proti vodě

Pro otestování navržených hliněných směsí na odolnost proti vodě byla vymyšlena alternativní zkouška, kde byla zkušební tělesa (krychle 100×100×100 mm) uložena do stojaté vody hloubky 2 cm (obrázek č. 44). Zkušební tělesa byla následně vizuálně kontrolována po 24, 48 a 72 hodinách stání ve vodě.



Obrázek 44: Uložení zkušebních těles do stojaté vody hloubky 2 cm

Po 24 hodinách ve vodě nebyla na vzorcích patrná žádná mechanická poškození. Bylo zaznamenáno pouze nasáknutí vody do zkušebních těles (obrázek č. 45), ale ani na dotek nejevila zkušební tělesa známky změknutí či rozpadu.



Obrázek 45: Vizuální prohlídka zkušebních těles po 24 hodinách

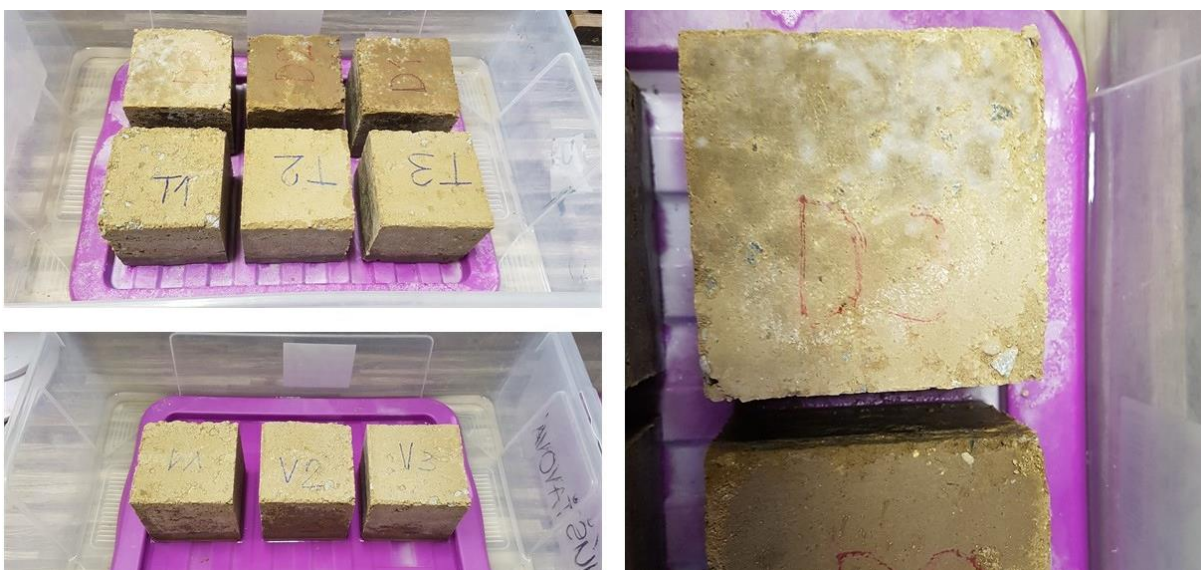
Ani po 48 hodinách nebyly zaznamenány žádné známky mechanického poškození či rozpadu zkušebních těles. Povrch těles byl stále na dotek tvrdý. Na obrázku č. 46 je akorát možno vidět zvětšení míry nasáknutí vody do zkušebních těles.



Obrázek 46: Vizuální prohlídka zkušebních těles po 48 hodinách

Po uplynutí 72 hodin opět nebyly patrné žádné známky mechanického poškození či změknutí povrchu tělesa a lze tedy předpokládat, že cement (7 %) obsažený v hliněných směsích, má kladné účinky, kterými přispívá k celkové odolnosti proti vodě.

Na základě vývoje této alternativní zkoušky byly vzorky ponechány ve vodě po dobu dalších 12 dní a výsledný stav zkušebních těles po celkově 15 dnech ve vodě můžeme vidět na obrázku č. 47.



Obrázek 47: Vizuální prohlídka zkušebních těles po 15 dnech

Z obrázku č. 47 je patrné, že téměř veškerá voda v kádi byla vsáknuta do zkušebních těles. Dále je na některých zkušebních tělesech vidět začínající povrchová plíseň. Přesto, ale všechna zkušební tělesa stále nejevila žádné známky mechanického poškození nebo deformace, a proto byla podrobena tlakové zkoušce v lisu (obrázek č. 48), aby byla zjištěna jejich pevnost v nasáklém stavu.



Obrázek 48: Příklady porušení nasáklých zkušebních těles při provádění zkoušky pevnosti v prostém tlaku

Před samotným testováním se všechna zkušební tělesa nejprve změřila a zvážila pro stanovení objemových hmotností. Výsledky tlakové zkoušky nasáklých zkušebních těles, můžeme vidět v tabulce č. 11.

Tabulka 11: Výsledky tlakové zkoušky nasáklých zkušebních těles krychle 100×100×100 mm

Označení zkušebního tělesa	Váha [kg]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Pevnost v tlaku σ [MPa]	\emptyset [MPa]
Valchov				
V1	2,213	2190	5,36	5,68
V2	2,289	2140	4,34	
V3	2,213	2170	7,34	

Dolany				
D1	2,169	2150	5,35	5,16
D2	2,145	2120	3,89	
D3	2,210	2160	6,24	
Dolní Těrlicko				
T1	2,077	2050	8,70	8,57
T2	2,144	2040	8,18	
T3	2,134	2100	8,83	

Z dosažených výsledků lze vidět, že pevnosti nasáklých zkušebních těles po 15 dnech ve vodě, stále dosahují dostatečných pevností a tím pádem jsou navržené hliněné směsi odolné proti vodě. Tohle zjištění je pravděpodobně zapříčiněno vlastnostmi cementu obsaženého v hliněných směsích, u kterého je vidět i po uplynutí 28 dní stále probíhající nárůst pevnosti.

7.6.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti – λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] byl stanoven měřením pomocí přístroje ISOMET 2114 od společnosti Applied Precision, jak můžeme vidět na obrázku č. 49. Tento přístroj používá k měření dynamickou (nestacionární) metodu, která umožňuje kratší dobu měření ve srovnání se stacionárními metodami měření. Pro testování byla použita zkušební tělesa krychle 100×100×100 mm, která po 28 dnech zrání v podmínkách (23 ± 2) °C teploty a (80 ± 5) % relativní vlhkosti, byla uložena dalších 14 dní v běžných laboratorních podmínkách (23 ± 2 °C teploty a 50 ± 5 % relativní vlhkosti) tak, aby jejich stav, co nejvíce odpovídal podmínkám po zabudování do stavby. Po provedení měření součinitele tepelné vodivosti – λ byla všechna zkušební tělesa změřena, zvážena a následně vysušena do ustálené hmotnosti, z důvodu zjištění obsahu vlhkosti ve zkušebních

tělesech, při kterém byl součinitel tepelné vodivosti stanoven. Výsledky dosažených hodnot jsou zpracovány v tabulce č. 12.



Obrázek 49: Měření součinitele tepelné vodivosti – λ pomocí přístroje ISOMET 2114

Tabulka 12: Výsledky zkoušky stanovení součinitele tepelné vodivosti – λ

Označení zkušebního tělesa	Obsažená vlhkost [%]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	$\bar{\lambda}$ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Valchov				
V1	3,39	2040	1,617	1,547
V2	3,48	2050	1,539	
V3	3,64	1990	1,484	
Dolany				
D1	3,72	1940	1,020	1,165
D2	3,71	2000	1,170	
D3	3,61	1900	1,125	

Dolní Těrlicko				
T1	3,83	2070	1,360	1,357
T2	3,87	2060	1,365	
T3	4,04	2060	1,345	

Výsledky měření součinitele tepelné vodivosti ukázaly, že v porovnání s podobnými produkty, které jsou k dostání na trhu (nepálená cihla HELUZ NATURE ENERGY a hliněné stavební desky Lemix), které mají součinitel tepelné vodivosti (λ) $0,742 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ respektive $0,353 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, jsou naměřené hodnoty testovaných hliněných směsí výrazně vyšší. To může být zapříčiněno především kamenivem, které je v hliněných směsích obsaženo. Dále byl ve zkušebních tělesech zjištěn obsah vlhkosti cca 3,5 %, což je dle normy ČSN P 73 0610 nízký stupeň vlhkosti (3,0 – 5,0 %).

7.6.4 Požární odolnost

V rámci diplomové práce nebyly na testovaných hliněných směsích provedeny zkoušky na požární odolnost, z důvodů časové, a především finanční náročnosti. Avšak ze složení navržených hliněných směsí, které by neměly obsahovat organický hořlavý materiál, lze usuzovat, že požární odolnost bude podobná jako u nepálených cihel, které mají certifikované zkoušky požárně bezpečnostní odolnosti. Příkladem může být firma HELUZ, která má ve své nabídce nepálené cihelné bloky HELUZ NATURE ENERGY, které dle technického listu splňují požární odolnost (ČSN EN 1996-1-2) EI 15 a třídu reakce na oheň A1 (nehořlavé) [27]. Dalším příkladem mohou být hliněné stavební desky od firmy Lemix, které také dle technického listu splňují třídu reakce na oheň A1 (nehořlavé) [28].

8 LEGISLATIVNÍ PROCES POVOLENÍ STAVBY Z DUSANÉ HLÍNY

V současné době neexistuje v České republice pevně daný legislativní proces, jak povolit stavbu z dusané hlíny, a to může vést k dosti problematickému vyjednávání s příslušnými stavebními úřady. Tím nejzásadnějším problémem je chybějící normová základna, která by jednotně popisovala a určovala, jak provádět konstrukce z dusané hlíny, aby byly zajištěny jejich základní požadavky především z hlediska bezpečnosti. Avšak i na základě těchto zjištěných faktů, existují v České republice stavby z dusané hlíny, které prošly řádným stavebním řízením a získaly povolení ke stavbě. Jak takové povolení získat bude popsáno v následujících odstavcích.

V první řadě zde musí být vyjasněno, co je to vlastně samotná stavba. Dle stavebního zákona (183/2006 Sb.) je v § 2 odstavci (3) stavba definována takto:

„Stavbou se rozumí veškerá stavební díla, která vznikají stavební nebo montážní technologií, bez zřetele na jejich stavebně technické provedení, použité stavební výrobky, materiály a konstrukce, na účel využití a dobu trvání.“ [29]

Z této definice tedy zcela očekávaně vyplývá, že i konstrukce z dusané hlíny, dle platné legislativy České republiky, spadají pod pojem stavba.

Dalším a asi tím nejdůležitějším paragrafem je poté § 156 stavebního zákona (183/2006 Sb.), který ukládá požadavky na stavby. Tento paragraf je rozdělen do dvou odstavců, které zní:

- (1) *„Pro stavbu mohou být navrženy a použity jen takové výrobky, materiály a konstrukce, jejichž vlastnosti z hlediska způsobilosti stavby pro navržený účel zaručují, že stavba při správném provedení a běžné údržbě po dobu předpokládané existence splní základní požadavky na stavby.“*
- (2) *„Výrobky pro stavbu, které mají rozhodující význam pro výslednou kvalitu stavby a představují zvýšenou míru ohrožení oprávněných zájmů, jsou stanoveny a posuzovány podle zvláštních právních předpisů.“ [29]*

Paragraf § 156 dále odkazuje na dokumenty, které přesněji upravují požadavky na stavby. Těmi dokumenty jsou:

- nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 ze dne 9. března 2011, kterým se stanoví harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na trh a kterým se zrušuje směrnice Rady 89/106/EHS;
- zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů;
- nařízení vlády č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky.

V minulosti k těmto dokumentům patřily ještě nařízení vlády č. 190/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na stavební výrobky označované CE, ve znění nařízení vlády č. 251/2003 Sb. a nařízení vlády č. 128/2004 Sb. Tyto dokumenty jsou však v současné době zrušeny a nahrazuje je výše zmíněné nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011.

Z § 156 stavebního zákona (183/2006 Sb.) tedy vyplývá, že stavební zákon neurčuje, z kterých materiálů se smí nebo nesmí stavět, ale pouze stanovuje základní požadavky a vlastnosti, které tento materiál musí splňovat.

Po konzultaci této problematiky se stavebním úřadem Brno – Židenice, bylo zjištěno, že zásadním dokumentem pro úředníka, který by povoloval stavbu z dusané hlíny, je certifikát materiálu, který by prokazoval a dokládal, že materiál (dusaná hlína) splňuje základní požadavky a vlastnosti stanovené zákonem a je tedy možné tento materiál použít pro stavbu konstrukcí z dusané hlíny. Po získání a doložení takového certifikátu k projektu navrhované stavby, nemůže žádný úředník stavebního úřadu z legislativního hlediska povolení takového typu stavby zamítnout.

Certifikáty tohoto typu vydávají specializované ústavy, jako např. Technický a zkušební ústav stavební Praha (TZÚS), se kterým bylo započato jednání ohledně certifikace navržených hliněných směsí v rámci této diplomové práce. Avšak získání takového certifikátu může být finančně nákladné a nelze předpokládat, že by v běžné praxi každý sta-

vebník, mající zájem postavit si rodinný dům z dusané hlíny, získával a následně dokládal certifikaci hliněné směsi navržené pro konkrétní stavbu. Z tohoto důvodu bylo navrženo, že by byla vytvořena „základní“ certifikace, která by hromadně určovala, jaké složky a v jakém množství by musely být v navrhované hliněné směsi obsaženy, aby byly zajištěny minimální požadované vlastnosti pro použití na stavbu z dusané hlíny. Tenhle návrh je ovšem v současné době pouze teoretický a nebude v rámci diplomové práce dále rozvíjen.

Praxe ukázala, že u povolených staveb majících konstrukce z dusané hlíny, byl pro úředníky nejdůležitějším dokumentem statický posudek, který prokazoval, že je navržená stavba dostatečně pevná a únosná. Celkově může stavebníkům pomoci s otázkou, jak se v této problematice orientovat a jak správně provést přípravu a zpracování projektu pro konstrukce z dusané hlíny, aby došlo k jejich povolení, Sdružení hliněného stavitelství z. s. se sídlem v Brně, které nabízí konzultační a poradenské služby na základě dlouholetých zkušeností s hliněným stavitelstvím. Dále sdružení nabízí možnost absolvování akreditovaných rekvalifikačních kurzů pro zhotovitele hliněných staveb, které lze zakončit kvalifikační zkouškou, pro které je autorizujícím orgánem MPO (Ministerstvo průmyslu a obchodu). Na základě obdrženého certifikátu o úspěšně absolvované zkoušce, existuje poté možnost založení si živnosti pro provádění hliněných staveb [30].

9 DOPORUČENÍ PRO STAVEBNÍ PRAXI

Během vypracovávání této diplomové práce bylo prostudováno mnoho tuzemských, a především zahraničních zdrojů, zabývajících se problematikou stavby rodinných domů pomocí technologie dusané hlíny.

Na základě získaných informací z odborné literatury, byl v rámci experimentální části vytvořen excelový výpočetní model, s jehož pomocí lze efektivně navrhovat finální složení hliněných směsí určených pro stavbu dusaných konstrukcí. Tento model by při aplikaci v běžné stavební praxi mohl výrazně usnadnit a urychlit práci před začátkem samotné výstavby.

Zároveň v souvislosti s tímto modelem byla navržena funkční metodika pro výrobu zkušebních těles pro stanovení pevnosti v tlaku, podle níž lze vyrobit zkušební tělesa přímo na stavbě. V rámci studia zahraniční literatury byl nalezen výzkum, který porovnával výsledné pevnosti totožných zkušebních těles z dusané hlíny, získaných pomocí prosté tlakové zkoušky v laboratoři a pomocí tvrdoměrné zkoušky Schmidtovým odrazovým tvrdoměrem. Dle výsledků této studie bylo zjištěno, že rozdíl mezi výslednými pevnostmi obou výše zmíněných zkoušek byl menší jak 5 %. Na základě tohoto zjištění by se tedy v odůvodněných případech mohlo uvažovat o testování zkušebních těles přímo na stavbě právě pomocí Schmidtova tvrdoměru. Celý proces stanovení pevnosti v tlaku navržené hliněné směsi zjištěný přímo na stavbě by umožnil časové i finanční úspory. Tento způsob stanovení pevností však nebyl náplní diplomové práce a proto nebyl prakticky ověřen. Na základě dosažených výsledků lze tedy pro konečné testování parametrů vyrobených zkušebních těles doporučit variantu laboratorních zkoušek v lisu, u kterých je zaručena přesnost získaných výsledků.

10 SHRNU TÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

V rámci experimentální části byl v první etapě navrhnout výpočetní model v Excelu, s jehož pomocí lze optimalizovat složení hliněných směsí určených ke stavbě konstrukcí pomocí technologie dusané hlíny. Dále byly odebrány vzorky ze tří konkrétních lokalit (Dolany, Valchov a Dolní Těrlicko), kde by měly být zhotoveny stavby pomocí technologie dusané hlíny. Pomocí navrženého výpočetního modelu byly následně navrženy hliněné směsi pro všechny tři lokality.

V rámci druhé etapy byla navržena metodika pro výrobu zkušebních těles pro tlakovou zkoušku. V první fázi této etapy byly všechny testy prováděny jenom na hliněných směsích z oblasti Dolní Těrlicko. Testovaly se 2 varianty hliněných směsí, a to konkrétně „základní“ varianta, která obsahovala výpočtově ideální poměr všech príměsí a „ekonomická“ varianta, která obsahovala co největší možné zastoupení původního materiálu (hlíny). Zároveň se v této etapě testovaly i 3 druhy zkušebních těles, kterými byly krychle 100×100×100 mm, válec 150×300 mm a válec 80×160 mm. Všechna zkušební tělesa byla následně vyrobena pomocí navržené metodiky, kde se těleso hutní po vrstvách do příslušné formy pomocí Proctorova dusadla (4,5 kg), které svojí konstrukcí zajišťuje zachování stejné výšky, ze které dusadlo dopadá na hutněnou vrstvu (500 mm). V případě krychle 100×100×100 mm a válce 80×160 mm byla každá vrstva hutněna 10 rázy dusadlem a celé těleso se skládalo ze 4 – 5 vrstev. V případě zkušebního tělesa válce 150×300 mm z důvodu velikosti, byla každá vrstva hutněna 20 rázy dusadlem a celé těleso se skládalo z 8 – 9 vrstev. Celkově takto byla vyrobena tři zkušební tělesa od každé varianty, která byla po odformování uložena v prostředí (23 ± 2) °C teploty a (80 ± 5) % relativní vlhkosti. Podmínky se zvýšenou vlhkostí byly zvoleny z důvodů podpoření lepší hydratace cementu, kde zkušební tělesa zrála po dobu 28 dní. Po 28 denním uložení byla všechna zkušební tělesa změřena, zvážena a následně podrobena tlakové zkoušce v lisu. Výsledné pevnosti, kterých bylo dosaženo, byly v rozmezí 5 – 8 MPa, což je pro stavbu rodinného domu dostačující.

V rámci třetí etapy byla provedena optimalizace navržené metodiky. Ta spočívala ve výběru vhodnější varianty hliněné směsi, kde na základě výsledků z předchozí etapy byla vybrána „ekonomická“ varianta, která sice nedosáhla maximálních dosažených pevností, ale v konečných výsledcích se svými hodnotami jevila jako vyrovnanější. Proto byly pro další dvě lokality (Dolany a Valchov) navrženy „ekonomické“ varianty hliněných směsí, kde bylo v případě Dolan procentuální zastoupení původního materiálu téměř 67 % a v případě Valchova dokonce 73 %. Dále byl v rámci optimalizace proveden výběr z testovaných zkušebních těles v předešlé etapě. Jako nejideálnější tvar zkušebního tělesa byl pro naše účely vybrán válec o rozměrech 80×160 mm. Vybrán byl z důvodů nejnižších dosažených pevností v rámci předešlé etapy, takže se v jeho případě přikláníme na nejvíce bezpečnou stranu a zároveň je díky jeho rozměrům výroba časově nejrychlejší. Časová úspora je v rámci této etapy také spojena s návrhem a výrobou nového hutnícího přístroje, společně i s novými formami odpovídající rozměrům válce 80×160 mm. Při použití tohoto přístroje výroba jednoho zkušebního tělesa zabere přibližně 15 minut. Oproti tomu výroba zkušebního tělesa válce 150×300 mm trvá přibližně 45 minut. Díky redukci velikosti zkušebního tělesa a výrobě nového hutnícího přístroje s formami se tedy výroba jednoho zkušebního tělesa (válec 80×160 mm) časově zkrátila přibližně o 2/3. Následně tedy byla v novém přístroji vyrobena 3 zkušební tělesa z „ekonomické“ varianty hliněné směsi z každé lokality, která opět byla po odformování uložena v prostředí (23 ± 2) °C teploty a (80 ± 5) % relativní vlhkosti, stejně jako v předešlé etapě. Výsledné pevnosti po 28 dnech byly v případě Valchova v průměru 5,0MPa, v případě Dolan 6,3 MPa a v případě Dolního Těrlicka 5,1 MPa. Ve všech třech lokalitách se výsledné pevnosti navržených hliněných směsí, ukázaly jako porovnatelné s pevnostmi, kterých dosahují například pórobetonové tvárnice od firmy YTONG (2 – 5 MPa) a tudíž lze předpokládat jejich vhodnost pro stavbu konstrukcí z dusané hlíny. Zároveň na stanovení těchto pevností bylo použito zkušební těleso vykazující nejnižší hodnoty (válec 80×160 mm) a lze tedy předpokládat, že ve větším měřítku dusaných stěn bude výsledná pevnost ještě o něco vyšší.

V rámci poslední čtvrté etapy byly provedeny další doplňující zkoušky, pro lepší znalost fyzikálně-mechanických vlastností navržených hliněných směsí. Jako první byla provedena zkouška pevnosti v tahu za ohybu, která byla otestována na trámečích 40×40×160 mm vyrobených z navržených hliněných směsí. Výsledné pevnosti byly ve všech případech téměř totožné (0,2 MPa). Výsledné pevnosti byly dle očekávání nízké, protože hliněné směsi neobsahují žádnou příměs či výztuž, která by pevnost v tahu za ohybu zvyšovala. Dále byla provedena alternativní zkouška odolnosti proti vodě, kde byla zkušební tělesa krychle 100×100×100 mm položena do 2 cm hluboké stojaté vody. Ani po uplynutí 72 hodiny nebyla na tělesech, kromě průsaku vody, patrná žádná vizuální poškození (rozpad, drobení). Na dotyk tělesa také nejevila žádné známky změknutí. Z těchto důvodů byla tělesa ve vodě ponechána dalších 12 dní. Po celkově 15 dnech ve vodě byla zkušební tělesa nasáklá vodou a u některých se dokonce vytvořila povrchová plíseň, ale stále nejevila žádné známky mechanického poškození či deformace. Z těchto důvodů byla zkušební tělesa podrobena tlakové zkoušce, aby byla zjištěna jejich tlaková pevnost v nasáklém stavu. Výsledky, kterých bylo dosaženo byly pozitivní. V případě Dolan byla průměrná pevnost v tlaku 5,2 MPa, v případě Valchova bylo v průměru dosaženo pevnosti 5,7 MPa a v případě Dolního Těrlicka byla průměrná pevnost dokonce 8,6 MPa. Výsledky této alternativní zkoušky tedy ukazují na odolnost proti vodě navržených hliněných směsí, která je pravděpodobně zapříčiněna příměsí cementu, který i po uplynutí 28 dní stále dokázal zvyšovat narůst pevnosti. Jako další byla na zkušebních tělesech krychle 100×100×100 mm provedena zkouška pro stanovení součinitele tepelné vodivosti – λ . Měření bylo provedeno pomocí přístroje ISOMET 2114. Výsledné součinitele tepelné vodivosti byly stanoveny aritmetickým průměrem ze tří naměřených hodnot, které byly v případě Valchova $1,547 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, v případě Dolan $1,165 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a v případě Dolního Těrlicka $1,357 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Aby s těmito součiniteli tepelné vodivosti vyhověla stěna normou požadovanému součiniteli prostupu tepla $U = 0,30 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$, musela by tloušťka stěny být v rozmezí 350 – 500 mm. Pro dosažení lepšího součinitele prostupu tepla (U), při zachování stejné nebo menší tloušťky stěny, mohla být stěna z vnější strany opatřena vhodnou tepelnou izolací. Jako vhodná by mohla být například tepelná izolace z konopného betonu, která by mohla v kombinaci s hliněnou dusanou

konstrukcí fungovat, protože také obsahuje přírodní materiál. Dále byl na testovaných zkušebních tělesech změřen obsah vlhkosti, při kterém byl stanoven součinitel tepelné vodivosti. Dle výsledků byl obsah vlhkosti ve zkušebních tělesech přibližně 3,5 %, což dle normy ČSN P 73 0610 řadí konstrukci do kategorie s nízkým obsahem vlhkosti. Jako poslední byly v rámci této etapy pouze nastudovány informace ohledně požární odolnosti, protože provedení těchto zkoušek je finančně velmi nákladné. Ale za předpokladu, že navržené hliněné směsi by neměly obsahovat organický hořlavý materiál, lze přirovnat jejich vlastnosti k nepáleným cihlám, které mají certifikovaně stanovené požárně bezpečnostní odolnosti. Příkladem může být firma HELUZ, která nabízí nepálené cihelné bloky HELUZ NATURE ENERGY, které dle technického listu splňují požární odolnost (ČSN EN 1996-1-2) EI 15 a třídu reakce na oheň A1(nehořlavé). Dále potom hliněné stavební desky od firmy Limex, které také dle technického listu jsou zařazeny do třídy reakce na oheň A1 (nehořlavé).

11 ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce byla shrnuta historie hliněného stavitelství, především co se týče historicky používaných technik pro stavbu hliněných domů. Dále byl v této kapitole popsán historický vývoj samotné technologie dusané hlíny. Po kapitole historie a vývoje hliněných staveb následuje kapitola trvale udržitelné výstavby. V kapitole byly popsány a vysvětleny základy této problematiky, která je v současnosti velmi aktuální. Dále se teoretická část práce zabývala popisem samotné technologie dusané hlíny společně s příklady již realizovaných staveb, jak na území České republiky, tak ve světě. Teoretickou část uzavírá kapitola zaměřena na způsoby testování fyzikálně-mechanických vlastností dusané hlíny v zahraničí.

Experimentální část diplomové práce byla rozdělena do 4 etap. První etapa se zabývala návrhem excelovského výpočetního modelu pro návrh hliněných směsí, s jehož pomocí byly následně navrženy hliněné směsi pro tři konkrétní testované lokality (Dolany, Valchov, Dolní Těrlicko).

V rámci druhé etapy byla navržena metodika pro výrobu zkušebních těles pro tlakovou zkoušku. Dále byly navrženy dvě varianty hliněných směsí (základní versus ekonomická) pro jednu testovanou lokalitu (Dolní Těrlicko) a byly vybrány tři tvary zkušebních těles (válec 150×300 mm, krychle 100×100×100 mm a válec 80×160 mm). Z navržených hliněných směsí byla následně dle navržené metodiky vyrobena zkušební, která se podrobila tlakové zkoušce.

Ve třetí etapě diplomové práce byla provedena optimalizace navržené metodiky. Na základě výsledků dosažených v předchozí etapě, byla vybrána vhodnější varianta hliněné směsi (ekonomická varianta) a byl vybrán nejvhodnější tvar zkušebního tělesa pro naše účely (válec 80×160 mm). Dále byl v rámci třetí etapy navržen a vyroben hutnicí přístroj, společně s novými formami, které odpovídaly rozměrům vybraného zkušebního tělesa (válec 80×160 mm). Pomocí tohoto přístroje byla následně vyrobena zkušební tělesa pro všechny tři testované lokality (Dolany, Valchov, Dolní Těrlicko). Na výrobu

všech zkušebních těles byla ve všech případech použita „ekonomická“ varianta hliněné směsi. Následně byla všechna zkušební tělesa opět podrobena tlakové zkoušce.

V rámci poslední čtvrté etapy byly provedeny další vybrané zkoušky pro rozsáhlejší znalost fyzikálně-mechanických vlastností navržených hliněných směsí.

Výsledky všech provedených zkoušek v rámci čtyř etap, společně s komentářem a odůvodněním, byly podrobně rozepsány v předchozí kapitole shrnutí a diskuze výsledků.

Na závěr experimentální části byla v práci rozebrána problematika legislativního procesu povolování staveb z dusané hlíny a bylo sepsáno doporučení pro stavební praxi.

Závěrem lze říci, že navržený výpočetní model v kombinaci s navrženou metodikou výroby zkušebních těles pro tlakovou zkoušku, svými výsledky prokázaly své kladné přínosy do problematiky hliněného stavitelství, především pro technologii dusané hlíny.

12 REJSTŘÍKY

12.1 Seznam použitých zdrojů

- [1] ŽABIČKOVÁ, Ivana. *Hliněné stavby*. 1. vyd. Brno: ERA group, 2002. ISBN 80-86517-21-7.
- [2] VONDRA, Nicol. Historie a současnost hliněného stavitelství - 1. část. *Ekostavivo* [online]. Znojmo: AKUMULÁTOR.digital, 2014 [cit. 2019-06-19]. Dostupné z: <http://www.ekostavivo.cz/historie-a-soucasnost-hlineneho-stavitelstvi-1-cast/>
- [3] Historie hliněných staveb. *CLAYGAR* [online]. Olomouc: CODE01, 2008 [cit. 2019-06-27]. Dostupné z: <http://www.claygar.cz/cz/historie-hlinenych-staveb>
- [4] Tradiční technologie. *Hlina* [online]. Brno: TOPlist.cz, 2014 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <http://www.hlina.info/cs/hlinene-stavitelstvi/hlina-stavebni-material/tradicni-technologie.html>
- [5] MINKE, Gernot. *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture*. 2nd and rev. ed. Boston: Birkhauser-Publishers for Architecture, 2006. ISBN 978-376-4374-778.
- [6] HELÁN VAŠKŮ, Kateřina. Nejstarší civilizace světa (2): Tajemství měsíčního města Jericha. *100+1* [online]. 2018, **2018** [cit. 2019-06-27]. ISSN 1804-9907. Dostupné z: <https://www.stoplusjednicka.cz/nejstarsi-civilizace-sveta-2-tajemstvi-mesicniho-mesta-jericha>
- [7] JAQUIN, P. A., C. E. AUGARDE a C. M. GERRARD. Chronological Description of the Spatial Development of Rammed Earth Techniques. *International journal of architectural heritage : conservation, analysis, and restoration* [online]. 2008, , 377-400 [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1080/15583050801958826>
- [8] *Zákon č. 17/1992 Sb.: o životním prostředí*. In: . Praha: Federativní shromáždění České a Slovenské Federativní Republiky, 1992, ročník 2017. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1992-17#f1401960>

- [9] BENTON, M. *When life nearly died: the greatest mass extinction of all time*. London: Thames & Hudson, 2003.
- [10] *It took Earth ten million years to recover from greatest mass extinction* [online]. ScienceDaily, b.r. [cit. 2019-09-08]. Dostupné z: <https://www.sciendaily.com/releases/2012/05/120527153810.htm>
- [11] KOLBERT, E. *The Sixth Extinction: An Unnatural History*. New York: Henry Holt & Company, 2014.
- [12] STRUHALA, Karel. *Přednášky z předmětu CH009 – Trvale udržitelná výstavba*. Brno, 2018. Dostupné také z: <https://uloz.to/file/9QDVjFGQcfJI/prednasky-trvale-udrzitelna-vystavba-struhala-zip>
- [13] Index lidského rozvoje. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2019 [cit. 2019-09-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Human_Development_Index
- [14] Global Footprint Network. *Global Footprint Network* [online]. Ženeva, 2003-2019 [cit. 2019-09-08]. Dostupné z: <http://data.footprintnetwork.org/#/>
- [15] *DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast): Official Journal of the European Union 153 (2010)*. In: . b.r.
- [16] Přehled indexu stavební výroby (objemu). *Europa.eu* [online]. b.r. [cit. 2019-09-08]. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Construction_production_\(volume\)_index_overview](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Construction_production_(volume)_index_overview)
- [17] Indoor generation tráví uvnitř budov až 90 % času. Kvalita vnitřního prostředí se však přehlíží. In: *EARCH*. [online]. Praha: (c) 2012 EARCH., 2018 [cit. 2019-11-14]. Dostupné z: <http://www.earch.cz/cs/revue/indoor-generation-travi-uvnitř-budov-az-90-casu-kvalita-vnitřního-prostředí-se-vsak-prehlizi>
- [18] Produkce, využití a odstranění odpadů - 2018. *ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD* [online]. b.r. [cit. 2019-11-14]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2018>

- [19] Veřejná databáze. ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD [online]. b.r. [cit. 2019-11-14]. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=home>
- [20] HAVLÍK, F. *Development and Experimental Verification of Mechanical-physical Properties of Pre-formed Rammed Earth Wall Panel*. Praha, 2017. Disertační práce. ČVUT Praha.
- [21] *European Commission – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability (2010) International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General Guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance*. In: . Luxembourg: Publications Office of the European Union, b.r.
- [22] *Přírodní materiály a nepálená hlína v novodobých i tradičních stavbách*. Projekt OP RLZ, Opatření 3.3., č. projektu CZ.04.1.03/3.3.11.3/3131, 2006–2008.
- [23] NOVOTNÝ, M. *Hliněné stavitelství na Moravě a evropské souvislosti: Kritický katalog k výstavě*. Strážnice, 2014. NULK Strážnice.
- [24] ŽABIČKOVÁ, Ivana. *Moderní konstrukce z dusané hlíny. IMateriály* [online]. Praha: © Business Media, s. r. o., 2014 [cit. 2019-10-16]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/technologie/moderni-konstrukce-z-dusane-hliny_47001.htm
- [25] *Rammed Earth House Rauch. EUMiesAward 19* [online]. Barcelona: Fundació Mies van der Rohe, 2019 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: <https://miesarch.com/work/2329>
- [26] *UK rammed earth guidelines, standards & resources. Rammed Earth Consulting* [online]. © Rammed Earth Consulting, b.r. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <http://rammedearthconsulting.com/rammedearth-ukstandards-guidelines.htm>
- [27] HELUZ NATURE Energy 12/25. *HELUZ* [online]. Xproduction, 2019 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.heluz.cz/cs/vyrobek/heluz-nature-energy-12-25-1>
- [28] *Hliněné desky Lemix. Lemix: Hliněná stěna pro zdravé klima* [online]. b.r. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://hlinene-desky.cz/>
- [29] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon č. 183/2006 Sb.: Zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon)*. In: . Sbírka zákonů České republiky, 2006, verze 24, č. 183. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-183#cast4>

- [30] Kvalifikační zkoušky. *Sdružení hliněného stavitelství* [online]. Brno: TOPlist.cz, 2004 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://www.hlina.info/cs/kurzy/kvalifikacni-zkousky.html>
- [31] Fascinující palác Potála: Podívejte se do stavby nad oblaky, jež má více než tisíc místností. In: *Cestovinky.cz* [online]. 2013 [cit. 2019-06-27]. Dostupné z: <https://www.cestovinky.cz/clanek/fascinujici-palac-potala-podivejte-se-do-stavby-nad-oblaky-jez-ma-vice-nez-tisic-mistnosti>
- [32] MINKE, Gernot a Hans-Peter SCHMIDT. How to Build an Earthquake Resistant Rammed Earth Home. *SLIMWALLET COMPANY* [online]. © 2019 Slim Wallet Company, 2016 [cit. 2019-10-09]. Dostupné z: <https://www.slimwallet.co/blogs/news/how-to-build>
- [33] Architektonický dialog se společností Herzog & de Meuron. *Ricola* [online]. Švýcarsko, b.r. [cit. 2019-10-16]. Dostupné z: <https://www.ricola.com/en/about-ricola/company/values/architecture>

12.2 Seznam obrázků

Obrázek 1: Zdivo z nepálených cihel spojených hliněnou maltou [foto autor].....	9
Obrázek 2: Zdivo z hliněných válků [foto autor].....	10
Obrázek 3: Zdivo z trojúhelníkových válků poskládané do klasovité vazby [foto autor]	10
Obrázek 4: Příklad dusané stěny se sloupovým posuvným bedněním [foto autor]	11
Obrázek 5: Dřevěný výplet obalený hliněnou směsí [foto autor]	12
Obrázek 6: Trámová stěna obalená hliněnou směsí [foto autor]	13
Obrázek 7: Palác Potála v tibetském hlavním městě Lhasa postavený kolem roku 700 n. l. [29].....	14
Obrázek 8: Mapa světa s historickým vývojem rozšiřování technologie dusané hlíny [autor]	18

Obrázek 9: Index lidského rozvoje (HDI) z roku 2018 [13].....	20
Obrázek 10: Lidský blahobyt v závislosti na Ekologické stopě z roku 2018 [14].....	21
Obrázek 11: Vhodné složení hliněné směsi pro dusání podle zrnitosti; a – vhodný poměr hrubých a jemných částic (směs vhodná pro dusání); b – příliš mnoho jemných částic (nevhodné pro dusání); c – příliš mnoho hrubých částic (nevhodné pro dusání) [24].....	33
Obrázek 12: Příklad probarvené hliněné dusané stěny [32]	34
Obrázek 13: Dvoupatrový objekt restaurace Hliněnka se stěnami z dusané hlíny [24]....	40
Obrázek 14: Interiér restaurace Hliněnka [24]	40
Obrázek 15: Pohled na nosnou dřevěnou stěnu vyplněnou dusanou hlínou před instalací dřevěného obkladu [24]	41
Obrázek 16: Pohledová stěna z dusané hlíny v interiéru rodinného domu [24]	42
Obrázek 17: Koupelna rodinného domu v Čelákovících, kde byl na povrchovou úpravu použit voděodolný marocký štuk [24]	42
Obrázek 18: Výrobní hala prefabrikátů Martina Raucha pro stavbu haly Ricola ve Švýcarském Laufenu [33].....	43
Obrázek 19: Sušárna bylin firmy Ricola [33]	44
Obrázek 20: Detailní pohled na halu z prefabrikovaných dílců z dusané hlíny [33].....	44
Obrázek 21: Vnější boční pohled na dusaný rodinný dům Rauch [25].....	45
Obrázek 22: Pohled na schodiště uvnitř objektu [25].....	46
Obrázek 23: Ukázka interiéru rodinného domu z dusané hlíny [25].....	46
Obrázek 24: Zkouška smykové pevnosti na zkušebním panelu z dusané hlíny [26].....	51
Obrázek 25: Příklad pro zrychlený test vodní eroze [26].....	52
Obrázek 26: Zkouška odolnosti proti otěru [26].....	54
Obrázek 27: Písek frakce 0/4 z Bratčic.....	63
Obrázek 28: Štěrk frakce 4/8 mm (vlevo) a štěrk frakce 8/16 mm (vpravo)	64

Obrázek 29: Hlína před rozdrolením (vlevo) a hlína po rozdrolení (vpravo).....	72
Obrázek 30: Míchání směsi ve vertikální kruhové míchačce s nuceným oběhem	72
Obrázek 31: Hliněná směs po 10 minutách míchání.....	73
Obrázek 32: Tři varianty testovaných zkušebních těles	74
Obrázek 33: Proctoro dusadlo 4,5 kg (vlevo) a hutnění vrstvy ve formě válce 150×300 mm (vpravo).....	75
Obrázek 34: Odformování zkušebního tělesa (vlevo a uprostřed) a uložení zkušebních těles (vpravo)	75
Obrázek 35: Dusání zkušeb. tělesa pomocí roznášecí desky (vlevo) a odformované zkušební těleso (vpravo).....	76
Obrázek 36: Výroba zkušebních těles (válec 80×160 mm) v rámci I. Etapy (vlevo), odformované zkušební těleso (uprostřed) a uložení zkušebních těles (vpravo)	78
Obrázek 37: Příklady porušení zkušebních těles při provádění zkoušky pevnosti v prostém tlaku.....	79
Obrázek 38: Příklad nezdařeného odformování zkušebního tělesa.....	84
Obrázek 39: Příklad vyrobené nové formy pro zkušební těleso válec 80×160 mm	85
Obrázek 40: Nový hutnicí přístroj pro výrobu zkušebních těles válce 80×160 mm	86
Obrázek 41: Vyrobena zkušební tělesa v rámci III. Etapy.....	88
Obrázek 42: Vyrobena zkušební tělesa ve formách (vlevo), odformovaná zkušební tělesa (uprostřed) a uložení zkušebních těles (vpravo).....	91
Obrázek 43: Příklady testovaných zkušebních trámečků	92
Obrázek 44: Uložení zkušebních těles do stojaté vody hloubky 2 cm	94
Obrázek 45: Vizuální prohlídka zkušebních těles po 24 hodinách.....	94
Obrázek 46: Vizuální prohlídka zkušebních těles po 48 hodinách.....	95
Obrázek 47: Vizuální prohlídka zkušebních těles po 15 dnech	95

Obrázek 48: Příklady porušení nasáklých zkušebních těles při provádění zkoušky pevnosti v prostém tlaku96

Obrázek 49: Měření součinitele tepelné vodivosti – λ pomocí přístroje ISOMET 211498

12.3 Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti používaného cementu CEM I 42,5 R64

Tabulka 2: Názorný příklad tabulky vytvořeného výpočetního modelu68

Tabulka 3: Parametry zkušebních těles v rámci I. Etapy78

Tabulka 4: Výsledné pevnosti základní a ekonomické varianty hliněné směsi na zkušebním tělese krychle 100×100×100 mm.....80

Tabulka 5: Výsledné pevnosti základní a ekonomické varianty hliněné směsi na zkušebním tělese válec 150×300 mm.....81

Tabulka 6: Výsledné pevnosti zkušebních těles v rámci bakalářské práce (BP) a v rámci diplomové práce (DP).....82

Tabulka 7: Výsledné pevnosti 3 typů testovaných zkušebních těles (oblast Dolní Těrlícko)83

Tabulka 8: Parametry zkušebních těles v rámci III. Etapy89

Tabulka 9: Výsledné pevnosti testovaných těles v rámci III. Etapy.....89

Tabulka 10: Výsledky pevností v tahu za ohybu testovaných zkušebních trámečků93

Tabulka 11: Výsledky tlakové zkoušky nasáklých zkušebních těles krychle 100×100×100 mm96

Tabulka 12: Výsledky zkoušky stanovení součinitele tepelné vodivosti – λ98

12.4 Seznam grafů

Graf 1: Nakládání s komunálním odpadem v roce 2018 [18].....	28
Graf 2: Vývoj produkce a nakládání s komunálním odpadem v letech 2002 - 2018 [18]..	28
Graf 3: Křivka zrnitosti zeminy ČSN 73 6133 (Dolní Těrlicko)	61
Graf 4: Graficky znázorněný výsledek zkoušky Proctor Standard (Dolní Těrlicko)	61
Graf 5: Křivka zrnitosti zeminy ČSN 73 6133 (Dolany).....	62
Graf 6: Graficky znázorněný výsledek zkoušky Proctor Standard (Dolany).....	62
Graf 7: Křivka zrnitosti zeminy ČSN 73 6133 (Valchov)	63
Graf 8: Křivka zrnitosti používaného cementu CEM I 42,5 R.....	65
Graf 9: Ukázka grafu propojeného s tabulkou ve výpočetním modelu.....	69
Graf 10: Graf křivky zrnitosti navržené základní varianty (Dolní Těrlicko).....	71
Graf 11: Graf křivky zrnitosti navržené ekonomické varianty (Dolní Těrlicko).....	71
Graf 12: Porovnání výsledků tlakové pevnosti základní a ekonomické varianty hliněné směsi (krychle 100×100×100 mm)	80
Graf 13: Porovnání výsledků tlakové pevnosti základní a ekonomické varianty hliněné směsi (válce 150×300 mm)	81
Graf 14: Porovnání výsledků tlakové zkoušky s bakalářskou prací (oblast Dolní Těrlicko)	82
Graf 15: Porovnání výsledných pevností 3 typů zkušebních těles na hliněné směsi z oblasti Dolní Těrlicko.....	83
Graf 16: Návrh hliněné směsi pro oblast Dolany.....	87
Graf 17: Návrh hliněné směsi pro oblast Valchov	87
Graf 18: Výsledky 3 lokalit testovaných hliněných směsí (válec 80×160 mm).....	90

12.5 Seznam schémat

Schéma 1: Tradiční přístup k výstavbě [12].....	22
Schéma 2: Tři pilíře udržitelnosti [12].....	23
Schéma 3: Schéma postupu řešení předkládané diplomové práce – I. Etapa.....	57
Schéma 4: Schéma postupu řešení předkládané diplomové práce – I. Etapa.....	57
Schéma 5: Schéma postupu řešení předkládané diplomové práce – III. Etapa.....	58
Schéma 6: Schéma postupu řešení předkládané diplomové práce – IV. Etapa.....	59
Schéma 7: Schéma uložení trámečku do trojosého zkušebního lisu.....	92