

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Technologie výroby nepálených cihel pomocí manuálního lisu

Diplomová práce

Bc. Lukáš Bejček

Magisterský program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Konstrukce budov

Vedoucí práce: Ing. Jan Růžička, Ph.D.

Praha 2022

Vedoucí práce:

Ing. Jan Růžička, Ph.D.
Katedra konstrukcí pozemních staveb
Fakulta stavební
České vysoké učení technické v Praze
Thákurova 7
166 29 Praha 6
České republika

Copyright © Leden 2022 Bc. Lukáš Bejček

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s využitím poskytnutých odborných zdrojů a konzultací. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Jsem si vědom toho, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č. 81/2005 Sb. (autorský zákon).

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Ústřední knihovně Fakulty stavební a Fakulty architektury ČVUT.

V Praze dne 2. ledna 2022

.....

Bc. Lukáš Bejček

Poděkování

Zde bych rád poděkoval všem, kteří přímo i nepřímo přispěli k dokončení této diplomové práce.

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Janu Růžičkovi, Ph.D. za věcné, cenné i kritické připomínky při konzultacích, poskytnutí literárních zdrojů, odborné a inspirativní vedení, jak v průběhu samotné práce, tak v průběhu vypracovávání Specializovaného projektu 2.

Dále bych rád poděkoval vedení společnosti TBG Metrostav s.r.o., které mi ochotně umožnilo provádění části experimentu včetně poskytnutí potřebného vybavení a materiálu, tento dík patří především Ing. Janu Přídovi, vedoucímu provozu trojské betonárky. Velkou oporou během provádění experimentální části mi byl také Ing. Petr Čanda, kterému děkuji za poskytnutí fotografií a pomoc při provádění zkoušek a zajišťování materiálu. Zkoušky mechanických vlastností byly prováděny v Experimentálním centru ČVUT FSV, kde bych chtěl poděkovat zástupci vedoucího doc. Ing. Jiřímu Litošovi, Ph.D. a zaměstnanci Lukáši Joglovi, který mi byl nápomocný při provádění samotných zkoušek.

V poslední řadě bych chtěl poděkovat svým kamarádům Janu Richterovi, Ing. Matoušovi Kasalovi, Ing. Alešovi Hruďičkovi a Janu Exnerovi, kteří mi byli nejen fyzickou oporou při výrobě většiny hliněných cihel, ale také psychickou během psaní samotné diplomové práce.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Bejček</u>	Jméno: <u>Lukáš</u>	Osobní číslo: <u>438046</u>
Zadávající katedra: <u>K124</u>		
Studijní program: <u>N3649 Budovy a prostředí</u>		
Studijní obor: <u>3608T006 Budovy a prostředí - Konstrukce budov</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Technologie výroby nepálených hliněných cihel pomocí manuálního lisu</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Technology of unburnt clay bricks manufactured by manual press</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracování rešerše k tématu technologie hliněných cihel: - Historie a popsání hlíny jako stavebního materiálu - Vliv příměsí na vlastnosti nepálených hliněných cihel - Popsání technologického postupu výroby nepálených cihel pomocí manuálního lisu - Popsání polních zkoušek	
Realizace experimentálního programu v bodech: - Ověření vlivu příměsí na vlastnosti nepálených cihel za použití manuálního lisu - Vyhodnocení mechanických vlastností lisovaných cihel - Definování vlastností optimalizované směsi pro lisování - Na základě výsledků připravit technologický manuál pro výrobu lisovaných cihel - Návrh aplikování technologie do konkrétní konstrukce	
Seznam doporučené literatury: Minke, G.: Příručka hliněného stavitelství, Verlag, Staufen bei Freiburg, Bratislava 2009	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Jan Růžička, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>20. 9. 2021</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>3. 1. 2022</u> <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
_____ Datum převzetí zadání	_____ Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá technologií výroby nepálených hliněných cihel pomocí manuálního lisu. Bude zde popsán technologický postup od výběru vhodné hliněné směsi až po výrobu nepálených cihel. Cihly budou stlačovány manuálním lisem a posléze budou vyhodnoceny jejich mechanické vlastnosti. V rámci výzkumu bude proveden mineralogický a granulometrický rozbor směsi. Vyrobeny budou dvě výrobní sady cihel, jedna z čistě přírodní směsi a druhá s příměsí cementové stabilizace. U těchto sad bude zjišťován nárůst pevnosti v závislosti na čase. Po vyschnutí čistě přírodních cihel budou vyrobeny tři pilíře zděné různými způsoby, které budou vzájemně porovnány.

Klíčová slova

Nepálené hliněné cihly, hliněná směs, přírodní stavební materiály, mechanické vlastnosti lisovaných nepálených cihel, zdění lisovaných cihel

Abstract

This diploma thesis focuses on the technology of producing unburnt clay bricks (adobe) manufactured by manual press. The production process will be described from the selection of suitable clay mixture until the manufacturing of unburnt bricks. Bricks will be consolidated by a manual press and their mechanical properties will be determined. As part of the research, a mineralogical and particle size analysis of the mixture will be explored. Two production sets of bricks will be produced, one from a purely natural mixture and the other one with an admixture of cement stabilization. For these sets, the increase in strength over time will be determined. After the purely natural bricks have dried, three pillars will be built in various laying methods and compared with each other.

Key words

Unburnt clay bricks, adobe, clay mixture, natural building material, mechanical properties of consolidated unburnt bricks, laying of compressed bricks

Obsah

1	Úvod.....	12
1.1	Motivace a cíle.....	12
1.2	Projekt střední školy v Zambii.....	13
2	Hliněné stavitelství.....	16
2.1	Vývoj hliněných konstrukcí.....	16
2.2	Hliněné konstrukce dnes.....	17
2.2.1	Moderní hliněné konstrukce.....	17
2.2.2	Rozvojové projekty z nepálených hliněných cihel.....	21
3	Hlína jako stavební materiál	26
3.1	Mikrostruktura a složení hliněných směsí	27
3.1.1	Jíl	29
3.1.2	Prach, písek a štěrk.....	30
3.1.3	Voda	30
3.2	Metodika stabilizace	30
3.2.1	Stabilizace cementem	31
3.3	Vnitřní vazebné síly v zeminách.....	32
3.3.1	Soudržnost.....	32
3.3.2	Kapilární soudržnost.....	33
3.3.3	Elektrické a iontové polární síly.....	34
3.3.4	Vliv stabilizace cementem na vnitřní vazebné síly	34
3.4	Základní minerály	35
4	Popis prováděných mechanicko-fyzikálních zkoušek	36
4.1	Polní zkoušky.....	36
4.2	Stanovení objemové hmotnosti.....	37
4.3	Pevnost v tlaku.....	37
4.4	Pevnost v ohybu.....	38
4.5	Prosévací a sedimentační zkouška.....	39
5	Technologie výroby nepálených hliněných cihel.....	40
5.1	Lis a optimalizace výrobní technologie	42
5.2	Výroba vzorků	44
5.3	Zdění pilířů	48
6	Experimentální část.....	53
6.1	Výrobní suroviny a výrobní směs.....	53

6.1.1	Optimalizace hliněné směsi	54
6.1.2	Zrnitost hliněné směsi	56
6.1.3	Mineralogické složení hliněné směsi	58
6.1.4	Složení jednotlivých hliněných směsí.....	58
6.2	Mechanické vlastnosti použitých materiálů	59
6.2.1	Pevnost v ohybu	59
6.2.2	Pevnost v tlaku na zlomcích.....	60
6.2.3	Pevnost v tlaku výplňového betonu	60
6.2.4	Pevnost v tlaku hliněných cihel	62
6.3	Výsledky zatěžovací zkoušky pilířů.....	68
7	Aplikace technologie pro projekt střední školy v Zambii	73
7.1	Představení projektu	73
7.2	Referenční budova střední školy	76
8	Závěr.....	83
	Seznam zdrojů.....	85
	Seznam obrázků	87
	Seznam tabulek	91
	Seznam grafů	92
	Seznam vzorců	93
	Seznam příloh	94

1 Úvod

1.1 Motivace a cíle

Hliněné stavitelství je historicky nejrozšířenějším způsobem výstavby již od dob dávných civilizací. Hlína je přírodní materiál, který je ve většině lokalit snadno dostupný a téměř všudypřítomný. V minulosti se z hlíny stavěla nejen obydlí a domy, ale také chrámy, svatyně a jiná monumentální díla, z nichž se některá zachovala dodnes. Byla hojně užívána napříč kontinenty a kulturami. Hliněné prvky můžeme nalézt v pozůstatcích egyptských chrámů, iránských mešit, Velké čínské zdi i domech ve střední Evropě.

S postupným vývojem společnosti a technologickým rozvojem ve stavebním průmyslu začali stavitelé upřednostňovat moderní materiály jako jsou různé formy pálených cihel, ocel a beton. Jejich mechanické vlastnosti, trvanlivost a odolnost vůči vnějším vlivům s přehledem hliněné konstrukce předčí. Navzdory přechodu na nové stavební materiály žije v současné době stále více jak 30 % lidí v domech z hlíny. Tomuto procentuálnímu zastoupení dominují především rozvojové země, kde jsou objekty z hlíny stále nejběžnějším typem výstavby právě díky její dostupnosti a nízkým ekonomickým nárokům.

Hlína jako stavební materiál s sebou přináší ale i mnoho jiných výhod, než je pouze nízká cena a dostupnost. Jde o přírodní materiál, který nezatěžuje životní prostředí. Jeho použití a distribuce nevyžaduje na rozdíl od výroby oceli a betonu těžké průmyslové procesy, které emitují vysoké množství skleníkových plynů a přispívají tak ke znečištění ovzduší. Při práci s hlínou nevznikají nežádoucí vedlejší ani odpadní produkty. Malá spotřeba energie při zpracovávání materiálu snižuje také množství svázaných energií v rámci životního cyklu. Pokud zachováme čistě přírodní složení hliněné směsi lze provést snadnou recyklaci a materiál opětovně využít. Mimo jiné hlína vytváří zdravé mikroklima v interiéru. Váže na sebe nežádoucí částice toxických látek a absorbuje/uvolňuje vlhkost. Tím udržuje optimální vlhkostní podmínky v místnostech se zvýšenou/sníženou vlhkostí.

Použití hlíny má pochopitelně i své stinné stránky. Hliněné konstrukce musí být ošetřovány a chráněny před vnějšími vlivy – obzvláště proti dešti a vzlínající vodě. Hlína při přímém kontaktu s vodou rychle degraduje a ztrácí své mechanické vlastnosti. Navíc vykazuje špatnou odolnost proti působení kroutících momentů a tahových namáhání, proto se hliněné konstrukce navrhují primárně jako svislé a robustní konstrukce s dominantním tlakovým namáháním. V seismických oblastech je velkou nevýhodou nízká odolnost proti erozní činnosti.

Beton prochází neustálým technologickým vývojem, kdy se zlepšují jeho vlastnosti. Stejně tak hlína zažívá jakousi renesanci a lidé začínají tento materiál znovu objevovat. Už v minulosti byla hlína modifikována přimícháváním stébel slámy, dobytčího trusu a štětín srsti domácích zvířat, čímž došlo k částečné eliminaci smrštění vlivem vysychání. Dnešní moderní stavitelství nabízí daleko širší možnosti úprav hliněných směsí ve formě stabilizačních přísad, které mohou zlepšit mechanické vlastnosti a voděodolnost. V kombinaci s návrhem hydroizolace, ztužujících prvků a jiných běžně užívaných konstrukčních vrstev lze zajistit potřebné vlastnosti

novodobých objektů s ohledem na kvalitu a trvanlivost. Vzestup popularity hliněných staveb lze doložit realizacemi rakouského architekta Martina Raucha, který navrhl řadu veřejných i soukromých staveb z dusané hlíny, nebo experimentální „*Dům v kožichu*“ tuzemského architekta Petra Suskeho, který je vystavěn ze slámy, dřeva a hlíny. O tom, že nejde pouze o výsadu ekologických nadšenců, vypovídá i postupné zařazování nepálených hliněných cihel do nabídkových katalogů stavebních firem.

Velkým paradoxem, vzhledem k tomu že jde o jeden z nejstarších a nejrozšířenějších stavebních materiálů vůbec, je nedostatečná prozkoumanost technologie hliněného stavitelství. Ta pramení především ze složité definovatelnosti chemických a fyzikálních procesů, které se významně liší v závislosti na vlastnostech konkrétní hliněné směsi. Každá hlína má odlišné zastoupení prachových, jílových a šterkových částic, vlhkost a mineralogické složení a tím se liší i chování a vlastnosti výsledných prvků. Co odrazuje stavitele od užívání hlíny nejen v českém prostředí jsou chybějící technické normy, ze kterých by při navrhování těchto budov mohli vycházet. Opomenout nelze také chybějící zkušenosti projektantů a stavitelů, jak s tímto materiálem zacházet. V obci současných stavitelů stále převládá velká nejistota ohledně chování a aplikace hlíny v konstrukcích. Oproti tomu beton i ocel mají jasně definované vlastnosti, které jsou dané státními technickými normami a dlouholetými zkušenostmi stavařů.

Cílem této diplomové práce bude uvést čtenáře do základní problematiky technologie hliněného stavitelství se zaměřením na výrobu nepálených hliněných cihel pomocí manuálního lisu. V experimentální části budou ověřeny mechanické vlastnosti dvou sad nepálených hliněných cihel. Jedna sada bude z čisté hliněné směsi a do druhé bude přimíchávána cementová stabilizace. Následně budou z čisté přírodních cihel zhotoveny tři různé pilíře s různým způsobem zdění, které budou vzájemně porovnány. Hlína použita k výrobě hliněné směsi byla odebrána ze stavby nedaleko Prahy, kde byla označena za odpadní materiál. Experiment bude proveden v českých podmínkách mírného podnebného pásu. V potaz bude brána také možnost implementace stejného technologického postupu v zambijském tropickém prostředí, kde se plánuje využití nepálených cihel lisovaných stejnou technologií v rámci realizace projektu střední školy v Zambii, který bude představec v následující podkapitole.

1.2 Projekt střední školy v Zambii

Společně s týmem studentů a absolventů ČVUT momentálně spolupracuji na projektu střední školy v Zambii, jejíž realizace je plánována nedaleko vesnice Kashitu položené přibližně 230 km severně od hlavního města Lusaky. Náš tým vznikl v roce 2020 během letní školy Rozvojové září pořádané Centrem pro mezinárodní rozvojové projekty. Na projektu spolupracuje také nezisková organizace Přátelé New Renato, která působí přímo v místě plánované výstavby. Při projektování a navrhování školních budov se uvažuje s použitím nepálených hliněných cihel stlačených pomocí manuálního lisu. Jedním z cílů této diplomové práce bude kromě ověření mechanických vlastností takto lisovaných hliněných cihel také aplikování technologie v rámci tohoto konkrétního projektu a definování technologického postupu výroby cihel na základě získaných zkušeností.

Ve venkovských oblastech rozvojových zemí jako je Zambie žijí obyvatelé obvykle v jednoduchých jednopodlažních budovách, které jsou vhodné pro použití hliněných nepálených cihel. Zároveň je zde hlína snadno dostupná a její využití nevyžaduje vysoký ekonomický kapitál. Přímou v lokalitě Kashitu jsou místní obyvatelé zvyklí hliněné cihly vyrábět pomocí prozaického pákového lisu, který nestlačuje hlínu dostatečnou silou a není schopný zajistit tvarovou stálost. Nízkou kvalitou a trvanlivostí cihel místní kompenzují jejich následným vypalováním, čímž dochází k odlesňování okolí a zbytečnému spalování dřevin, které jsou v oblasti nedostatkovým zbožím.



Obrázek 1 - Používaný pákový lis,
foto: Petr Čanda



Obrázek 2 - Provizorní výpalna cihel,
foto: Petr Čanda



Obrázek 3 - Vysušování čerstvě stlačených cihel, foto Petr Čanda

Na obrázcích 1-3 můžeme vidět současnou podobu výrobního procesu. Hliněné cihly prokazatelně nedosahují požadované kvality. Tvarová nestálost v konstrukcích způsobuje nerovnoměrné rozložení zatěžovacích sil. Objekty postavené z takto vyrobených cihel neodpovídají kvalitě potřebné k zajištění bezpečného užívání objektu a významně snižují jeho trvanlivost.

Naším záměrem není místní výrobní proces nahradit, ale pouze jej zefektivnit a zdokonalit. K výrobě hliněných cihel pro budovy střední školy bude využíván modernizovaný manuální lis, který si ponechává výhody procesu praktikovaného místními a eliminuje rizika a nevýhody s ním spojené. Zajišťuje tvarovou stálost jednotlivých cihel a zvyšuje jejich mechanickou odolnost. Takto lisované cihly dosahují dostatečné pevnosti i bez nutnosti následného vypalování a umožňují tak rychlejší a plynulejší proces výstavby.

V experimentální části této práce budou z cihel vyrobených pomocí manuálního lisu zhotovené tři pilíře, které budou následně podrobeny destruktivní zkoušce. Cílem tohoto experimentu nebude pouze vyhodnocení této zkoušky, ale také osvojit si práci s hliněnými směsmi, optimalizovat proces lisování a porovnat tři různé způsoby zdění.

2 Hliněné stavitelství

Tato kapitola ve zkratce představí rozvoj hliněného stavitelství v čase, který bude nejprve zobrazen v širším kontextu. Posléze bude popsáno současné využití hliněných konstrukcí v rámci Evropského prostředí. V poslední řadě bude představeno několik referenčních rozvojových projektů.

2.1 Vývoj hliněných konstrukcí

Hlína byla jako stavební materiál využívána při zakládání nových sídel před více než 9 000 lety. V těchto dobách byla hlína nejrozšířenějším materiálem určeným k výstavbě od malých domků až po posvátné chrámy. Výstavbu sídel z hliněných konstrukcí podpořil vývoj zemědělství, který umožnil usídlení obyvatel na konkrétním místě po delší dobu a dal tak prostor pro sofistikovanější způsob výstavby. Hliněné konstrukce mohou mít mnohých podob a obvykle jsou kombinované s dalšími přírodními materiály jako je dřevo a kámen. V počátku byla hlína použita jako ochranná vrstva zastřešující konstrukce z dřeva a slámy. Hliněné prvky byly zprvu formované především ručně, později se začalo využívat bednění a lisující stroje různých typů.

Obecně se v hliněném stavitelství rozlišují 2 základní způsoby výstavby:

- i. Dusání hlíny do bednění (*pisé*)
- ii. Výroba nepálených hliněných cihel (*adobe*)



Obrázek 4 - Chrám Ramesse II., Egypt, zdroj: <http://home.tiscali.cz/>

Zatímco dusání hlíny do bedněni umožňuje vytváření monolitických konstrukcí, kde je tvar určen rozměrem bednicích prvků a hlína je dusána přímo „*in situ*“, nepálené hliněné cihly mohou být vyráběné kdekoliv a posléze převezeny na místo. Výhodou výroby cihel „*ex situ*“ je stálost vnějších klimatických podmínek, kdy nedochází k nežádoucímu působení vlhkosti a jiných okolních vlivů, které mohou mít negativní dopad na konečné vlastnosti cihel. Oproti tomu dusání hlíny do bedněni přímo na místě umožňuje okamžitou únosnost ihned po odbedněni.

Důkazem dlouhé historie používání hlíny jsou pozůstatky hliněných domů staré přibližně 7 000 let z oblasti ruského Turkestánu nebo Velká čínská zeď, jež byla před obložení kameny a cihlami vystavěna z udusané hlíny [1]. Na obrázku 4 můžeme spatřit pozůstatky kleneb egyptského zádušního chrámu Ramesse II. starého bezmála 3 200 let. V suchých oblastech, kde není dostatek dřevin, byli stavitelé nuceni najít způsob zastřešení pomocí klenbových konstrukcí z nepálených cihel.

Tradice hliněných staveb a technologií vznikaly nezávisle na sobě na všech kontinentech zároveň. Technika výstavby nebyla exkluzivní místu, vyznání víry ani zvyklostem jednotlivých obyvatel. Utvářely je především místní klimatické podmínky, účel a potřeby obyvatel jednotlivých budov.

2.2 Hliněné konstrukce dnes

Hliněné stavitelství má dlouholetou tradici s pestrými variacemi konstrukčních forem a technologických postupů. Hlínu můžeme najít ve zděných konstrukcích v podobě cihel a válků, ale také dusanou do bedněni. Dodnes velmi rozšířené jsou také hliněné omítky, které mají schopnost vytvořit optimální mikroklíma v interiéru.

Vývoj hliněných konstrukcí v Evropě byl vytvářen především historickým vývojem a událostmi, které měly zásadní vliv na užívání a dostupnost stavebních materiálů. První zmínky o hliněných stavbách u nás sahají až do 13. století. K rozšíření jejich užívání pomohlo zvyšování bezpečnostních nároků a zpřísnění předpisů zabráňujícím vzniku požárů, které vešly v platnost za vlády Marie Terezie v 18. století. S postupným rozvojem modernějších zdících prvků jako jsou pálené cihly a poklesem jejich nákupní ceny zaznamenaly hliněné konstrukce úpadek. Na venkově se z hlíny stavělo i nadále, přesto v rámci Česka bylo její užívání na ústupu. Po 2. světové válce, kdy nebyl dostatek stavebních materiálů, se krátce experimentovalo s návratem k hliněným konstrukcím. Nedostatečná kvalita provedení a zkušenosti stavitelů s lepšími modernějšími materiály měly za následek spíše skeptické přijetí těchto snah.

Skutečná renesance hliněných konstrukcí nastává až v 90. letech, kdy se ve světě začíná diskutovat o udržitelné výstavbě a negativních dopadech těžkého průmyslu na životní prostředí. Je iniciován výzkum a možnosti využití hlíny, která je šetrnou a ekonomicky dostupnou alternativou.

2.2.1 Moderní hliněné konstrukce

V následující podkapitole bude představeno několik současných realizací, které se snaží využitím hlíny k vytvoření lepšího prostředí v interiéru, méně zatěžovat životní prostředí nebo upřednostnit tento materiál kvůli snadnému technologickému postupu, který umožňuje výstavbu svépomocí.

Haus Rauch; Rakousko

Martin Rauch je rakouský architekt věnující se stavění z hlíny. Jeho realizace třípodlažního rezidenčního domu „Haus Rauch“ je ukázkovým příkladem využití hlíny jako stavebního materiálu.

Betonové základové pasy s nízkým obsahem cementu a příměsí přírodního pucolánu byly vylity na skalnaté podloží. Dusané hliněné stěny byly zatepleny velkoformátovými deskami z rákosí. V interiéru byly obvodové stěny omítnuty hliněnou omítkou ve vrstvě tlusté cca 3 cm. Dům kromě využití primárně přírodních materiálů disponuje velkými prosklenými plochami, která jsou u tradičních hliněných konstrukcí ojedinělé. Hlína díky své schopnosti absorbovat vlhkost umožňuje přímé napojení okenních rámců na hliněné stěny. Otvory a nerovnosti byly následně vyplněny blátem.



Obrázek 5 - Haus Rauch vstup, zdroj: www.lehmtonerde.at



Obrázek 6 - Haus Rauch interiér, zdroj: www.lehmtonerde.at



Obrázek 7 - Haus Rauch schodiště, zdroj: www.lehmtonerde.at



Obrázek 8 - Haus Rauch vnější pohled, zdroj: www.lehmtonerde.at

V kontaktu se zeminou je dům odizolován bitumenovou hydroizolací. Dusané hliněné stěny jsou odkryty, aby bylo využito schopnosti hlíny regulovat vlhkost a vytvářet tak příjemné vnitřní mikroklima. V interiéru se pracuje s dřevem a hlinou i u zařizovacích předmětů, kde je stejně jako u konstrukčních prvků přiznán proces stárnutí a změn vlivem eroze.

Lesní školka; Říčany, Česko

Realizace lesní školky v Říčanech vyniká svou jednoduchostí a skromnými rozměry. Navrhl ji architekt Jiří Böhm jako alternativu ke zvažované maringotce a železnému kontejneru. Dům ze slámy, dřeva a hlíny je přírodní stavbou realizovanou svépomocí, kterou s výjimkou aplikace hydroizolační vrstvy vybuodovala skupina dobrovolníků složená z rodičovského kolektivu



Obrázek 9 - Pohled na neomítnutou slaměnou stěnu, zdroj: <https://www.idnes.cz/>



Obrázek 10 - Pohled na lesní školku, zdroj: <https://www.idnes.cz/>



Obrázek 11 - Pohled na lesní školku před dokončením, zdroj: <https://www.idnes.cz/>



Obrázek 12 - Interiér lesní školky, zdroj: <https://www.idnes.cz/>

Lesní školka se stavěla 9 dní v kuse s dodatečnými 25 dny, kdy byly provedeny dokončující práce včetně nanášení hliněných omítek, které jsou v interiéru i exteriéru ve 3 vrstvách. Hlína byla vytěžena přímo na místě při vykopávání základů a přimíchávala se do ní stébla slámy a písek. Dům s kruhovým půdorysem je založen na kamenech, které brání vniknutí vztlínající vody. Nosné stěny tvoří zkomprimované balíky slámy. Pultová střešní konstrukce je ze dřeva a jako tepelná izolace byla použita konopná vata. Cenový odhad za kompletní realizaci se pohybuje od 250 do 350 tisíc korun a byl financován z městského fondu ve spolupráci s Ministerstvy životního prostředí, práce a sociálních věcí.

Dům Tecla; Itálie

Kromě tradičních technologických postupů při práci s hlínou jako je dusání a výroba hliněných cihel, se začíná hlína implementovat i do nových a moderních technologií. Jedním z příkladů je tzv. Dům Tecla od italské firmy WASP, která je známá svými inovacemi v 3D tisku.



Obrázek 13 - 3D tisk domu, zdroj:
<https://www.mcarchitects.it/>



Obrázek 14 - Interiér, zdroj:
<https://www.mcarchitects.it/>



Obrázek 15 - Detail struktury stěny, zdroj:
<https://www.mcarchitects.it/>



Obrázek 16 - Pohled na dům, zdroj:
<https://www.mcarchitects.it/>

Jedna z největších 3D tiskáren je schopna z jílové směsi během několika stovek hodin vytisknout cenově dostupný dům o rozloze 60 m². Technologie umožňuje rychlou výstavbu, které je zároveň šetrná k životnímu prostředí a cenově dostupná. Dům tvoří dvě kopule, které jsou uvnitř propojené. Obvodová konstrukce není nijak ošetřena a nevyžaduje dodatečné ztužování. Jako tepelná bariéra funguje samotná hliněná stěna s vlnitým povrchem, který přirozeně vzniká postupným vrstvením jílové směsi během 3D tisku.

Dům nemá klasická okna, proto je přísun světla v interiéru zajištěn proskleným vstupem a dvěma stropními světlíky. Výška objektu lehce přesahuje 4 metry a dispozice počítá s obytnou částí, kuchyní, ložnicí a hygienickým zázemím. Modulární systém umožňuje lehké tvarové a rozměrové úpravy v závislosti na aktuálních podmínkách a možnostech. Jde o prototyp nekonvenční stavby šetrné k životnímu prostředí, která umožňuje realizaci z lokálních materiálů. V budoucnu vidí architektonický ateliér Mario Cucinella Architects uplatnění podobného typu jednoduchých staveb především v rozvojových zemích, nebo pro dočasné stavby, které lze díky použití organických materiálů snadno recyklovat.

2.2.2 Rozvojové projekty z nepálených hliněných cihel

Hlína jako stavební materiál při výstavbě projektů v rozvojových zemích vyniká svou dostupností, ale také nekomplikovanými technologickými postupy. Hliněné konstrukce lze realizovat formou staveb svépomocí a umožňují tak zapojení místních komunit v samotném procesu výstavby. Tento přesah do sociálně společenských aspektů je velmi významný a často upřednostňovaný v rámci realizací rozvojových projektů, kde výstavba bez angažovanosti místních komunit může ztratit na významu. Každá výstavba by měla před zahájením projít analýzou sociálně společenského kontextu. Často mohou mít zásahy zvenčí negativní dopad na vzájemné vztahy jednotlivých komunit, i přes dobré úmysly stavitelů.

V této podkapitole bude ukázáno několik úspěšných projektů, které byly realizovány využitím nepálených hliněných cihel.

Cajuru Housing Project; Sacramento, Brazílie

Brazílie není typickým příkladem rozvojové země. Přesto jsou místní společenské nepoměry mezi vysokopříjmovou skupinou obyvatel a obyvateli menších měst a vesnic vysoké. Nízkopříjmová skupina obyvatel v rámci svého rozpočtu často nedosáhne na vlastní bydlení. Proto vznikají nové a inovativní způsoby výstavby, které jsou cenově dostupnější, využívají místních materiálů a mohou být stavěny s pomocí místních.

Příkladem jednoho z takových projektů je Cajuru Housing Project realizovaný v roce 1999 v Sacramento v brazilské oblasti Minas Gerais. Během 3 let bylo vybudováno bezmála 500 domů. Do realizace se zapojilo 1 000 osob, pro které byly domy určeny. Před začátkem výstavby byli vyškoleni týmem zkušených odborníků a na výstavbě se podíleli od výroby cihel až po instalaci elektrických rozvodů.



Obrázek 17 - Příprava hliněné směsi, zdroj: <https://www.jarfel.com.br/>



Obrázek 18 - Čerstvá nepálená hliněná cihla, zdroj: <https://www.jarfel.com.br/>

Hliněná směs byla stabilizována přimícháváním cementu a cihly byly stlačovány pomocí manuálních lisů. Projekt byl financován městem a společností Sahara, která realizaci využila jako pionýrský projekt, dodala použité manuální lisy a své „know how“. Pořizovací cena takového domu byla v přepočtu ve své době přibližně 18 000 korun českých [3]. Tato forma sociálního bydlení umožnila místním lidem pracujícím za minimální mzdu vlastnit dům a mít tak důstojné podmínky k životu.



Obrázek 193 - Ukládání a vyztužování cihel,
zdroj: <https://www.jarfel.com.br/>



Obrázek 20 - Pohled na hrubou stavbu domů,
zdroj: <https://www.jarfel.com.br/>

V Brazílii jde o populární způsob cenově dostupné výstavby. Důkazem je hned několik společností na místním trhu, které nabízí manuální i hydraulické lisy a školící programy, například: Sahara, ECO Maquinas nebo Verde Equipamentos.

Základní škola Tanouan Ibi; Bandiagara; Mali

Areál základní školy ve městě Bandiagara situovaném na západu Afriky ve státě Mali se skládá z tří učeben o pravoúhlém půdorysu 7 x 9 metrů, ředitelny, skladu a sociální budovy. Škola je určena pro 180 žáků a ve večerních hodinách slouží ke vzdělávání místních žen.



Obrázek 21 - Pohled na vstup do budovy, zdroj:
<https://www.levs.nl/>



Obrázek 22 - Příprava hliněné směsi pro
zastřešovací vrstvu, zdroj: <https://www.levs.nl/>



Obrázek 23 - Pohled na hrubou stavbu, zdroj:
<https://www.levs.nl/>



Obrázek 24 - Interiér školy, zdroj:
<https://www.levs.nl/>

Jde o minimalistickou realizaci vystavěnou z hlíny, která spojuje lidi, kulturu a přírodu. Projekt vznikl spoluprací mezi nizozemským architektonickým ateliérem LEVS architecten a místními obyvateli. Výsledkem je precizní kombinace existujících technik používaných v této lokalitě a inovativních metod hliněného stavitelství.

Škola byla vyrobena hydraulickým lisem, který umožňuje preciznější stlačení a tím i větší odolnost vyrobených hliněných cihel. Hliněné cihly byly v tomto případě využity pro svislé i vodorovné nosné konstrukce. Zastřešení tvoří klenba z hydraulicky lisovaných cihel, na kterou je aplikována ochranná vrstva chránící hliněné cihly před působením deště a dalšími klimatickými vlivy.

Škola; Cabo Delgado, Mosambik

Projekt školy v Cabo Delgado, nejsevernější provincii Mosambiku, byl iniciován mosambickou nadací Aga Khan Foundation, která se snaží zachovat a současně zlepšit místní tradiční architekturu. Cílem je zajistit vyšší odolnost, trvanlivost a zlepšit vnitřní mikroklima při použití lokálních materiálů.

V první fázi bylo vybudováno jedenáct škol, na kterých byly vyzkoušeny a demonstrovány modernizované stavební postupy. Při jejich realizaci bylo vyškoleně několik místních stavitelů, kteří poté znalosti dále předávali v rámci vzdělávacích programů. V druhé fázi se začaly osvojené stavební techniky aplikovat při realizaci dalších objektů.



Obrázek 25 - Budova jednoho z 11 realizovaných vzdělávacích center, zdroj: <https://www.zrs.berlin/>



Obrázek 264 - Výroba nepálených hliněných cihel, zdroj: <https://www.zrs.berlin/>

Místní technice se přezdívá „bahareque“ a spočívá ve vytváření bambusových rámců, které jsou posléze vyplňovány zeminou. Střechu obvykle tvoří sláma s velkými přesahy, které chrání zeminu před působením deště. Domy realizované touto technikou nemají příliš dlouhou životnost. Brzo do nich začíná zatékat a dochází k degradaci bambusových a dřevěných prvků. Tato tradiční technika byla modernizována použitím nepálených hliněných cihel stabilizovaných 10% příměsí cementu chráněných hydrofobní vrstvou, která zamezuje vnik vlhkosti a vody. Byl navrhnout jednoduchý systém napojení bambusových prvků sloužících k vyplnění dveřních, okenních otvorů a svislých hliněných konstrukcí. Další inovací je zdokonalená konstrukce bambusového krovu, která umožňuje zastřešení o rozponu až 9 metrů.



Obrázek 27 - Interiér budovy a pohled na bambusový krov, zdroj: <https://www.zrs.berlin/>



Obrázek 28 - Detail napojení bambusu a hliněné svislé konstrukce, zdroj: <https://www.zrs.berlin/>

Obnova domů po přírodních katastrofách; Nepál

Nepál patří mezi jednu z nejchudších zemí na asijském kontinentu. Téměř 25 % obyvatel žije pod hranicí chudoby a 49 % nemá přístup k důstojnému bydlení. V letech 2015 a 2019 byla situace umocněna dvěma intenzivními zemětřeseními, které kromě četných ztrát na životech zničily dosavadní domy, ve kterých místní komunity žily. Krátce na to přišla další přírodní katastrofa v podobě povodní, při kterých bylo zničeno přibližně 900 000 domů. Extenzivních pokusy místní vlády o obnovu zasažených oblastí upřednostňovaly členy movitějších společenských vrstev. Místní nezisková organizace Community Impact Nepal (CIN) založila sbírku, která společně s místními zahájila obnovu jejich domů.

Lisování hliněných cihel se využívá u rozvojových projektů, protože umožňuje využít materiály přímo v místě výstavby a zapojení místních obyvatel do procesu výstavby.



Obrázek 29 - Lisování hliněných cihel, zdroj: www.impactnepal.org



Obrázek 30 - Skladování lisovaných cihel, zdroj: www.impactnepal.org

Ve venkovských oblastech Nepálu byla z lisovaných cihel vystavěno 3 500 domů, které ubytovávají téměř 17 500 lidí. Kromě vybudování domů přispěla místní nezisková organizace i k rozvoji podnikání a byznysu. Během výstavby bylo zaměstnáno přes 2 200 lidí.



*Obrázek 31 - Zdění vylisovaných cihel, zdroj:
www.impactnepal.org*



*Obrázek 32 - Postavené domy, zdroj:
www.impactnepal.org*

Jednoduchost výroby lisovaných cihel umožnila zapojení žen, minoritních skupin a invalidních jedinců. Mezi vyučenými jedinci byla více jak polovina z těchto znevýhodněných sociálních skupin. Vzniklé domy nejen že zajistily potřebné přístřeší pro místní obyvatele, ale pomohly také k inkluzi obyvatel na periferii společenského spektra a zrovnoprávnění žen ve společnosti.

3 Hlína jako stavební materiál

Předpokladem pro implementaci hlíny do stavebních konstrukcí je informovanost a povědomí široké obce stavitelů o hlavních výhodách a nevýhodách hlíny. Hlavní srovnávací body kladů a záporů jsou pro přehlednost uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1 - Hlína jako stavební materiál

Hlína jako stavební materiál	
Výhody	Nevýhody
Regulace vlhkosti – hlína má schopnost přijímat a vydávat přebytečnou a chybějící vlhkost v prostředí a tím udržuje optimální vlhkost vnitřního mikroklimatu	Smršťování – hlína při procesu vysychání zmenšuje svůj objem
Akumulace tepla – podobně jako průmyslově vyrobené stavební materiály i hlína umí akumulovat teplo a tím přispívat k lepší tepelné stabilitě budov	Degradace působením vody – je nutné zamezit kontaktu vody a hliněné konstrukce
Přírodní materiál – hlína oproti běžně používaným stavebním materiálům nezatěžuje životní prostředí	Degradace působením mrazu – cyklické procesy rozmrazování a zamrzávání mají negativní vliv na vlastnosti hliněných konstrukcí
Snadná recyklace – při zachování čistě přírodního složení lze velmi snadno hlínu opětovně využít	Složitá definice vlastností – hlína s různými poměry zrnitých částic vykazuje odlišné vlastnosti
Cenová dostupnost – hlína je často odpadním materiálem, například při vykopávání základů a je tak velmi levným stavebním materiálem, ať už jako vedlejší produkt nebo přímo z hlinišť	Chybějící stavebně technické normy – hlína jako stavební materiál doposud nemá v ČR předpisové normy, z kterých by při jejich navrhování mohli stavitelé vycházet
Snadný proces výstavby – manipulace s hlínou i její aplikace do konstrukcí nevyžaduje těžké stroje ani technologické postupy, je tak vhodná pro stavby svépomocí a pro realizování projektů v rozvojových zemích	Horší mechanické vlastnosti – hliněné konstrukce mají prokazatelně nižší pevnosti v tlaku a téměř nulové v tahu v porovnání s běžně užívanými konstrukcemi
Chrání dřevo – hlína je často kombinovaná s dalšími přírodními materiály jako je dřevo, které zároveň hlína konzervuje a chrání před zvýšenou vlhkostí díky své absorpční schopnosti	-
Absorpce škodlivých látek – podle několika průzkumů (např. Ziegert 2000) hlína prokazatelně snižuje množství toxických látek (např. fosfáty a síru) v interiéru	-

Použití hlíny s sebou přináší zmíněných výhod a nevýhod, které je potřeba brát při práci s tímto materiálem v potaz. Pro maximální využití benefitů hlíny musí být konstrukce vhodně navržena a uzpůsobena. Stejně tak je možné eliminovat několik nevýhod vhodným konstrukčním řešením, které například zamezí kontaktu s vodou či zamrzávání konstrukce. Vliv smrštění lze snížit menším množstvím záměsové vody a přidáním příměsí do hliněné směsi.

Dále bude v této kapitole představena hlína vhodná pro využití ve stavebním průmyslu s ohledem na její mikrostrukturální složení a mineralogický rozbor. Ve zkratce budou definovány jednotlivé vazebné síly zajišťující soudržnost hliněných směsí a jejich transformace po přimíchání cementové stabilizace.

3.1 Mikrostruktura a složení hliněných směsí

Hlína je produktem mechanických a chemických erozí hornin vznikajících působením větru, vody a objemových změn v závislosti na změnách skupenství látek. Procesy zvětrávání se liší podle lokality a klimatických podmínek. Každé naleziště hlíny má své specifické vlastnosti a složení, které při práci s tímto materiálem musíme brát zohlednit. Hliněné směsi obsahují různě procentuální zastoupení jílových, prachových, pískových a hrubších šterkových částí. Do hliněných směsí mohou být také přimíchávané stabilizační příměsi organického a anorganického původu, které umožňují ovlivňovat vlastnosti hlíny.

V tabulce 2 můžeme vidět klasifikaci podle velikosti jednotlivých zrn, která platí ve stavebním průmyslu podle [4].

Tabulka 2 - Klasifikace zrn podle velikosti částic

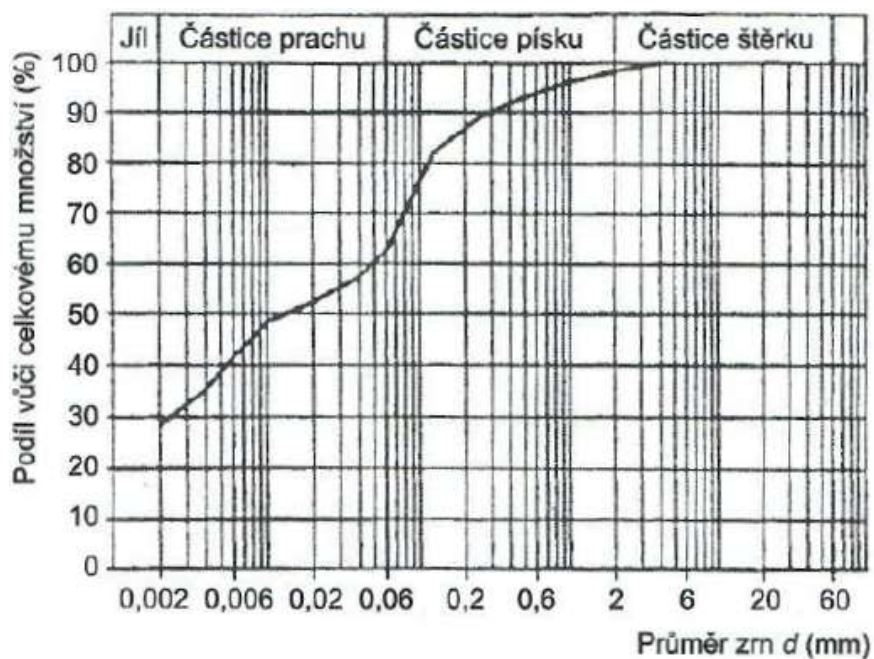
Klasifikace zrn podle velikosti částic	
< 0,002 mm	jíl
0,002 - 0,06 mm	prach
0,06 - 2 mm	písek
2 - 60 mm	šterk
> 60 mm	kameny a balvany

Podle procentuálního poměru jednotlivých zrn rozlišujeme tři výchozí skupiny zemin [4].

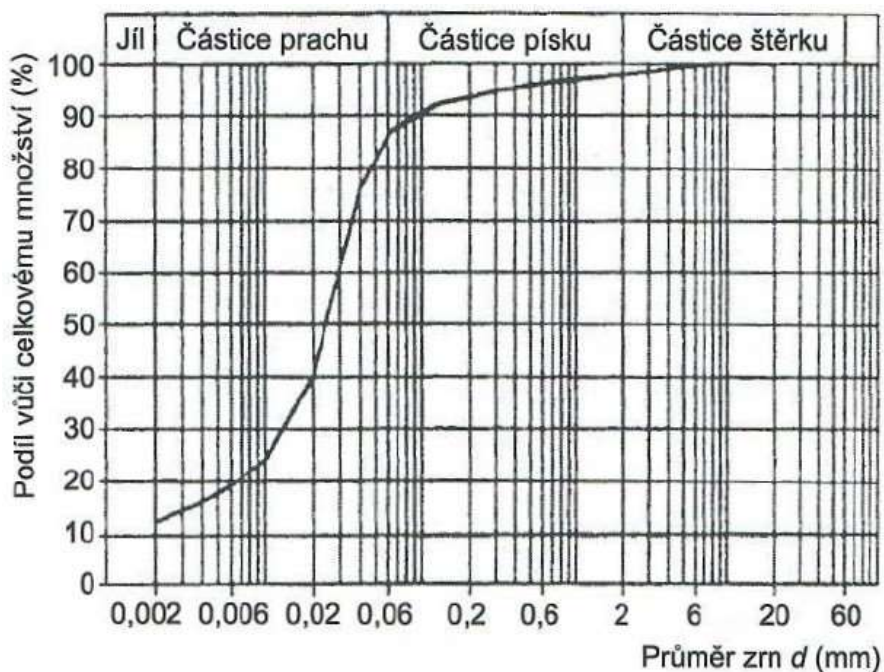
Tabulka 3 - Rozdělení zemin na základní skupiny

Výchozí skupina	Základní název	Symbol	Kvalitativní znaky
Jemnozrnná	Jemnozrnná zemina	F (jíl – C, hlína – M)	$f > 35 \% (g+s+f)$
Písčítá	Písek	S	$f < 35 \% (g+s+f) \wedge s > g$
Šterkovitá	Šterk	G	$f < 35 \% (g+s+f) \wedge g > s$

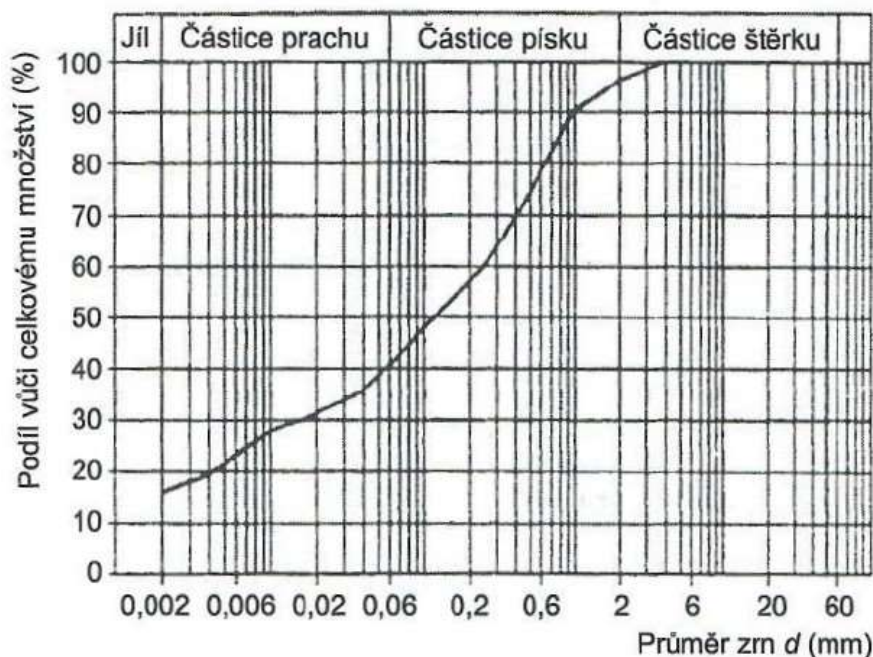
Jedním ze základních indikátorů o podílu jednotlivých zrn je tzv. křivka zrnitosti [1]. Křivka zrnitosti udává na vodorovné ose průměr zrn v milimetrech a na svislé ose její podíl vůči celkovému množství v procentech.



Graf 1 - Křivka zrnitosti – jílová půda



Graf 2 - Křivka zrnitosti – prachová hlína

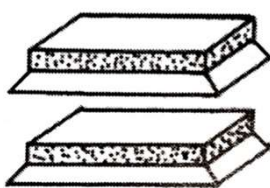


Graf 3 - Křivka zrnitosti – Silně písčité hlína

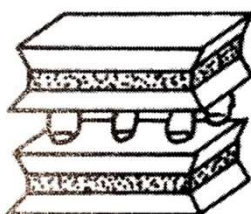
Podíl zrn o průměru v rozmezí 250 – 0,063 mm stanovujeme prosévací zkouškou. Množství zrn o průměru < 0,063 mm zjišťujeme sedimentací.

3.1.1 Jíl

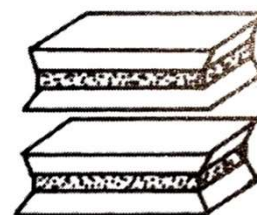
Jako jíl klasifikujeme zrna menší než 0,002 mm. V hliněných směsích hraje jíl významnou roli pojiva, které drží hrubší částice pospolu a zajišťuje jejich vzájemnou soudržnost. Jílové částice se oproti pískovým a šterkovým částicím odlišují specifickým vznikem elektrického pole, které je iniciátorem nepatrného pootočení krystalické mřížky omezující vznik krystalů a jejich růst. Elektrické pole způsobuje současně výsledný negativní náboj. V závislosti na prvotní hornině, z které jílovité minerály zvětrávaly, rozlišujeme tři základní typy – kaolinity, illity a montmorillonity [1].



Obrázek 33 – Kaolinit [1]



Obrázek 34 – Illit [1]



Obrázek 35 – Montmorillonit [1]

Jílové minerály se liší intralamelárními vzdálenostmi ve své struktuře. Jde pouze o tři nejčastější formy výskytu těchto minerálů. V přírodě existuje více ojedinělých typů.

3.1.2 Prach, písek a štěrky

Částice prachu, písku a štěrku se od těch jílových liší především tím, že nemají schopnost vázat další částice. V hliněných směsích tedy plní funkci plniva. Jejich tvar se liší podle způsobu zvětrávání. Zrna vznikají rozrušováním hornin a mají ostré hrany, které mohou být zbroušeny působením větru či prouděním vody.

3.1.3 Voda

Množství vody v zemině hraje významnou roli. Voda má vliv na zpracovatelnost hliněných směsí a zastupuje funkci katalyzátoru při vzniku chemických reakcí. V mikrostruktuře materiálu iniciuje a ovlivňuje vznik vnitřních sil a napětí.

Molekuly vody se v zemině vyskytují jako:

- **Voda podzemní:** Voda, která se nachází pod povrchem terénu. Jde o vodu vsakující se do podloží ze srážek, okolních vodních toků a nádrží. Kontakt podzemní vody s hliněnými prvky je nutno zabránit vhodným konstrukčním návrhem.
- **Voda kapilární:** Je typem podzemní vody. Kapilární voda vlivem povrchového napětí vzlíná nad hladinu podzemní vody důsledkem kapilární elevace. Kapilární výška je závislá na velikost zrn a pórů v zemině. Přítomnost kapilární vody má přímý vliv na výsledné vlastnosti prvků z nepálené hlíny.
- **Voda vázaná:** Jde o vodu navázanou přímo na povrchu částic zeminy v tenké vrstvě (difúzní obal) o tloušťce přibližně 0,5 μm . Množství vázané vody má zásadní vliv na plasticitu a soudržnost zeminy.
- **Voda strukturální:** Strukturální voda je obsažena přímo v krystalické mřížce a nemá zásadní vliv na mechanické vlastnosti. Její odstranění vyžaduje zahřátí na teploty přesahující 500–600 $^{\circ}\text{C}$ a způsobuje porušení krystalické mřížky.
- **Vodní pára:** Společně se vzduchem tvoří vodní pára plynnou fázi zeminy. Nachází se v otevřených i uzavřených pórech materiálu a její výskyt závisí na hodnotě parciálního tlaku. Vodní pára se přemísťuje do míst s nižším parciálním tlakem a současně může při poklesu teplot kondenzovat na povrchu zrn zeminy.
- **Voda ve formě ledu:** Krystaly ledu vznikají zamrzáváním přítomné vody. Při změně z kapalného na pevné skupenství zvětšují molekuly vody svůj objem cca o 9 % a narušují tak strukturu hliněných prvků.

3.2 Metodika stabilizace

Různé metody stabilizace nepálené hlíny jsou datovány až k samotným počátkům hliněného stavitelství. Způsoby stabilizování hliněných směsí se vyvíjely postupně a vycházely ze zkušeností stavitelů a empirických zákonitostí. V prvopočátcích se hlína stabilizovala organickými materiály jako je sláma, řezanka případně zvířecí chlupy. Později se začalo přimíchávat vápno, cement, živce, pucolány, zvířecí krev a exkrementy, které ovlivňovaly mikroskopickou strukturu hlíny. Vědecký přístup ke stabilizaci nepálené hlíny se rozvíjel v první polovině 20. století po I. a II. světové válce z důvodu nedostatku materiálů. Od 70.

let začal stále probíhající výzkum s ohledem na ochranu kulturního dědictví, novodobé realizace v rozvojových zemích a jako jednu z možných alternativ průmyslově vyrobených stavebních materiálů ve snaze snížit zátěž životního prostředí.

Podle [5] rozlišujeme tři základní metody stabilizace hliněných materiálů:

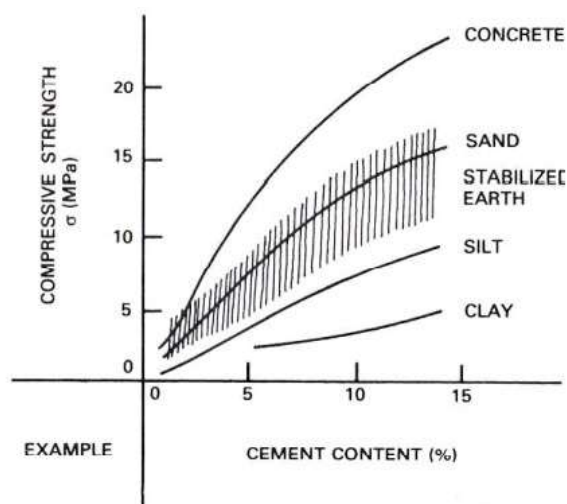
- i. **Mechanická stabilizace:** Jde o způsob stabilizace, kdy dochází ke změně objemové hmotnosti vlivem mechanického zhutňování. Zhutněná směs má zvýšenou mechanickou pevnost, nižší porositu, stlačitelnost a propustnost. V tomto případě není nijak narušena mikrostruktura hlíny.
- ii. **Fyzikální stabilizace:** U fyzikálních stabilizací je přímo ovlivněna textura hliněných směsí změnou zrnitosti složení. Mění se poměrové zastoupení jednotlivých frakcí zrn, případně jejich stav vysoušením, mražením atd.
- iii. **Chemická stabilizace:** Jako chemické stabilizační přísady označujeme veškeré látky a materiály, které iniciují fyzikálně-chemické transformace mezi původními zrnky a přimíchanou látkou. Mohou vytvářet nové matrice spojující případně obalující původní částice. Vzájemná fyzikálně-chemická reakce může mít za následek vznik nového materiálu.

V praxi se všechny tři způsoby stabilizace kombinují, aby se dosáhlo lepší mechanické pevnosti, trvanlivosti, snížení smršťování vlivem vysychání a vzniku trhlin a zvýšení odolnosti proti vodě. U stabilizací chemických je nutné brát zřetel na nově vzniklou matici, která může zbavit hlínu jejích přínosných vlastností. Při přimíchání cementu, vápno nebo bitumenů přestává být hlína organickým materiálem a zhoršuje se tak například její schopnost absorbovat vlhkost z vnějšího prostředí. Je důležité jasně definovat konkrétní požadavky a přizpůsobit stabilizaci našim prioritám. Nadcházející podkapitola bude zaměřena na stabilizaci cementem, která byla přimíchána do jedné ze zkoušených sad v experimentální části.

3.2.1 Stabilizace cementem

Cement je hydraulické pojivo složené z anorganických surovin. Při kontaktu s vodou se cementová zrna obalují hydratovaným kalcium-silikátem (tzv. CSH gelem), který je tvořen Ca^{2+} , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ a OH^- ionty. Reakcí iontů Ca^{2+} , $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, SO_4 a OH^- současně vzniká ettringit ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$). [6] Po smíchání s vodou nastává indukční perioda a je odstartován proces tuhnutí a tvrdnutí. Obecně jde o velmi komplexní reakce, jejichž přesná definice je téměř nemožná.

Stabilizace hlíny cementem je nejběžnějším typem chemické stabilizace. Je vhodná především pro hlíny s větším zastoupením pískových částic, pro jílové směsi je nutné množství přimíchaného cementu zvýšit. Množství přimíchaného cementu se pohybuje v rozmezí 6–12 % a je závislé na typu zeminy a třídě cementu. Na grafu 4 vidíme závislost množství cementu na pevnosti v tlaku v MPa a vzájemné srovnání jílových, prachových, pískových hliněných směsí včetně klasického betonu.



Graf 4 - Pevnost v tlaku v závislosti na typu hlíny a množství cementu [5]

Správné množství cementu lze odvodit z průběhu křivky zrnitosti hliněné složky. Při přimíchávání je nutné nejprve precizně promíchat hlínu s cementem a až poté přidávat vodu. Proces stabilizace cementovým tmelem se nejčastěji využívá ke zvýšení pevnosti a odolnosti. Proces zrání a vysychání trvá 28 dní a vyrobené prvky by měly být chráněny před přímým slunečním zářením a mrazem.

3.3 Vnitřní vazebné síly v zeminách

Exaktní popsání vazebných sil v zeminách a jejich zobecnění je velmi komplikované vzhledem ke komplexnosti a kvantu sil, které v hlině působí. Zrna písku a destičky jílu spolupůsobí s vodou obsaženou v pórech. Vzájemná rovnováha přitažlivých, odpudivých a vnitřních třecích sil vytváří vnitřní síly hlíny. Působení vnitřních vazebných sil je ovlivněno zrnitostí, způsobem přípravy, množstvím vody, mineralogickým složením a atmosférickými podmínkami.

Následující část je přímo převzata z těchto bibliografických zdrojů [7] a [8]:

3.3.1 Soudržnost

Soudržnost neboli koheze vzniká působením přitažlivých sil mezi jednotlivými zrny hlíny. Pokud jde o částice stejné látky hovoříme o působení tzv. *kohezní síly*. V mechanice zemin je *soudržnost c* vnitřním napětím, které společně s *vnitřním třením φ* zamezují vzniku síly, která by zeminu rozdělila podél roviny smykové plochy. Zemina se poruší smykem v rovině, kde smykové napětí překoná odpor ve smyku.

Podle [7] vyjadřujeme tuto pevnost zeminy jako smykovou pevnost danou vztahem:

$$\tau = c + \sigma tg\phi$$

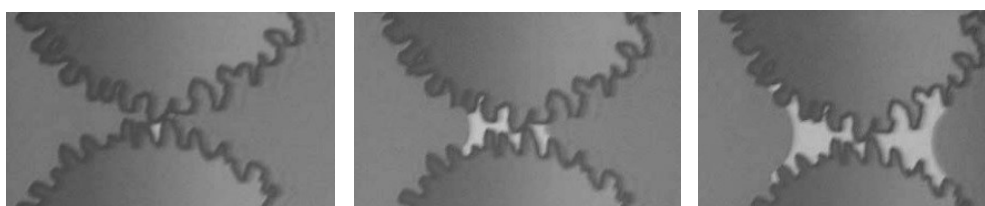
Vzorec 1 – Smyková pevnost zeminy

kde: σ = normálové napětí
 c = soudržnost
 ϕ = úhel vnitřního tření

3.3.2 Kapilární soudržnost

Jak bylo zmíněno v kapitole 3.1 voda se v zeminách vyskytuje v několika různých formách a její přítomnost má značný vliv také na vnitřní vazebné síly. Voda je vysoce porézní materiál, a proto je nutné uvážit i vliv vlhkosti způsobené kondenzací vodní páry na stěnách jejích pórů. V suchém stavu jsou zrna písku a destičky jílu obalená vzduchem a působí mezi nimi kohezní síly. Při kontaktu s vodou se do volného prostoru mezi zrna dostávají kapičky vody, které zrna postupně obalují. Vzniklé vazebné síly závisí jednak na hrubosti zrn a na velikosti kapilárního mostu mezi částicemi.

Písková zrna jsou pod mikroskopickým zvětšením hrubá. Podle [8] lze zobecnit 4 stavy kapilární soudržnosti písku v závislosti na drsnosti zrn:



Obrázek 36 - Stav drsného povrchu Obrázek 37 - Stav drsnosti Obrázek 38 - Klasický stav

- i. **Stav drsného povrchu** (asperity régime): Soudržná síla nelineárně roste se zvyšujícím se množstvím vody. Kondenzace probíhá pouze mezi nejbližšími povrchy zrn, které jsou v přímém kontaktu.

Kapilární síla je přibližně:

$$F_{cap} \approx \frac{\gamma_{LV}}{l_R} V^\alpha, \alpha \leq 1$$

Vzorec 2 – Kapilární síla za stavu drsného povrchu

- ii. **Stav drsnosti** (roughness régime): Kapalinové mosty se rozšiřují na sousední nerovnosti na povrchu zrn a kapilární síla roste lineárně s množstvím vody.

Kapilární síla odpovídá přibližně:

$$F_{cap} \approx \frac{\gamma_{LV}}{l_R^2} V_{liq}$$

Vzorec 3 – Kapilární síla za stavu drsnosti

- iii. **Klasický stav** (classical régime): Soudržná kapilární síla přestává být závislá na množství vody jako je tomu u dvou hladkých povrchů. Velikost a tvar nerovností přestává hrát roli a poloměr menisku odpovídá poloměru zrn.

Kapilární síla se blíží:

$$F_{cap} \approx 2\pi\gamma_{LV}R\cos\theta$$

Vzorec 4 – Kapilární síla za klasického stavu

- iv. **Nasycený stav** (saturated régime): Množství kapilární vody mezi jednotlivými zrny je tak vysoké, že kapalinové mosty začínají splývat a soudržnost se vytrácí.

V praxi mimo laboratorní prostředí je nutné uvážit kromě kapilárních sil také vliv relativní vlhkosti. U jílových částic vzhledem k malým vzdálenostem lze uvažovat s přitažlivými silami, které způsobuje *Laplaceův tlak* ΔP . V momentě, kdy kapilární mosty splynou, se jíl mění v bláto.

3.3.3 Elektrické a iontové polární síly

Jako v každé látce i zeminách působí mezimolekulární síly, které vznikají mezi atomy, ionty a molekulami. Podle [9] rozdělujeme tyto síly na:

- i. **Odpudivé síly:** Jejich původem je vzájemné elektrostatické odpuzování elektronových obalů u vnějších elektronů v molekulách materiálu.
- ii. **Přitažlivé síly:** Jde o elektrickou přitažlivost danou vzájemným vztahem poloh elektronů dvou molekul. Jako přitažlivé síly přezdívané kohezní označujeme: *Londonovy síly*, *van der Waalsovy síly*, *síly tvořící vodíkové můstky*, *polární síly* aj.

Z elektrických a iontových polárních sil mají nejhlubší význam *van der Waalsovy síly*, jejichž podstatou je vzájemné působení molekulových dipólů. *Van der Waalsovy síly* mohou nabývat poměrně vysokých hodnot, ale velmi rychle klesají při zvýšení vzájemných vzdáleností.

3.3.4 Vliv stabilizace cementem na vnitřní vazebné síly

Přimíchávání stabilizačních přísad jako je cement, vápno nebo bitumeny narušujeme jednotlivé fyzikální a chemické síly, které působí v čistě organických zeminách. Po jejich přimíchání vzniká široké kvantum minerálů, které ovlivňují vnitřní vazebné síly v zeminách a jejich zobecnění je téměř nemožné.

V případě cementu začínají jeho zrna hydratovat a vázat se na písčítá zrna v zemině. Tento proces je nevratný a je proto nutné množství stabilizační přísady předem zvážit. Cement se skládá z anorganických surovin a po přidání do hliněné směsi přestává být zemina čistě organickým materiálem, který se může snadno recyklovat a opětovně použít. Vnitřní vazebné síly působící mezi písčivými a cementovými zrny jsou silnější než síly působící v organických zeminách a jílové částice vyplňují mezery vzniklé v jejich okolí. Není tak zajištěné rovnoměrné spolupůsobení jílových a písčivých zrn s těmi cementovými a z materiálu vzniká jakási forma betonu s nízkým obsahem hydratovaného cementu navázaného na písčítá zrna.

Prvky z takto stabilizované hliněné směsi mají sice prokazatelně vyšší pevnost, ale kdybychom smíchali pouze písčitou složku a cement dosáhneme lepších výsledků.

3.4 Základní minerály

Jako minerály označujeme anorganické homogenní materiály, u kterých můžeme chemické složení vyjádřit konkrétním chemickým vzorcem.

Dnes používaný klasifikační mineralogický systém [10] dělí mineralogické systémy do deseti tříd. K jejich zařazení je nutné znát název, chemický vzorec, fyzikální vlastnosti jako je barva, lom, vryp, reakce na určité typy kyselin, hustotu, tvrdost, makroskopický vzhled, jejich krystalovou soustavu.

V tabulce 4 jsou uvedeny nejběžněji se vyskytující minerály zaříděné do mineralogického systému (H. Strutze) podle [11] a [12].

Tabulka 4 - Nejběžněji vyskytované minerály

Minerál	Vzorec	Třída
Křemeny	SiO_2	IV. třída oxidů
Sodnovápenaté živce – plagioklasy	$\text{Na-}, \text{Ca-}, \text{AlSiO}_8$	IX. třída křemičitanů
Draselné živce – ortoklasy	KAlSi_3O_8	
Uhlíčitany	CaCO_3 (kalcit)	V. třída karbonátů, nitrátů a sulfitů
	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomit)	

Jak bylo zmíněné v kapitole 3.2 přimíchání cementové stabilizace způsobuje následné hydratování cementových zrn a vznik slínkových minerálů, které jsou pro účely experimentální části uvedeny v tabulce 5 [13].

Tabulka 5 - Hlavní minerály v portlandském slínku

Minerál	Vzorec
Trikalciumsilikát (alit)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (\text{C}_3\text{S})$
Dikaliumsilikát (belit)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (\text{C}_2\text{S})$
Trikalciumaluminát (amorfní fáze)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{C}_3\text{A})$
Tetrakalciumaluminátferit (celit)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{C}_4\text{AF})$

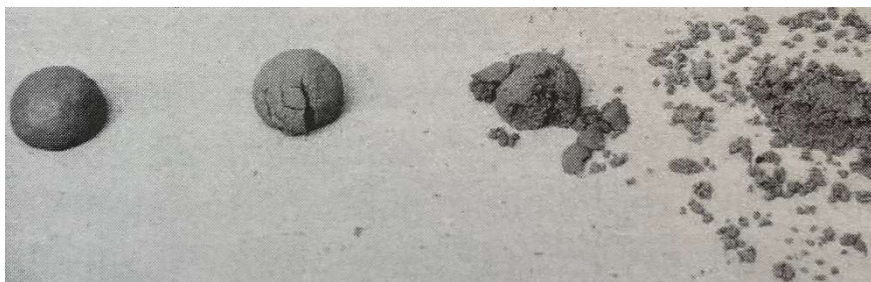
4 Popis prováděných mechanicko-fyzikálních zkoušek

V následujících podkapitolách budou popsány polní a laboratorní zkoušky, které byly provedeny při optimalizaci hliněné směsi a ke stanovení mechanicko-fyzikálních vlastností cihel a dalších použitých materiálů v rámci experimentální části práce.

4.1 Polní zkoušky

Zkouška volným pádem

Vzorek hlíny, který chceme zkoušet musí být dostatečně suchý, aby z něj bylo možné vyrobit kouli s průměrem přibližně 4 cm. Poté je koule spuštěna z výšky cca 1,5 m volným pádem na zem. Podle způsobu porušení po dopadu můžeme odhadnout, jestli se jedná o jílovou nebo písčitou hlínu.

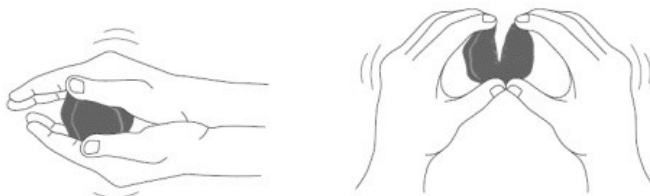


Obrázek 39 - Hlína po zkoušce volným pádem, zdroj: [1]

Na obrázku 37 můžeme vidět 4 různě způsoby porušení po dopadu hliněné koule na zem. Vlevo vidíme zploštěnou hrudku bez trhlin, to znamená, že je hlína příliš jílovitá a pro práci s ní by musela být „odtučněna“. Naopak vpravo se koule naprosto rozpadla a vykazuje malou pojivovou schopnost. V tomto případě jde o písčitou hlínu. Ideální pro výrobu nepálených hliněných cihel je stav vlevo uprostřed, kdy se hliněná koule poruší, ale stále zachovává svůj tvar.

Tzv. „ball test“

Obdobou zkoušky volným pádem ke zjištění, jestli je zemina připravená k použití, je tzv. „ball test“, kdy zformujeme hliněnou kouli, která je posléze rozlomena na 2 části. Pokud se hlína příliš nedrolí ani nelepí, je připravena k použití.



Obrázek 40 - "Ball test", zdroj: [15]

Kromě zkoušky volným pádem a „ball testu“ můžeme empirickými zkušebními postupy stanovit i další základní vlastnosti hlíny bez nutnosti speciálního vybavení. Pokud má hlína neutrální zápach, pravděpodobně neobsahuje organické látky apod. Některé vlastnosti jsou patrné na první pohled, jiné vyžadují odbornější posouzení. Dále budou popsány zkoušky, které jsou buď prováděny v laboratorním prostředí, nebo vyžadují použití speciálních přístrojů.

4.2 Stanovení objemové hmotnosti

Stanovení objemové hmotnosti vychází ze základní definice hustoty materiálu, která je dána podílem hmotnosti a objemu tělesa, tedy $\rho = m / V$. Objemovou hmotnost hlíny můžete jednoduše stanovit jejím zvážením v nádobě se známým objemem. Podle [16] stanovíme objemovou hmotnost ze vztahu:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

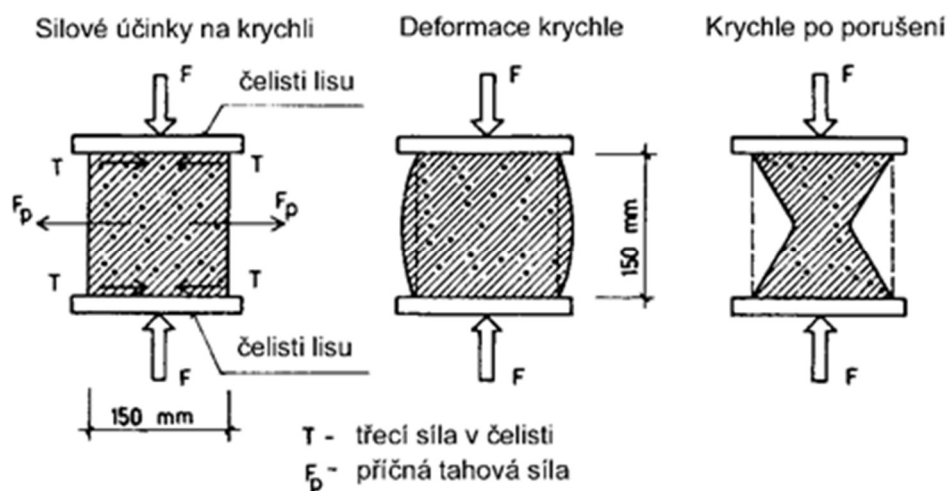
Vzorec 5 – Objemová hmotnost

kde: ρ = objemová hmotnost materiálu [kg/m^3]
 m_1 = hmotnost prázdné nádoby [kg]
 m_2 = hmotnost naplněné nádoby materiálem [kg]
 V = objem nádoby [m^3]

Stejným způsobem můžeme stanovit o objemovou hmotnost již vyrobených cihel, jen v čitateli zlomku místo m_1 a m_2 bude přímo hmotnost cihly a jako V její objem.

4.3 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku se stanovuje zatěžovacím lisem, kdy lis vyvíjí tlakovou sílu, která se zvyšuje až do porušení zkoušeného vzorku. Při provádění této zkoušky u nepálených hliněných cihel je doporučení zbavit je všech nerovností, případně potřít vyrovnávací sádrovou vrstvou. Rovnost zajistí rovnoměrné rozložení zatěžovací síly po celé roznášecí ploše, na kterou tlačí.



Obrázek 61 - Ukázka zatěžovací zkoušky (beton), zdroj: [17]

Pevnost v tlaku je podle [18] dána vztahem:

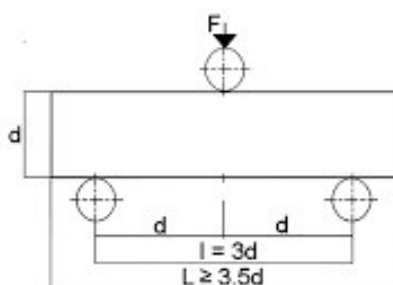
$$f = \frac{F}{A}$$

Vzorec 6 – Pevnost v tlaku

kde: f = pevnost v tlaku [MPa = N/mm²]
 F = maximální zatěžovací síla při porušení [N]
 A = průřezová plocha zkušebního tělesa [mm²]

4.4 Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu stanovujeme na trámečkách obvykle o rozměrech 40 mm x 40 mm x 160 mm. Zkušební stroj, na kterém se zkouška pevnosti v ohybu provádí, je tvořen dvěma ocelovými podpěrnými válci. Třetí válec je umístěn shora ve vzdálenosti uprostřed dva podpěrné válce. Vzorek umístíme na jednu z delších stran a stlačíme. Po přelomení trámečků může na jejich zbytcích provedena následná zkouška pevnosti v tlaku.



Obrázek 42 - Trámeček umístěný mezi 3 zatěžovací válce, zdroj: [20]

Pevnost v tahu za ohybu se podle [20] spočítá jako:

$$f = 1,5 \frac{F \times l}{b \times d^2}$$

Vzorec 7 – Pevnost v ohybu

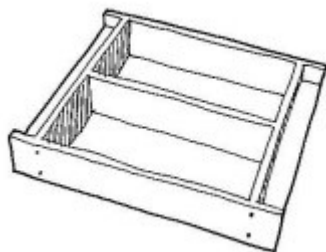
kde: F = maximální zatěžovací síla při porušení [N]
 l = vzdálenost mezi podpěrnými válci [mm]
 b = šířka zkušebního tělesa [mm]
 d = výška zkušebního tělesa [mm]

Zkouška pevnosti v ohybu bude v experimentální části provedena u hliněné malty použité ke zdění pilířů z nepálených hliněných cihel.

5 Technologie výroby nepálených hliněných cihel

Nepálené hliněné cihly byly historicky používané na všech územích mírného, subtropického i tropického pásu, důkazem jsou například pozůstatky egyptského zádušního chrámu Ramesse II zmíněného v kapitole 2.1, kde byly hliněné cihly použity i k výstavbě klenbových konstrukcí. Dnes se nepálené hliněné cihly vyrábí primárně dvěma způsoby:

- i. **Ručně** – Výroba ručně tvarovaných hliněných cihel se provádí buď prudkým vhažováním „válků“ hlíny, anebo precizním postupným pěchováním do forem různých tvarů, které jsou obvykle vyrobeny ze dřeva nebo oceli.



Obrázek 45 - Formy na výrobu hliněných cihel, zdroj: [14]

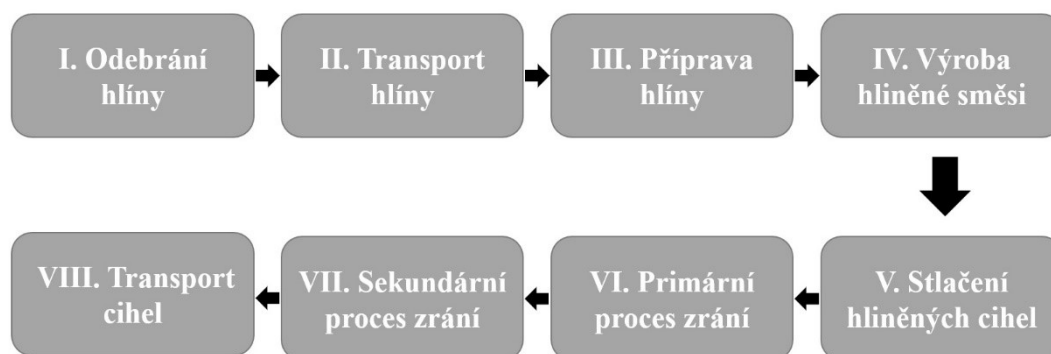
- ii. **Pomocí lisů** – Manuální lisovací stroje na výrobu nepálených hliněných cihel se začali používat v 18. století ve Francii. Dnes se běžně využívají ve státech Jižní Ameriky, Africe, ale i Evropě, například v Portugalsku a Španělsku. Fungují na principu jednoduché páky, která stlačuje hliněnou hlínu a působením tlakové síly následně stlačuje nepálené hliněné cihly. Kromě jednoduchých manuálních lisů existují také složitější hydraulické lisy, které jsou schopné vyvolat větší stlačující sílu a umožňují průmyslový způsob výroby.



Obrázek 46 - Jednoduchý manuální lis na výrobu hliněných cihel, zdroj [15]

V rámci experimentální části práce budou nepálené hliněné cihly vyrobeny pomocí manuálního lisu, proto se bude popis technologie výroby nadále zaměřovat na tento způsob zhotovení cihel.

Na schématu níže je výrobní proces rozdělen do 8 etap, které je před zahájením samotné výroby hliněných cihel nutné uvážit v rámci harmonogramu výstavby.



Každý stavitel by měl před zahájením stavebních prací položit tři fundamentální otázky:

- Kolik cihel jsem schopný za den vyrobit?
- Jakou zeminu budu k výrobě cihel používat?
- Kde budou hliněné cihly vyráběny, skladovány a sušeny?

Odpovědi na tyto otázky závisí jednak na způsobu výroby cihel, ale také počtu osob, které se budou výrobního procesu účastnit. K obsluze jednoho manuálního lisu je potřeba přibližně 3-4 osoby, aby byl plně využit jeho potenciál. Zemina sejmутá k výrobě hliněných cihel by měla být alespoň 40 cm pod povrchem, aby byly eliminovány nežádoucí organické zbytky rostlin a jiné příměsi. K určení vhodnosti zeminy můžeme provést několik polních zkoušek jako je např. sedimentace a prosévací zkouška, které určí podíl zrnitých částic různých frakcí. Po odebrání hlíny je důležité zvolit vhodné místo na vyrábění, skladování a sušení cihel. Cihly jsou v čerstvém stavu velmi křehké a je vhodné je skladovat v blízkosti místa výroby. Ideální je vyrábět cihly přímo v místě stavby, aby nemusely být převáženy. Během procesu zrání by měly být cihly chráněny před přímým slunečním zářením a mrazem, aby nedocházelo k nadměrnému vysychání a vzniku trhlin.

Zodpovězení těchto základních otázek vede k definování těchto aspektů:

- Potřebné množství hlíny
- Jaký způsob výroby hliněných cihel zvolit
- Nutnost a způsob stabilizace hliněné směsi
- Zvolit vhodný transport materiálu a cihel
- Počet osob potřebných k výrobě cihel

Nejzásadnější krok v celém procesu výroby nepálených hliněných cihel je určení vhodné hliněné směsi. Zda je směs vhodná k výrobě cihel a jaké množství písku, vody a jiných příměsí je nutné přidat, abychom vytvořili optimální hliněnou směs, nám pomáhají rozhodnout polní a laboratorní zkoušky. Každá hlína je jiná a před prací s ní by měla být podrobená zkouškám, které určí její chování, složení a možnosti využití.

V následujících podkapitolách je obecně popsán proces výroby nepálených hliněných cihel na manuálním lisu. K výrobě cihel zkoušených v experimentální části byly použity dva různě lisy. Jeden lis byl zapůjčený a druhý vyroben na základě zkušeností získaných při práci se zapůjčeným lisem. Popsán je také návrh a výroba prototypu vylepšeného lisu, který přispěl k optimalizaci výrobního procesu. V poslední řadě bude popsán způsob a postup zdění 3 různých pilířů vyzděných z lisovaných hliněných cihel, které budou v rámci experimentální části podrobeny zatěžovací zkoušce, při níž bude zkoumán vliv způsobu zdění na únosnost a deformaci.

5.1 Lis a optimalizace výrobní technologie

Výrobní proces cihel byl rozdělen do tří etap. V první etapě byl k lisování cihel zapůjčen manuální lis vyrobený v Číně. Cílem této fáze bylo jednak osvojit si práci s lisem a optimalizovat výrobní proces, ale také navrzení prototypu nového vylepšeného lisu na základě získaných zkušeností a poznatků.

Během 2 dnů bylo vyrobeno 191 kusů plných a 71 kusů půlených cihel. Lis umožňoval výrobní proces o rychlosti přibližně 20 kusů za hodinu, pokud jeho obsluhu zajišťovaly 3-4 osoby současně. Hmotnost lisu se pohybuje kolem 300 kg a pro manipulaci s ním nainstaloval jeho majitel provizorní kolečka. Podvozek lisu má rozteč kol 150 cm s celkovou délkou 230 cm. Šířka stroje činí 98 cm. Zapůjčený lis je vidět na obrázku 47.



Obrázek 47 - Zapůjčený manuální lis využitý během I. etapy, foto: autor

Na základě získaných zkušeností byla navržena tato vylepšení:

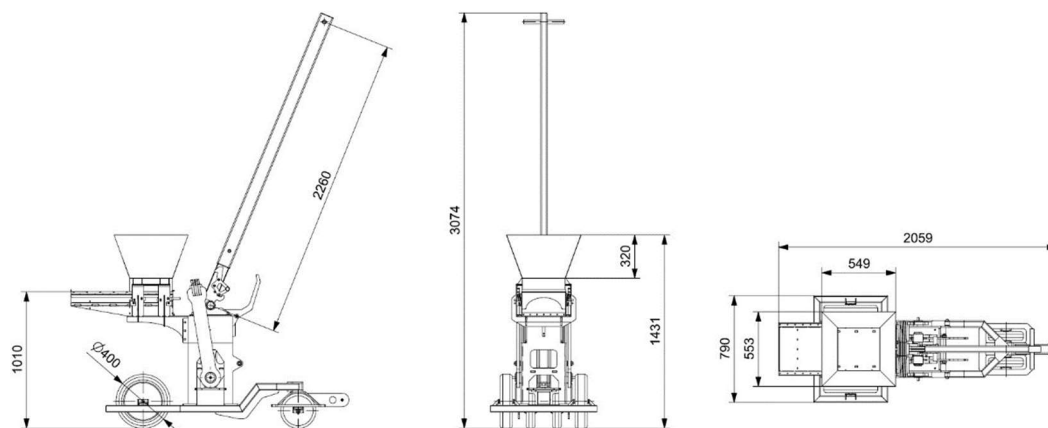
- Větší pýchovací zásobník
- Integrovaná pojízdná kolečka pro manipulaci se strojem
- Možnost snadného rozložení lisu pro transport
- Variabilní výška lisovací formy
- Sofistikovanější pojízdný zásobník plnící lisovací formu
- Pomocné pružiny na snížení fyzické námahy během lisování

Následně byl na zakázku českou firmou Cut-Tech s.r.o. vyroben vylepšený prototyp manuálního lisu. Oba lisy fungují na stejném principu popsaném v kapitole 5.2.



Obrázek 48 - Jednotlivé díly vylepšeného prototypu manuálního lisu, foto: autor

Vylepšený lis jsme složili za necelých 120 minut ve třech lidech. Lis byl navržen tak, aby umožňoval snadné rozložení na 3 menší části, které se při transportu vejdou společně na jednu klasickou paletu s půdorysným rozměrem 120 x 80 cm.



Obrázek 49 - Výkres vylepšeného manuálního lisu, zdroj: Cut-Tech s.r.o.

Nový manuální lis byl po sestavení převezen na Stavební fakultu ČVUT a využit k výrobě cihel v druhé a třetí etapě, kdy byl o ověřován vliv cementové stabilizace a koncování na mechanické vlastnosti cihel. V těchto etapách bylo vyrobeno celkem 145 kusů plných a 65 půlených cihel. Větší délka lisovací páky a pomocné pružiny snížily sílu F [kN] potřebnou ke konsolidaci cihel v lisovací formě. Přesně definovat lisovací sílu nelze a jde tedy pouze o pocitové zlepšení při práci s lisem. Konstrukce lisu umožňuje vyvolat maximální sílu $F_{\max} = 790$ kN, což odpovídá lisovacímu tlaku na cihle $f_{\max} = 10$ MPa. Rychlost výrobního procesu vzrostla o 50 % na 30 cihel za hodinu při aktivním zapojení tří osob.



Obrázek 50 - Sestavený prototyp vylepšeného manuálního lisu, foto: autor

5.2 Výroba vzorků

V této podkapitole bude popsán obecný postup výroby nepálených hliněných pomocí manuálního lisu. Postup je shodný pro zapůjčený a nově vyrobený lis a lze dle něho postupovat při práci s jakýmkoliv běžným typem lisu fungujícím na shodném principu konsolidace cihel.

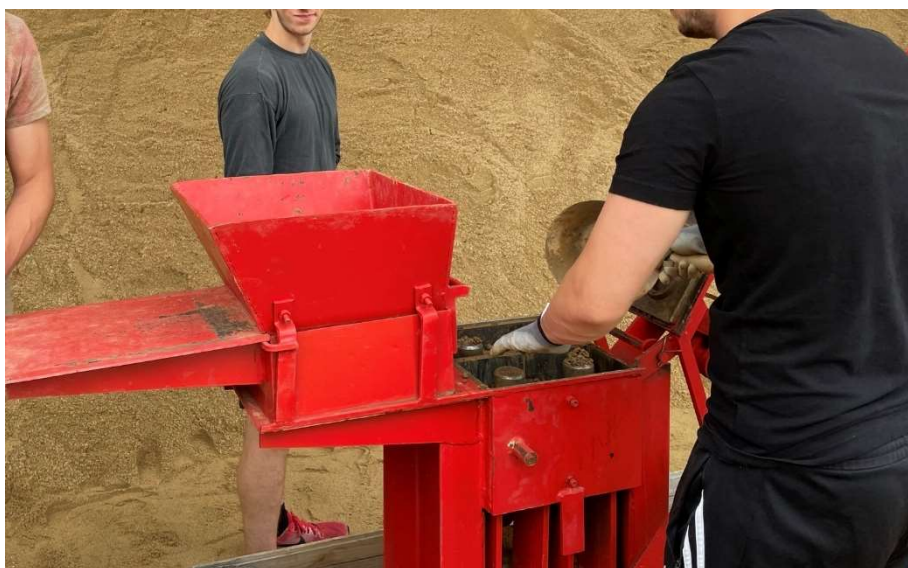
- i. **Příprava směsi:** Hlínu zbavenou nežádoucích materiálů, velkých kamenů a balvanů smícháme s ostatními složkami určených k výrobě směsi, např. příměsí písku, prachu a šterku. U stabilizovaných směsí přimícháme stabilizační přísadu. Po smíchání sypkých složek do směsi přidáme záměsovou vodu.

Jednotlivé složky smícháme. V našem případě byla použita ruční míchačka a vanička o objemu 200 litrů (viz obrázek 51), aby byla zachována kvalita a plynulost stlačování. S přibývajícím množstvím materiálu klesá kvalita promíchání, není proto vhodné spolu smíchávat jednotlivé složky o velkých objemech. Ideální je smíchávat postupně a v menším množství.



Obrázek 51 - Příprava hliněné směsi, foto: autor

- ii. **Pěchování zásobníku hliněnou směsí:** Manuální lis disponuje pěchovacím trychtýřem uloženým nad posuvným zásobníkem, který funguje na principu „šuplíku“ a umožňuje rychlé plnění forem, ve kterých jsou cihly následně konsolidovány.



Obrázek 52 - Pěchovací trychtýř manuálního lisu, foto: autor

Pokud je směs dostatečně sypká je manipulace snadná a posuvný zásobník plně naplní stlačovací formu materiálem. V případě, že směs obsahuje více jílových částic a je lepivá je nutné materiál ručně ztuhnout přímo ve stlačující formě.

- iii. **Lisování cihel:** Nejzásadnějším krokem při výrobě cihel je jejich lisování, které má společně s vlastnostmi hliněné směsi největší vliv na jejich finální mechanické a fyzikální vlastnosti. Před samotným lisováním je vhodné ošetřit stěny stlačujících forem ochranným nátěrem (např. teflonovým sprejem TF2), aby se cihly během lisování nepřilepily ke stěnám forem a nedošlo k jejich porušení při extrakci z lisu.



Obrázek 53 - Lisování cihel, foto: autor

Lis funguje na jednoduchém principu páky. Velikost lisovací síly F [kN] ovlivňuje stlačitelnost používané hliněné směsi a síla, kterou je osoba působící na páku lisu schopna fyzicky vyvinout. Čím horší stlačitelnost směsi, tím větší silou je potřeba působit. Obecně platí, že cihly ze stejné hliněné směsi stlačené větší silou vykazují lepší mechanickou odolnost.

- iv. **Odebrání vylisovaných cihel:** Lisovací formy umožňují vyrábět dvě plné cihly současně. Pro výrobu cihel půlených vložíme do forem separační přepážku, která umožní vyrobit místo jedné plné cihly dvě o polovičních rozměrech.



Obrázek 54 - Čerstvě vylisované cihly, foto: autor

Cihly v čerstvém stavu jsou poměrně křehké a nevhodná manipulace s nimi může způsobit vznik trhlin, deformaci a následné porušení. Proto je ideální umístit odkladní místo, kde budou cihly vysychat, v blízkosti samotného lisu.

- v. **Skladování cihel:** Vylisované cihly je nutné nechat vyschnout. Tento proces se dělí na primární a sekundární. Primární proces trvá přibližně 7 dní a v tomto období dochází k největšímu smrštění vlivem postupného snižování objemu vody. V této fázi by měly být cihly uloženy na rovném povrchu a v jedné řadě, aby byl proces vysychání rovnoměrný na všech místech. Sekundární proces trvá obvykle od 7. do 28. dne od stlačení. Po uplynutí této doby mohou být cihly vyskládány na sebe a transportovány na místo stavby.



Obrázek 55 - Vyskládané čerstvě vylisované cihly, foto: autor

Cihly by neměly být umístěny na přímém slunečním světle, aby nedošlo k nadměrnému vysychání a vzniku trhlin. Teploty by neměly klesnout pod bod mrazu, protože částice vody při krystalizaci z kapalného do pevného skupenství zvětšují svůj objem a mohou tak narušit strukturu cihel zevnitř.



Obrázek 56 - Přikryté čerstvě vylisované cihly, foto: autor

Na dobu vysychání mají vliv vnější podmínky v prostředí, kde jsou cihly uskladněny a také způsob stabilizace. Proces vysychání je cyklický a nekonečně dlouhý a probíhá i po zabudování cihel do konstrukce.

- vi. **Transport hliněných cihel:** Po uplynutí primárního a sekundárního procesu vysychání jsou cihly dostatečně pevné na to, aby mohly být převezeny na staveniště, případně vhodnější skladní místo.



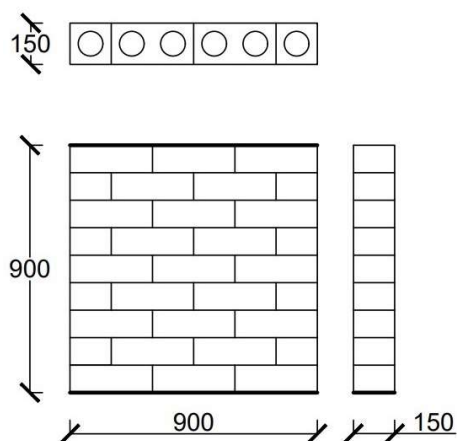
Obrázek 57 - Nakládání cihel před jejich transportem, foto: autor

Otřesy a vibrace vznikající při převozu cihel mohou způsobit porušení cihel. Výrobní proces je proto vhodné naplánovat tak, aby vzdálenost a četnost transportu byla minimální. Transport může současně posloužit jako první zátěžový test, který ověří mechanickou odolnost cihel.

5.3 Zdění pilířů

Pro druhou část experimentální části práce byly vyzděny tři pilíře z hliněných cihel vyrobených na zapůjčeném manuálním lisu. Cílem bylo porovnat vliv tří různých zdících technik na deformaci při zátěžové zkoušce. V případě I. pilíře šlo o zdění na sucho, kdy byly cihly pouze vyskládány na sebe v křížové vazbě. U II. pilíře byly cihly ukládány na hliněnou maltu, která byla nanášena ve styčných i ložních spárách. Při zdění III. pilíře byl zopakován stejný postup jako u II. pilíře, s tím rozdílem, že svislé otvory v cihlách byly po celé výšce dodatečně vyztuženy betonem a ocelovou výztuží. V této kapitole bude popsán postup při zdění jednotlivých pilířů.

I. Pilíř zděný na sucho



Obrázek 58 - Pilíř zděný na sucho

Pilíř zděný na sucho byl vyskládán, stejně jako ostatní pilíře, z 23 plných a 8 půlených cihel, aby byla zachována křížová vazba pilíře. Po vyskládání měl pilíř čtvercový tvar o rozměrech 90 x 90 cm a šířce 15 cm.



Obrázek 59 - Maltové lože, foto: autor



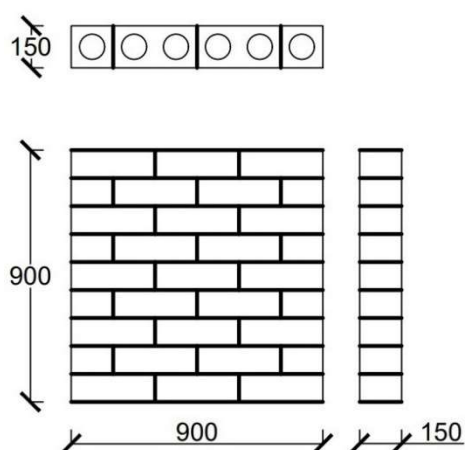
Obrázek 60 - Zdění pilíře, foto: autor



Obrázek 61 - Vyzděný pilíř I., foto: autor

Všechny pilíře byly vyzděny na roznášecích deskách, aby byla umožněna následná manipulace s celým pilířem. Jako podkladní vrstva bylo na roznášecích deskách nanášeno maltové lože z hliněné malty (viz obrázek 59), aby byly vyrovnány povrchové nerovnosti a zaplněny případné póry na povrchu cihel, které by mohly mít negativní vliv na rozložení zatěžovací síly při zatěžovací zkoušce.

II. Pilíř zděný na hliněnou maltu



Obrázek 62 - Pilíř zděný na hliněnou maltu

Stejně jako v případě I. pilíře byl i tento uložen na maltové lože z hliněné malty na roznášecí desce. Stejná hliněná malta, která byla použita jako podkladní vrstva byla v tomto případě nanášena do ložních a styčných spár ve vrstvě 1-2 cm.

Hlína použitá k výrobě hliněné malty byla odebrána ze stejné lokality jako hlína určená k výrobě cihel. Tentokrát nebyla hlína odtučňována přimícháváním pískové složky, pouze byla proseta separačním sítem o velikosti $D_{\max} = 4$ mm. Po odstranění zrn větších jak 4 mm byla přimíchána voda.

Na obrázcích 63 a 64 můžeme vidět prosévání hlíny na separačním sítu k výrobě hliněné malty a následně vyzděný pilíř na hliněnou maltu.

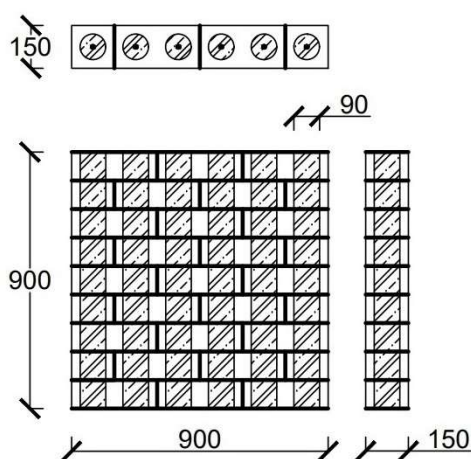


Obrázek 63 - Prosévání hlíny, foto: autor Obrázek 64 – Hl. malta v ložní spáře, foto: autor



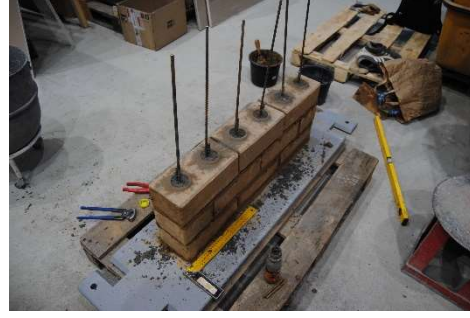
Obrázek 65 - Vyzděný pilíř II, foto: autor

III. Pilíř vyztužený betonem a ocelovou výztuží



Obrázek 66 - Pilíř vyztužený betonem a ocelovou výztuží

Otvory v hliněných cihlách o poloměru $r = 30$ mm snižují vlastní tíhu cihel, ovlivňují proces vysychání a mají vliv na součinitel prostupu tepla konstrukce. Krom toho po vyskládání cihel vytvářejí prostor, který lze využít jako ztracené bednění. Pilíř III byl vyzděn stejně jako pilíř II na hliněnou maltu a posléze dodatečně vyztužen přidáním ocelové výztuže a zalitím vzniklých otvorů čerstvým betonem.



Obrázek 67 - Vyztužování pilíře, foto autor Obrázek 68 - Provazování výztuže, foto: autor



Obrázek 69 - Vyzděný pilíř III, foto: autor

Pilíře byly vyztužovány ocelovou výztuží $\varnothing = 8$ mm a pytlovaným výplňovým betonem pevnosti C 16/20 s kamenivem $D_{max} = 8$ mm. Vyztužovací proces byl rozdělen na tři fáze vždy po třech řadách cihel. V každé ze tří fází byla vložena ocelová výztuž, která byla provázána a zalita výplňovým betonem (viz obrázky 67 a 68). U hliněných cihel v poslední svrchní řadě u všech tří pilířů byla provedena povrchová úprava zaříznutím vyčnívajících výstupků. Před zatěžovací zkouškou byla ještě přidána horní roznášecí deska, která byla uložena na podkladní sádrovou vrstvu kvůli zarovnání povrchové nerovnosti a zaplnění pórů (viz obrázek 69).

6 Experimentální část

V experimentální části budou popsány jednotlivé výrobní suroviny a postup při optimalizování hliněné směsi. U hliněné směsi použité k lisování nepálených hliněných cihel bude proveden granulometrický a mineralogický rozbor. Vyrobené cihly budou společně s ostatními materiály podrobeny mechanickým zkouškám popsaným v kapitole 4. U hliněných cihel bude zkoumán především vliv stabilizace a povrchové úpravy cihel na pevnost v tlaku. V druhé části experimentu budou zhotovené pilíře podrobeny zatěžovací zkoušce sloužící ke zkoumání vlivu způsobu zdění na jejich únosnost a deformaci.

6.1 Výrobní suroviny a výrobní směs

Hlína použitá k výrobě nepálených hliněných cihel byla odebrána ze stavby umístěné v městské části Zbraslav na jihu Prahy, kde byla označena za odpadní materiál, který zde zůstal po úpravě terénu.



Obrázek 70 - Odebírání hlíny, foto: autor



Obrázek 71 - Převoz hlíny, foto: autor



Obrázek 72 - Hlína převezena na místo výroby cihel, foto: autor

Odebraná hlína je z hloubky minimálně 40 cm pod úrovní terénu, aby byla předem eliminována většina nežádoucích organických složek. Hlína byla po převozu zbavena větších kamenů, balvanů, organických zbytků a dalších nežádoucích materiálů.

6.1.1 Optimalizace hliněné směsi

V sejmuté hlině byly již zastoupeny jílové, prachové, pískové i štěrkové částice. Pro regulaci pojivých jílových složek byla hlína takzvaně odtučněna přimícháním pískové složky.

Bylo vyrobeno celkem 15 vzorků cihel ve dvou výrobních sadách. I. výrobní sada sloužila k určení vhodného množství přimíchávané pískové složky a II. výrobní sada k optimalizování potřebného množství záměsové vody ve směsi.

Tabulka 6 - Množství složek hliněné směsi pro I. výrobní sadu

Vzorek	Výrobní sada	Datum	Hlína	Písek	Voda
			[dm ³]	[dm ³]	[l = dm ³]
1	I.	25.4.2021	19.5	19.5	0.5
2	I.	25.4.2021	19.5	19.5	1.25
3	I.	25.4.2021	19.5	19.5	0.75
4	I.	25.4.2021	19.5	19.5	0.75
5	I.	25.4.2021	19.5	19.5	0
6	I.	25.4.2021	27.3	11.7	0
7	I.	25.4.2021	39.1	0	0
8	I.	25.4.2021	35.2	3.9	0
9	I.	25.4.2021	31.3	7.8	0

Vyrobené cihly se nechaly vyschnout po dobu 28 dní. Vzorky 1-5 z I. výrobní sady, kde byl poměr hliněné a pískové složky 1:1 měly deformovaný tvar, drotily se, rozpadaly a tvořily se na nich trhliny. Vzorek 7, který byl vyroben ze 100% hliněné složky v čerstvém stavu vykazoval lepší soudržnost, ale po vyschnutí se drotil a nebyl dostatečně pevný. Jako nejvhodnější byl vyhodnocen vzorek 9 s 80 % hliněné složky a 20 % pískové příměsí, který vykazoval nejlepší soudržnost v čerstvém i vyschlém stavu a nejméně se drotil a deformoval. V tabulkách 6 a 7 je uvedeno množství jednotlivých složek v sadách I a II.



Obrázek 737 - Ball test (1),
foto: autor



Obrázek 74 Ball test (2),
foto: autor



Obrázek 75 - Ball test (3), foto:
autor

U každé vyrobené směsi byla provedena polní zkouška volným pádem a „ball test“ (viz. podkapitola 4.1).

Na obrázku 76 jsou ukázány jednotlivé vzorky. Manuální lis umožňuje výrobu půlených a celých cihel. S půlenými cihlami se v čerstvém stavu snadněji manipuluje, protože jsou lehčí a jejich těžiště se nachází v otvoru uprostřed cihly. U vzorků s větším podílem pískové složky bylo možné zhotovit pouze cihly půlené, protože směs neobsahovala dostatečné množství pojivové jílové složky.



Obrázek 76 - Vzorky z I. výrobní sady, foto: autor

U II. výrobní sady byl zachován poměr hliněné a pískové složky 4:1 a testovala se zpracovatelnost hliněné směsi v závislosti na množství přidané záměsové vody v intervalech od 0 do 2 litrů.

Tabulka 7 - Množství složek hliněné směsi pro II. výrobní sadu

Vzorek	Výrobní sada	Datum	Hlína	Písek	Voda
			[dm ³]	[dm ³]	[l = dm ³]
10	II.	5.6.2021	31.3	7.8	0
11	II.	5.6.2021	31.3	7.8	0.5
12	II.	5.6.2021	31.3	7.8	1
13	II.	5.6.2021	31.3	7.8	1.5
14	II.	5.6.2021	31.3	7.8	2
15	II.	5.6.2021	31.3	7.8	1

V případě II. výrobní sady se u všech hliněných směsí povedlo vyrobit celé cihly s minimálními známkami deformace, jak je patrné z obrázku 77. S množstvím záměsové vody se zlepšovala zpracovatelnost hliněné směsi a její optimální množství bylo stanoveno na 0,5 – 1 litrů. Při větším množství vody byla směs příliš lepivá, vznikalo více trhlin a zjevně docházelo k většímu smrštění vlivem vysychání. Vhodné množství záměsové vody závisí také na množství vody vázané, kapilární a mimo jiné na relativní vlhkosti ve vzduchu (viz. podkapitola 3.1.3). Proto je dobré před výrobou cihel vždy udělat několik zkušebních vzorků a množství záměsové vody optimalizovat pro konkrétní podmínky.



Obrázek 77 - Vzorky z II. výrobní sady, foto: autor

6.1.2 Zrnitost hliněné směsi

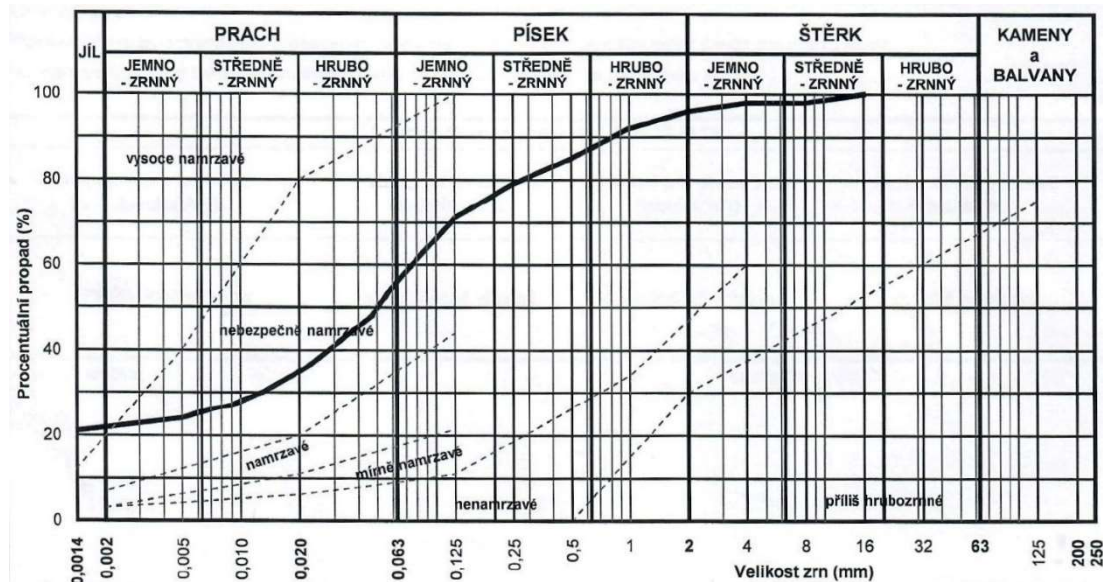
Pro výchozí hliněnou směs byl proveden granulometrický rozbor podle ČSN EN ISO 17892-4. Pro částice větší jak 0,063 mm byl podíl zrn určen prosévací zkouškou a pro zrna menší než 0,063 mm byla provedena sedimentace. Rozbor se dělal pro již smíchanou směs obsahující 80 % hlíny odebrané ze stavby ve Zbraslavi a 20 % písku frakce 0/4.

Tabulka 8 - Dílčí zrnitostní složení

Dílčí zrnitostní složení		
Typ zrn	Značka	Zastoupení
prachová zrna	F	56 %
písková zrna	S	40 %
šterková zrna	G	4 %

Podle ČSN 73 6133 byl určen podíl dílčího zrnitostního složení s převažujícím obsahem 56 % prachových částic (F), 40 % pískových zrn (S) a 4 % šterkových zrn (G). Viz tabulka 8.

Z výsledků prosévací zkoušky a sedimentace byl sestrojen semilogaritmický graf – tzv. křivka zrnitosti.



Graf 5 – Křivka zrnitosti podle ČSN EN ISO 17892-4

Hliněná směs byla zatříděna jako F3 MS – písčité zemina. Kromě granulometrického rozboru byla současně stanovena přirozená vlhkost W_n podle ČSN EN ISO 17892-1 a konzistenční meze tekutosti W_L a plasticity W_P a následně index plasticity I_p podle ČSN EN ISO 17892-12, viz tabulka 9.

Tabulka 9 - Stanovené vlastnosti hliněné směsi

Značka	Parametr	Hodnota
		[%]
W_n	Přirozená vlhkost	15.9
W_L	Mez tekutosti	64
W_P	Mez plasticity	52
I_p	Index plasticity	12

Plasticita vzorku stanovená kuželovou metodou 80 g/30° byla $W_L = 64$ % vypovídá o vysoké plasticitě materiálu a index plasticity $I_p = 12$ % zatřídí směs jako hliněnou.

6.1.3 Mineralogické složení hliněné směsi

Podle obsahu minerálů určujeme především vhodný způsobu stabilizace. Rozbor ze vzorku hliněné směsi byl proveden v laboratoři tzv. rentgen-fluorescenční spektrometrií (XRF) na Vysoké škole chemicko-technologické v Praze.

Tabulka 10 - Výsledky rentgen-fluorescenční spektrometrie

Prvek	Vzorec	Množství
		[% hm.]
Oxid křemičitý	SiO ₂	69.06
Oxid hlinitý	Al ₂ O ₃	16.33
Oxid železitý	Fe ₂ O ₃	5.57
Oxid draselný	K ₂ O	2.71
Oxid hořečnatý	MgO	1.91
Oxid vápenatý	CaO	1.47
Oxid titaničitý	TiO ₂	1.19
Oxid sodný	Na ₂ O	1.11
Ostatní		0.65

V tabulce 10 jsou vypsány výsledky provedené rentgen-fluorescenční spektrometrie. Podle očekávání je nejčastěji vyskytujícím se prvkem SiO₂ (69,06 % hm.). Hojně zastoupené jsou latentní hydraulické příměsi Al₂O₃ (16,33 % hm.) a Fe₂O₃ (5,57 % hm.), které mohou mít pozitivní efekt při stabilizaci cementem a podpořit tvorbu pevné fáze C-S-H gelu. Velmi nízký obsah CaO (1,47 % hm.) může mít negativní vliv na průběh karbonatizace při stabilizování vápnem.

6.1.4 Složení jednotlivých hliněných směsí

Na základě provedených zkoušek byly stanovena tři různá složení hliněných směsí. Hliněná směs pro čistě organické nestabilizované cihly a cihly stabilizované 9% příměsí cementu 32,5 R od firmy CEMEX. Dále bylo určeno složení hliněné směsi pro výrobu hliněné malty, která byla použita při zdění pilířů. Procentuální podíl jednotlivých složek hliněných směsí jsou vypsány v tabulce 11.

Tabulka 11 - Složení jednotlivých hliněných směsí

Složení hliněných směsí				
	Hlína	Písek 0/4	Záměsová voda	Stabilizace
	[%]	[%]	[%]	[%]
Hliněné cihly bez stabilizace	80	20	1.3-2.5	bez stabilizace
Hliněné cihly s cementovou stabilizací	73	18	1-2	9 % cementu
Hliněná malta	90	0	10	bez stabilizace

6.2 Mechanické vlastnosti použitých materiálů

V této podkapitole budou uvedeny výsledky jednotlivých mechanických zkoušek všech použitých materiálů.

6.2.1 Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu hliněné malty, která byla použita při zdění pilířů z hliněných cihel, byla stanovena podle ČSN EN 1015-11 (72 2400).

Tabulka 12 - Pevnost v ohybu hliněné malty

Pevnost v ohybu hliněné malty									
Vzorek	Rozměry			Váha	Síla při porušení	Pevnost v ohybu	Průměrná pevnost v ohybu	Smrštění	Objemová hmotnost
	d	š	v	m					
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]					
1	148	38	39	0.387	0.4	1.07	1.82	7.50	1764.42
2	149	39	39	0.412	0.7	1.77		6.88	1817.95
3	149	38	39	0.399	0.7	1.86		6.88	1806.92

Malta byla vložena do forem ve tvar trámčů o rozměrech 160 x 40 x 40 mm a po 23 dnech podrobena zkoušce pevnosti v ohybu (viz obrázek 78). Průměrná pevnost v ohybu hliněné malty byla stanovena na $f = 1,82$ MPa. Z aritmetického průměru byl vyrazen vzorek 1, protože naměřená hodnota přesahovala chybovou odchylku od měření v porovnání s ostatními hodnotami. Hliněná malta se během 23 dnů ve formě smrštila přibližně o 7 %, z 160 na cca 150 mm. Průměrná objemová hmotnost hliněné malty $\rho = 1812,43$ kg/m³.



Obrázek 78 - Zkouška pevnosti v ohybu, foto: Petr Čanda

6.2.2 Pevnost v tlaku na zlomcích

Po stanovení pevnosti v ohybu hliněné malty byla na vzniklých zlomcích vyzkoušena její pevnost v tlaku podle ČSN EN 12390-3 (73 1302). Naměřené hodnoty jsou vypsány v tabulce 13. Z aritmetického průměru byl tentokrát vyřazen vzorek 4 (zlomek ze vzorku 1 při zkoušce v ohybu), protože naměřená hodnota opět přesahovala chybovou odchylku od měření v porovnání s ostatními hodnotami.

Tabulka 13 - Pevnost v tlaku hliněné malty

Pevnost v tlaku hliněné malty							
Vzorek	Rozměry				Síla při porušení	Pevnost v tlaku	Průměrná pevnost v tlaku
	d	š	v	o			
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ² = MPa]
1	80	40	39	-	11.8	3.69	3.97
2	82	40	39	-	12.2	3.72	
3	67	40	39	-	12.1	4.51	
4	80	40	39	-	7.4	2.31	

Hliněná malta vyrobená ke zdění pilířů má průměrnou pevnost v tlaku po 23 dnech $f = 3,97$ MPa. Na obrázku 79 je vidět zkouška pevnosti v tlaku na zlomku získaném po zkoušce pevnosti v ohybu na obrázku 78.



Obrázek 79 - Zkouška v tlaku na zlomcích. foto: Petr Čanda

6.2.3 Pevnost v tlaku výplňového betonu

Jeden z pilířů byl ve vnitřních otvorech hliněných cihel vyztužen výplňovým pytlovaným betonem pevnosti C 16/20 s kamenivem $D_{max} = 8$ mm a ocelovou výztuží. Pro účel vyhodnocení vlivu vyztužení na únosnost a deformaci pilíře byla na třech krychlích o rozměrech 100 x 100 x 100 mm stanovena pevnost v tlaku betonu po 23 dnech podle ČSN EN 12390-3 (73 1302), kdy proběhla zatěžovací zkouška pilířů. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14 - Pevnost v tlaku výplňového betonu

Pevnost v tlaku výplňového betonu								
Vzorek	Rozměry				Síla při porušení	Pevnost v tlaku	Průměrná pevnost v tlaku	Objemová hmotnost
	d	š	v	o				
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ² = MPa]	[kg/m ³]
1	100	99	101	-	43	4.34	6.05	1733.17
2	100	100	107	-	61	6.10		1743.93
3	99	101	106	-	60	6.00		1769.99

Výsledná průměrná pevnost v tlaku výplňového betonu $f = 6,05$ MPa je překvapivě nízká s porovnáním s pevností C 16/20 deklarovanou výrobcem. Při výrobě betonu byl dodržen technologický postup od výrobce a nelze zcela jasně říct, co může být příčinou nižší pevnosti. Provedení zkoušky po 23 místo 28 dnech by nemělo mít tak významný vliv.



Obrázek 80 - Zkouška pevnosti v tlaku výplňového betonu, foto: Petr Čanda

Na obrázku 80 je vidět betonová krychle při stlačování. Beton zjevně vykazuje zvýšenou pórovitost, která může být částečně způsobena nedostatečným zhutněním při odběru vzorku. Zhutněním na vibrující desce při zhotovení vzorků by pravděpodobně byla pórovitost nižší a tím i vyšší pevnost. Postup bez zhutnění na vibrující desce byl zvolen, aby byla zachována autenticita výsledků uvnitř otvorů v cihlách pilířů, kde nelze beton hutnit vibrátorem, protože by došlo k narušení struktury hliněných cihel vlivem vibrací.

6.2.4 Pevnost v tlaku hliněných cihel

Pevnost v tlaku hliněných cihel byla stanovena podle ČSN EN 12390-3 (73 1302). Byl zkoumán vliv cementové stabilizace na průběh pevnosti v intervalech po 2, 7, 14 a 28 dnech. V této části experimentu byly cihly bez povrchové úpravy. Druhou částí experimentu bylo porovnání pevnosti po 28 dnech u hliněných cihel bez povrchové úpravy a cihel, které byly před provedením zkoušky zaříznuty a zasádrovány.

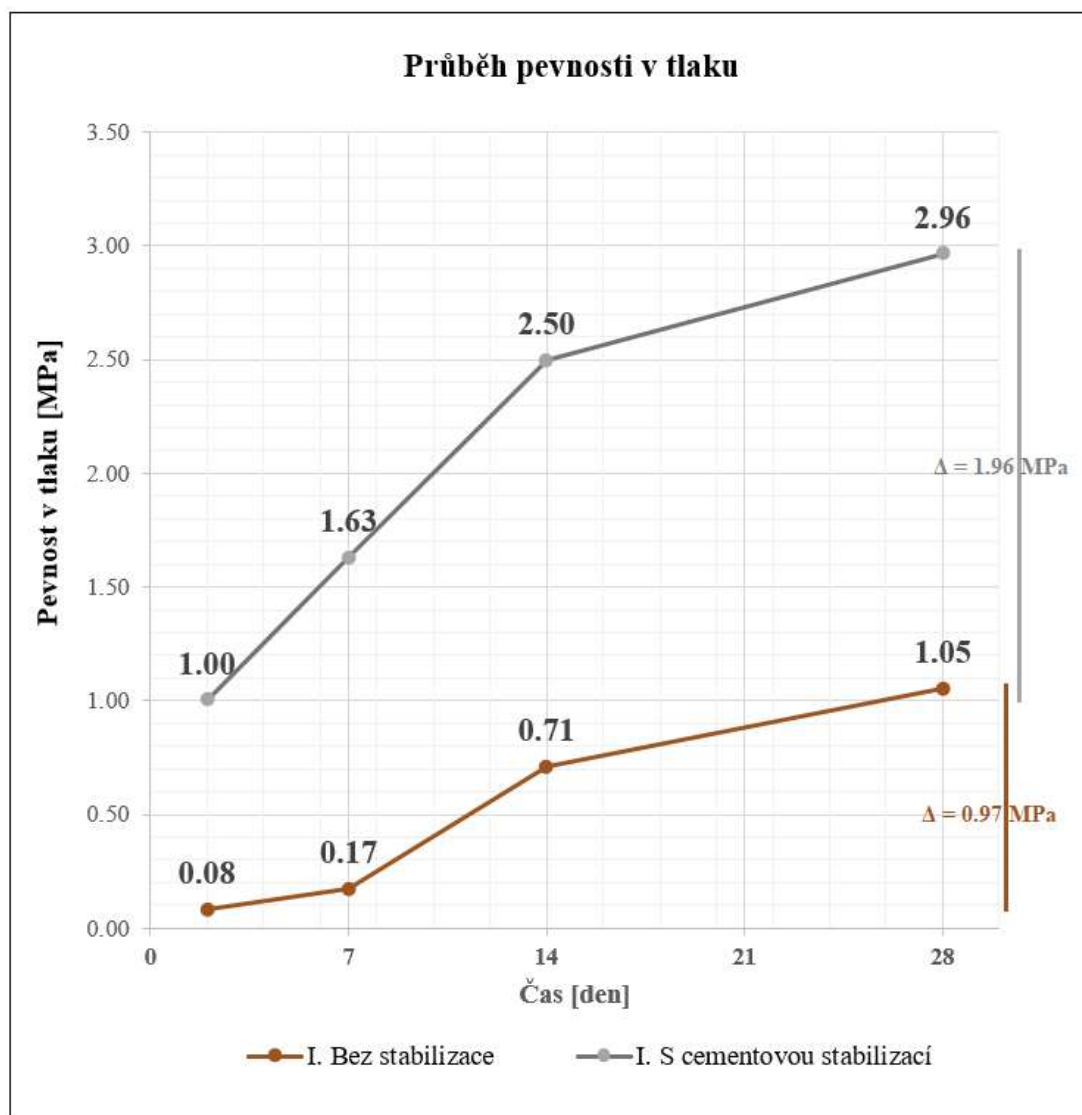
Vliv stabilizace na průběh pevnosti v tlaku

Naměřené síly, při kterých došlo k porušení vzorků v různých časových intervalech jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15 - Průběh pevnosti tlaku hliněných cihel

Průběh pevnosti v tlaku hliněných cihel				
Výrobní sada	Vzorek	Síla při porušení	Pevnost v tlaku	Průměrná pevnost v tlaku
		[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ² = MPa]
Bez stabilizace t = 2 dny	1	3.8	0.09	0.08
	2	4	0.09	
	3	2.5	0.06	
S cementovou stabilizací t = 2 dny	1	38	0.90	1.00
	2	40	0.95	
	3	49	1.16	
Bez stabilizace t = 7 dní	1	7	0.17	0.17
	2	8	0.19	
	3	7	0.17	
S cementovou stabilizací t = 7 dní	1	73	1.73	1.63
	2	57	1.35	
	3	76	1.80	
Bez stabilizace t = 14 dní	1	32	0.76	0.71
	2	29	0.69	
	3	29	0.69	
S cementovou stabilizací t = 14 dní	1	108	2.56	2.50
	2	104	2.47	
	3	104	2.47	
Bez stabilizace t = 28 dní	1	51	1.21	1.05
	2	39	0.92	
	3	43	1.02	
S cementovou stabilizací t = 28 dní	1	112	2.66	2.96
	2	138	3.27	
	3	125	2.96	

Z každé výrobní sady byly stlačeny tři vzorky. Z aritmetického průměru jejich pevností v tlaku byla stanovena průměrná pevnost v tlaku a hodnoty následně vyneseny do grafu 6.



Graf 6 - Průběh pevnosti v tlaku

V této fázi byly cihly stlačovány bez jakýchkoliv povrchových úprav. Naměřené hodnoty tedy slouží primárně k vzájemnému porovnání průběhu pevnosti v závislosti na čase u vzorků bez a se stabilizací. Potvrdil se předpoklad, že pevnost v tlaku bude s časem růst a že cihly stabilizované cementem budou odolnější proti působení zatěžovací tlakové síly. U cihel stabilizovaných cementem měl nárůst pevnosti v prvních 14 dnech téměř lineární průběh. Počáteční pevnost během 28 dní vzrostla z 1 MPa na 2,96 MPa, tedy o 196 %. Všechny vzorky byly v prvním týdnu skladovány venku pod plachtou a nízké říjnové venkovní teploty mohly mít vliv na pozvolnější nárůst pevnosti u čistě hliněných cihel. Pevnost vzorků lisovaných bez stabilizace vzrostla během 28 dní o cca 1213 %. Hliněné cihly stabilizované cementem měly po skončení sekundární fáze vysychání 3x větší pevnost v tlaku než cihly bez stabilizace.

Na obrázku 81 je vidět porovnání cihel bez stabilizace (vlevo) s cihlami stabilizovanými 9 % cementu (vpravo) po 7 dnech. Stabilizované cihly mají na první pohled hladší povrch a méně pórů oproti cihlám bez stabilizace.



Obrázek 81 - Porovnání cihel bez stabilizace a s cementovou stabilizací, foto: autor

Vliv koncování cihel na naměřenou pevnost v tlaku

Při prvním měření, kdy byl zjišťován nárůst pevnosti v čase, nebyla provedena žádná povrchová úprava cihel před jejich zkoušením. Zatěžovací síla vlivem výstupků a pórů na povrchu cihel nebyla rovnoměrně rozložena a naměřené hodnoty slouží primárně k porovnání nárůstů pevnosti pro stabilizované a nestabilizované cihly, nikoliv k určení jejich skutečné pevnosti. Pro zjištění pevnosti v tlaku, která více odpovídá skutečné pevnosti, byly na povrchu cihel zaříznuté veškeré výstupky a nanesena sádrová vrstva, které jednak vyrovnala případné nerovnosti a také zaplnila povrchové póry (viz obrázek 82).



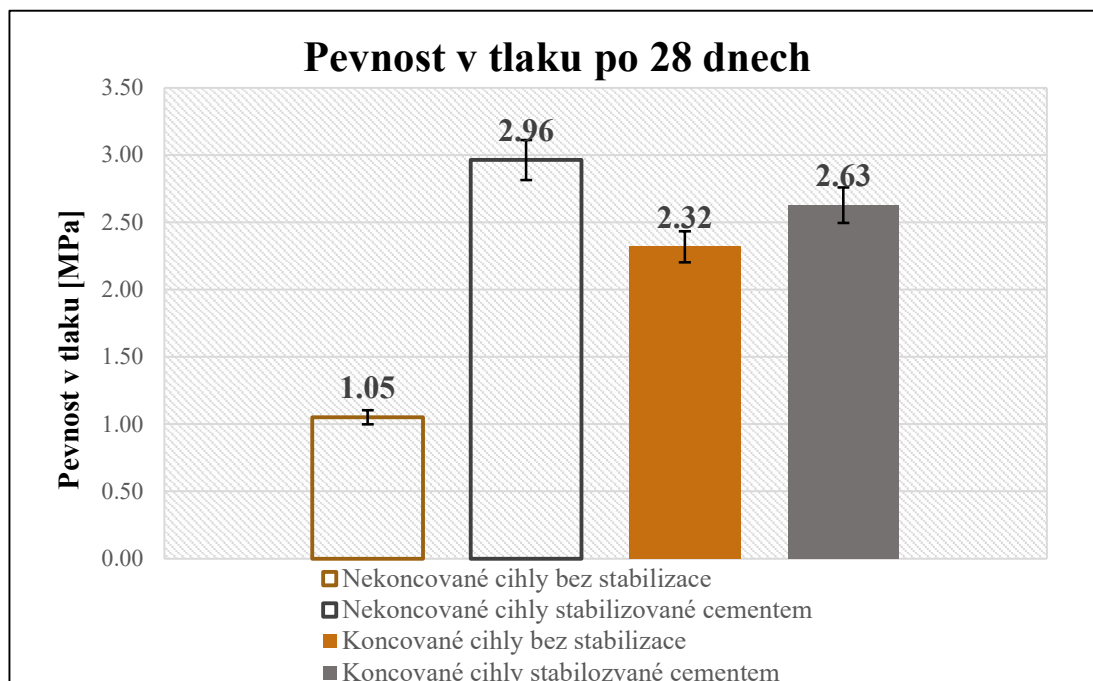
Obrázek 82 - Zaříznuté a zasádrované vzorky cihel před stlačením, foto: Petr Čanda

Koncované hliněné cihly byly tentokrát zkoušeny pouze po 28 dnech a naměřené hodnoty byly následně porovnány s výslednými pevnostmi cihel nekoncovaných. Jednotlivé hodnoty jsou vypsány v tabulce 16.

Tabulka 16 - Pevnost v tlaku koncovaných a nekoncovaných cihel

Výrobní sada	Vzorek	Síla při porušení	Pevnost v tlaku	Průměrná pevnost v tlaku	Objemová hmotnost	Průměrná objemová hmotnost
		[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
Nekoncované cihly bez stabilizace	1	51	1.21	1.05	1605.25	1639.24
	2	39	0.92		1669.27	
	3	43	1.02		1643.19	
Nekoncované cihly stabilizované cementem	1	112	2.66	2.96	1714.33	1760.17
	2	138	3.27		1792.57	
	3	125	2.96		1773.60	
Koncované cihly bez stabilizace	1	59	1.41	2.32	1584.35	1724.04
	2	92	2.28		1734.01	
	3	100	2.35		1714.08	
Koncované cihly stabilizované cementem	1	97	2.31	2.63	1701.41	1739.58
	2	88	2.14		1752.85	
	3	138	3.43		1764.48	

Tentokrát byly cihly nejen povrchově upraveny, ale také skladování v interiéru laboratoře po celou dobu procesu vysychání. U prvního vzorku z nestabilizované koncované výrobní sady se síla při porušení vychýlila od průměru a nebyla proto do průměrné pevnosti v tlaku započítána. Hodnoty byly vyneseny do sloupcových grafů 7 a 8.

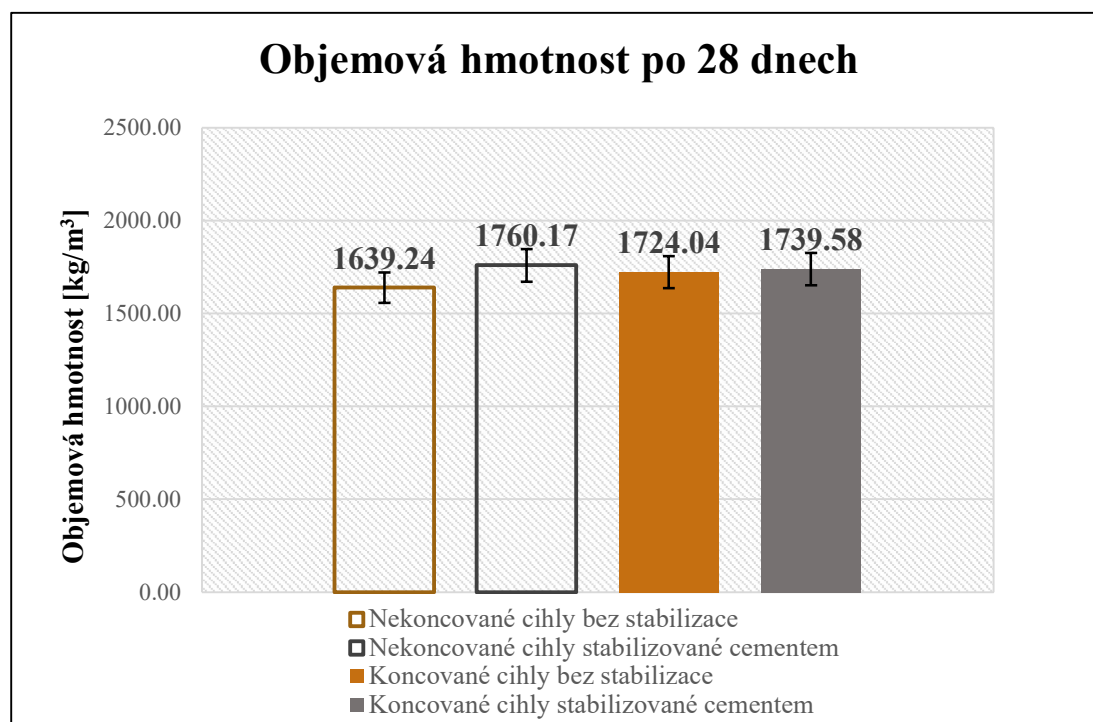


Graf 7 - Pevnost v tlaku koncovaných a nekoncovaných cihel po 28 dnech

Ve sloupcovém grafu 7 jsou vyneseny hodnoty průměrných pevností v tlaku po 28 dnech od konsolidace cihel pro všechny vyrobení sady. Nejnížší pevnost $f=1,05$ MPa vykazuje čistě hliněná cihla bez povrchové úpravy. Naměřená hodnota nereprezentuje skutečnou pevnost v tlaku, protože zatěžovací síla vzhledem k pórovitosti a nerovnosti povrchu nebyla rovnoměrně rozložena. Na druhé straně spektra s nejvyšší pevností $f=2,96$ MPa jsou cihly stabilizované 9 % cementu bez povrchové úpravy. To je o 0,33 MPa více než stabilizované cihly s povrchovou úpravou. Tento jev může být částečně vysvětlen tím, že cihly stabilizované cementem mají nižší pórovitost a hladší povrch, a proto jejich koncování nemělo tak významný vliv jako u cihel nestabilizovaných. Koncované cihly byly vyráběny v listopadu během nižších venkovních teplot, které mohly negativně ovlivnit přirozený průběh hydratace přimíchávaného cementu. Z naměřených hodnot nelze tento jev nijak jasně specifikovat a pro jeho definování by musela být provedena další měření.

Naopak u čistě organických hliněných cihel mělo koncování významný vliv na pevnost v tlaku. Pevnost v tlaku $f=2,32$ MPa je o 1,27 MPa vyšší než u cihel bez povrchové úpravy. Zatěžovací síla byla v případě zaříznutých a sádrovaných cihel rovnoměrně rozložena na zatěžovací plochu. Pozitivní vliv mělo pravděpodobně i skladování v interiéru po celou dobu primárního i sekundárního procesu vysychání.

Kromě pevnosti v tlaku byl každý vzorek před stlačením zvážen a změřen. Následně byla podle ČSN EN 12350-6 (73 1301) spočtena objemová hmotnost cihel a hodnoty byly vyneseny do sloupcového grafu 8.



Graf 8 - Objemová hmotnost koncovaných a nekoncovaných cihel po 28 dnech

Zaříznutý a zasádrovaný vzorek číslo 1 bez stabilizace byl stejně jako u porovnání pevnosti v tlaku vyřazen z výpočtu průměrné objemové hmotnosti kvůli vychýlení hodnoty od průměru. V obou případech se tak potvrdilo, že šlo o špatně vylisovaný vzorek. Lépe vylisované vzorky mají obvykle vyšší objemovou hmotnost, protože bylo stlačeno více hliněné směsi do formy o stejných rozměrech. Mezi částicemi během lisování vznikají silnější vnitřní vazebné síly, které způsobují vyšší

soudržnost materiálu. Mezi nejvyšší objemovou hmotností cihly stabilizované cementem $\rho = 1760,17 \text{ kg/m}^3$ bez povrchové úpravy a nejnižší objemovou hmotností $\rho = 1639,24 \text{ kg/m}^3$ u nestabilizovaného vzorku, kde neproběhla povrchová úprava, je pouze $120,93 \text{ kg/m}^3$. Tento rozdíl je v kontextu objemové hmotnosti zanedbatelný a nelze mu přisuzovat příliš velký význam v souvislosti s dalšími vlastnostmi materiálu.

Na obrázku 83 je vidět způsob porušení nekoncevané hliněné cihly. Výstupky na cihlách slouží k usnadnění zdícího procesu a lepšího spolupůsobení. Během stlačování byly nejprve zatlačeny vystouplé části a došlo tak k nežádoucímu porušení, které mělo negativní vliv na schopnost odolat zatěžovací síle.



Obrázek 83 - Porušení cihly bez povrchových úprav, foto: autor

U vzorků s povrchovou úpravou začaly při zatížení nejprve vznikat svislé trhliny a následně se odlamovat kusy z vnějších stran cihel, jak je vidět na obrázku 84.



Obrázek 84 - Způsob porušení cihel s povrchovou úpravou, foto: Petr Čanda

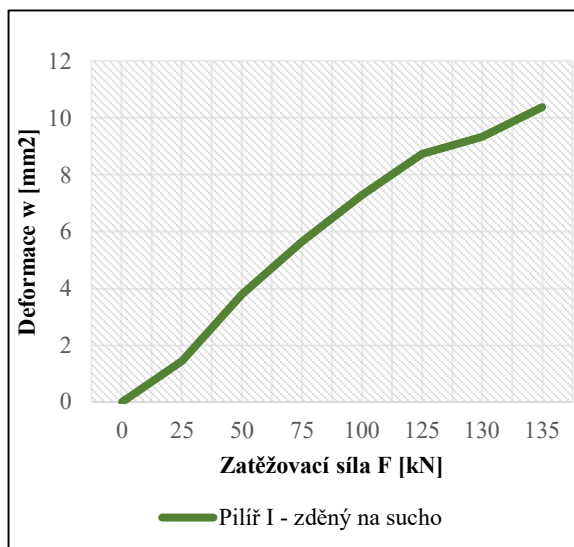
6.3 Výsledky zatěžovací zkoušky pilířů

Vyzdění pilíře byly podrobeny zatěžovací zkoušce, při které byl zkoumán vliv zatěžovací síly na deformaci pilířů. Hliněné cihly vysychaly 123 dní, tedy přibližně 18 týdnů, před vyzdění a zatěžový test proběhl po 23 dnech od vyzdění. Výsledky zatěžovací zkoušky budou nejprve uvedeny pro jednotlivé pilíře, které budou následně vzájemně porovnány mezi sebou.

I. Pilíř zděný na sucho

Tabulka 17 - Deformace pilíře I

Pilíř I – zděný na sucho				
F	W _L	W _P	ØW	f _c
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]
0	0	0	0	0.00
25	0.3	2.6	1.45	0.19
50	2.6	5	3.8	0.37
75	4.4	6.9	5.65	0.56
100	6	8.6	7.3	0.74
125	7.5	10	8.75	0.93
130	8.1	10.6	9.35	0.96
135	9.2	11.6	10.4	1.00
Porušení				



Graf 97 - Deformace pilíře I

Deformace W byla měřena ve dvou místech vždy uprostřed pilíře, skutečná hodnota stlačení je tedy průměr dvou hodnot W_L a W_P. Maximální zatěžovací síla F_{max} = 135 kN a pilíř byl před porušením stlačen o W = 10,4 mm. Způsob porušení je vidět na obrázku 85.



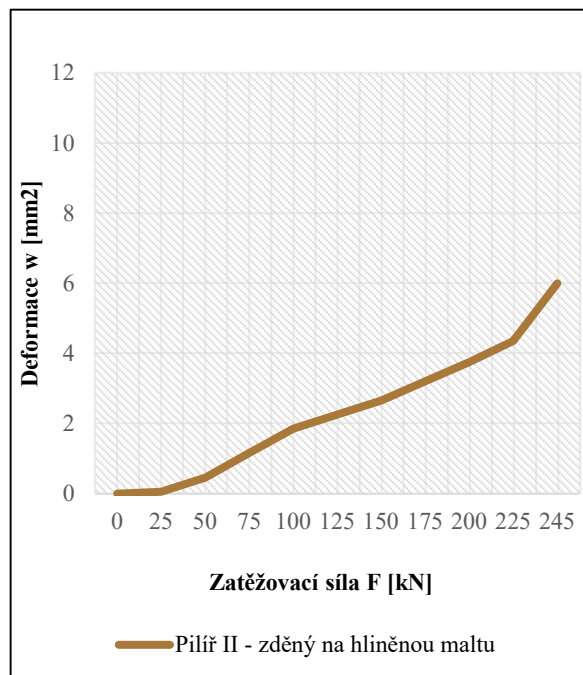
Obrázek 85 - Porušení pilíře I při zatěžovací zkoušce, foto: Petr Čanda

Pilíř zděný na sucho byl po vzniku několika tenkých trhlin porušen v blízkosti otvorů u čelních cihel ve vnějším směru. Posléze dominovým efektem začaly prskat i okolní cihly. Po rozdrčení první cihly v místě největší deformace začaly odpadávat další cihly v místě porušení.

II. Pilíř zděný na hliněnou maltu

Tabulka 18 - Deformace pilíře II

Pilíř II – zděný na hliněnou maltu				
F	W _L	W _P	ØW	f _c
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]
0	0	0	0	0.00
25	0.3	-0.2	0.05	0.19
50	0.8	0.1	0.45	0.37
75	1.4	0.9	1.15	0.56
100	2.1	1.6	1.85	0.74
125	2.4	2.1	2.25	0.93
150	2.9	2.4	2.65	1.11
175	3.3	3.1	3.2	1.30
200	3.9	3.6	3.75	1.48
225	4.5	4.2	4.35	1.67
245	6.1	5.9	6	1.81
Porušení				



Graf 10 - Deformace pilíře II

Maximální zatěžovací síla $F_{\max} = 245$ kN a pilíř byl před porušením stlačen o $W = 6$ mm. Na obrázku 86 je vidět způsob porušení pilíře vyzděného na hliněnou maltu. K porušení došlo opět u čelních cihel ve vnějším směru od otvorů ven. Hliněná malta tentokrát přenesla část zatížení a ze stran pilíře se odlamovaly menší úlomky cihel. Po vzniku trhlin došlo k největší deformaci a drcení cihel v 3. řadě cihel, kde kromě zatěžovací síly měla vliv také vlastní tíha cihel v horních řadách.

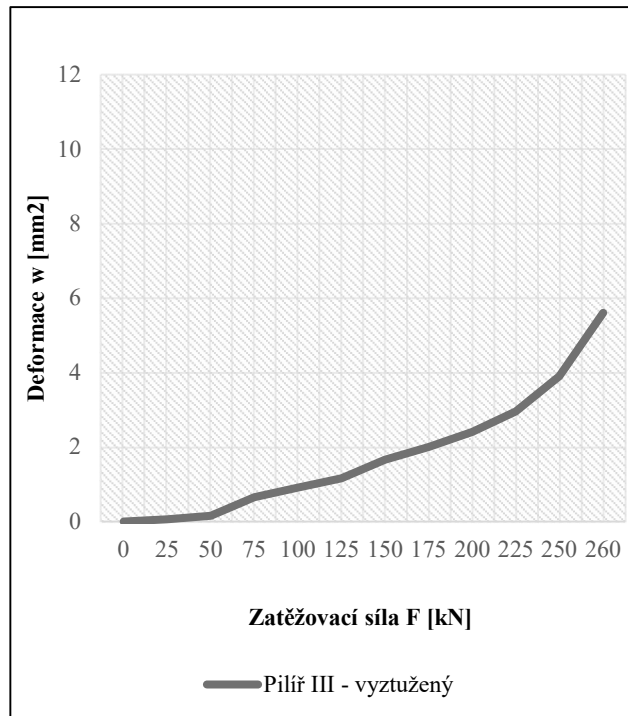


Obrázek 86 - Porušení pilíře II při zátěžové zkoušce, foto: Petr Čanda

III. Pilíř vyztužený betonem a ocelovou výztuží

Tabulka 19 - Deformace pilíře III

Pilíř III – vyztužený				
F	W _L	W _P	ØW	f _c
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]
0	0	0	0	0.00
25	0.1	0	0.05	0.19
50	0.2	0.1	0.15	0.37
75	0.6	0.7	0.65	0.56
100	0.8	1	0.9	0.74
125	1	1.3	1.15	0.93
150	1.5	1.8	1.65	1.11
175	1.9	2.1	2	1.30
200	2.2	2.6	2.4	1.48
225	2.8	3.1	2.95	1.67
250	3.7	4.1	3.9	1.85
260	5.4	5.8	5.6	1.93
Porušení				



Graf 11 - Deformace pilíře III

Maximální zatěžovací síla byla $F_{\max} = 260$ kN a pilíř byl před porušením stlačen o $W = 5,6$ mm. Způsob porušení pilíře vyztuženého výplňovým betonem a ocelovou výztuží je vidět na obrázcích 87 a 88.



Obrázek 87 - Porušení pilíře III při zátěžové zkoušce, foto: Petr Čanda



Obrázek 88 - Odhalená výztuž pilíře po odstranění cihel, foto: Petr Čanda

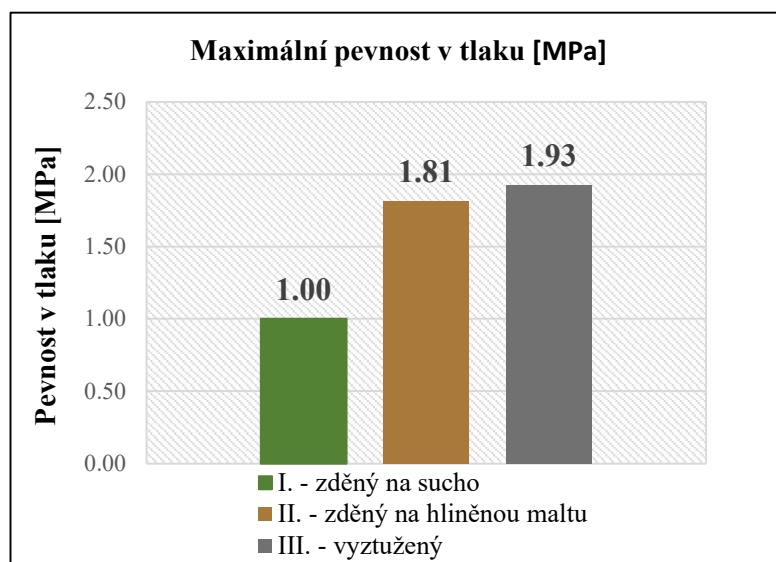
U vyztuženého pilíře vyzdřeného na hliněnou maltu se způsob porušení podobá porušení pilíře II bez vyztužení. Po skončení zátěžové zkoušky byly cihly odbourány, aby byl odhalen ztvrdlý výplňový beton a ocelová výztuž (viz obrázek 88).

Po odhalení ocelových profilů a výplňového betonu je vidět porušení vyztužení uvnitř pilíře. V místě stykování výztuže došlo ke značnému drcení betonu a válce vzniklé v jednotlivých řadách navzájem vybočují vlivem posunu jednotlivých cihel ve vodorovném směru. V místě stykování výztuže došlo k prvnímu drcení cihel.

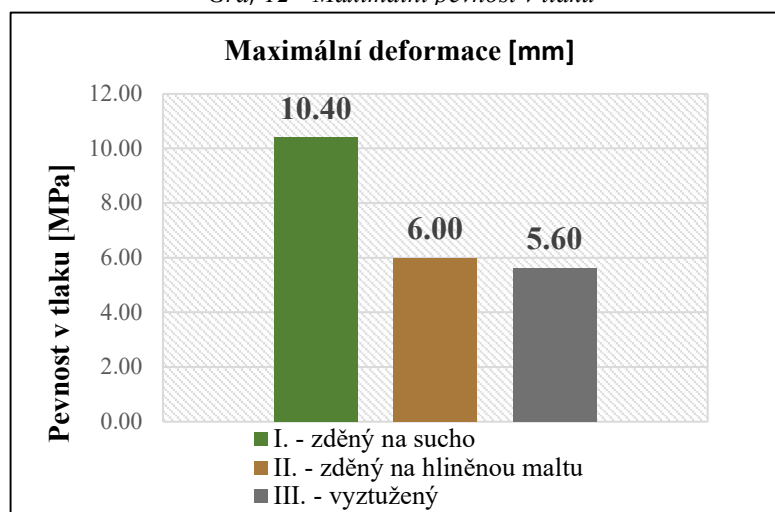
Vzájemné porovnání

Tabulka 20 - Maximální hodnoty naměřené při zátěžové zkoušce

Pilíř	F_{\max}	$f_{c, \max}$	ΔW_{\max}
	[kN]	[MPa]	[mm]
I. - zděný na sucho	135	1.00	10.40
II. - zděný na hliněnou maltu	245	1.81	6.00
III. - vyztužený	260	1.93	5.60

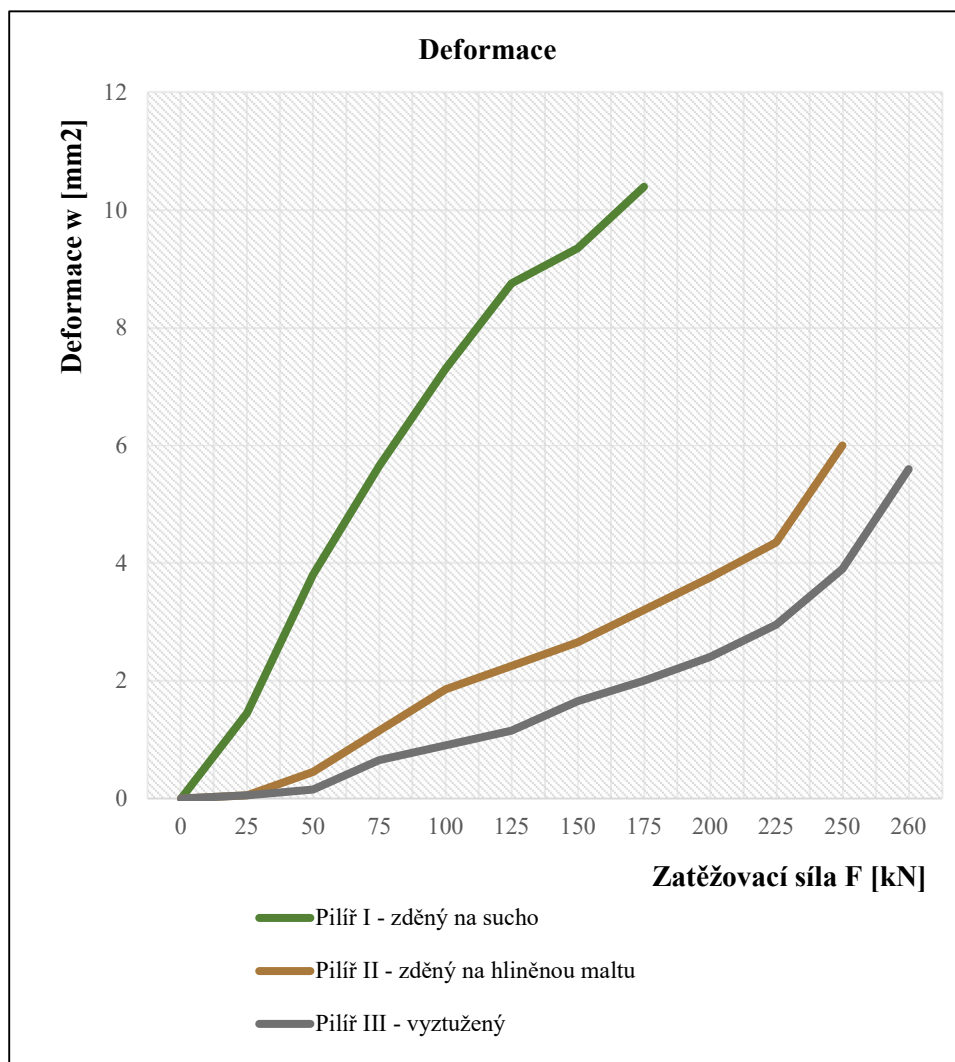


Graf 12 - Maximální pevnost v tlaku



Graf 13 - Maximální deformace

V tabulce 20 a grafech 13 a 14 jsou vyneseny hodnoty maximálního stlačení všech tří pilířů a maximální zatěžovací síly, které pilíře stlačily. Nejmenší sílu $F_{\max} = 135$ kN přenesl podle očekávání pilíř zděný na sucho. Pilíř I byl také nejvíce stlačen, a to o $W_{\max} = 10,4$ mm. Pilíř II vyzděný na hliněnou maltu a dodatečně vyztužený pilíř III prokázaly příznivý vliv hliněné malty v ložních a styčných spárách a zatěžovací síla F_{\max} byla v obou případech větší než 240 kN. Oba pilíře byly stlačeny retrospektivně o 6 a 5,6 mm.



Graf 14 - Porovnání deformace pilířů

V grafu 14 jsou pro porovnání deformace vyneseny průběhy stlačení v závislosti na zatěžovací síle všech tří pilířů. Průběhy deformace pilířů II a III mají velmi podobný průběh. V případě pilíře II jsou zdící prvky i malta vyrobeny z čistě organických hliněných směsí. Na překvapivě nízkou únosnost vyztuženého pilíře III měla pravděpodobně vliv nízká pevnost a kvalita výplňového betonu. Kdyby měl beton ve ztraceném bednění vytvořeném otvory v cihlách vyšší pevnost a výztuž byla lépe provázána dokázal by pravděpodobně odolat větší zatěžovací síle. Přidáním výztuže současně přicházíme o několik výhod čistě hliněných konstrukcí jako je nízká environmentální zátěž a její mechanicko-fyzikální vlastnosti, které mají pozitivní vliv na vnitřní mikroklima. Navíc nelze zajistit dostatečné spolupůsobení lisovaných cihel a výplňového betonu a pracnost samotného vyztužování značně zpomaluje samotný zdící proces.

7 Aplikace technologie pro projekt střední školy v Zambii

7.1 Představení projektu

Nezisková organizace New Renato Community Society v oblasti zambijské vesnice Kashitu aktuálně úspěšně provozuje základní a mateřskou školu, kterou společně s pomocí místních, vládních učitelů a dobrovolníků založili. Základní vzdělání v Zambii je bezplatné a dostupné pro přibližně 90 % dětí. Pokračovat dál ve studiu na středních školách může ale pouze 25 % žáků. Tento nepoměr způsobuje jednak zpoplatnění středoškolského studia, ale také soustředěnost škol ve větších městech, kam obyvatelé vesnic často nemají přístup.

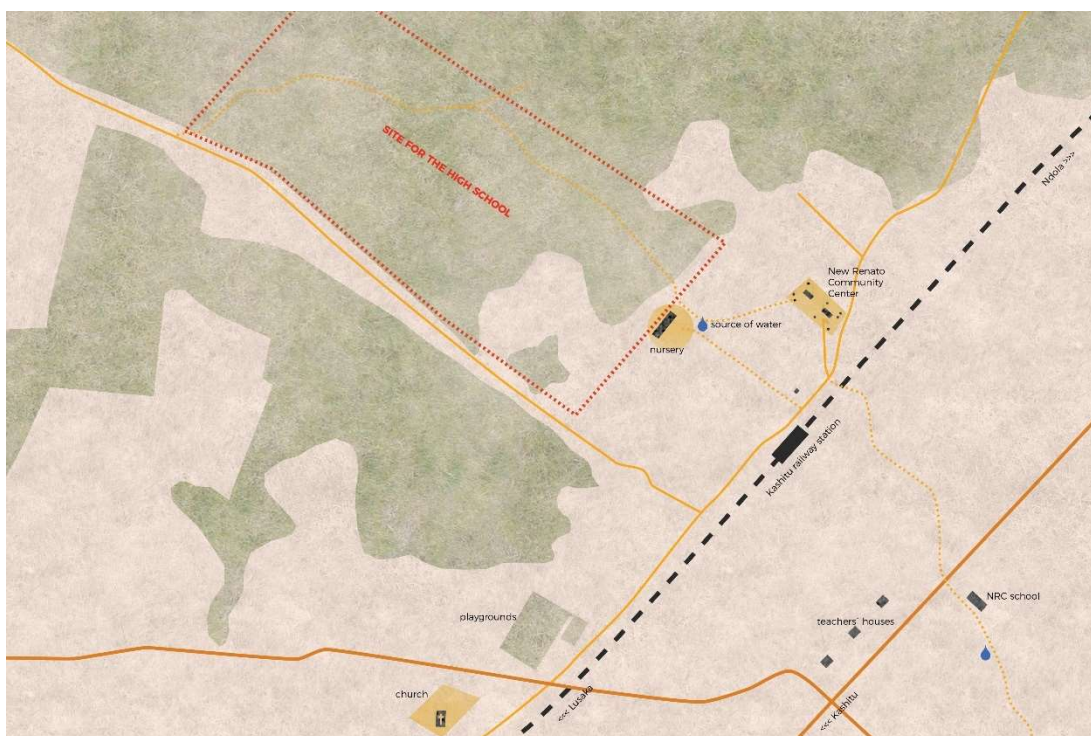


Obrázek 89 - Vesnice Kashitu, Zambie, foto: Petr Čanda



Obrázek 90 - Základní škola v Kashitu, foto: Petr Čanda

Jako reakce na aktuální situaci vznikl projekt Střední školy v Kashitu, na kterém usilovně místní nezisková organizace již několik let pracuje. Absolvent ČVUT Ing. Petr Čanda ve spolupráci s Ing. arch. Janem Rosíkem vypracovali architektonickou studii, ze které jsem vycházel při implementaci technologie nepálených hliněných cihel. Projekt vznikl v souladu s principy udržitelného rozvoje a Agendou 21. S využitím lisovaných hliněných cihel je uvažováno od samotného prvopočátku a jde o technologii, kterou místní obyvatelé dobře znají. Použití lisovaných hliněných cihel tak umožní využít zkušenosti místních a také cenově dostupné zdroje materiálů, které jsou environmentálně šetrné a vytvářejí kvalitní vnitřní mikroklima vhodné pro vzdělávání. Hlína je dostupná přímo v místě pozemku, kde se výstavba školního areálu plánuje a technologie lisovaných cihel je vhodná pro výstavbu svépomocí. Hliněné cihly mají v Zambii dlouholetou tradici a často se využívají právě k realizaci rozvojových projektů.



Obrázek 91 - Areál střední školy v Kashitu, autor: Tereza Čechová

Na obrázku 91 je vidět parcela o rozloze cca 100 000 m² určená pro areál střední školy, která je situována v blízkosti místní železniční dráhy a stávajícího komunitního centra neziskové organizace. Škola předpokládá s délkou studia na pět let a areál je navržen pro 250 studentů. Samotný areál je pomyslně rozdělen na několik navazujících funkčních celků včetně administrativních budov, zázemí pro zdravotníky, budovy tříd, laboratoří a jídelny s kuchyní. V blízkosti každé budovy, kde probíhá výuka, jsou také toalety. Středem celého areálu je budova kruhového půdorysu s kaplí a knihovnou. Do budoucna velikost pozemku umožní realizaci ubytovacích zařízení. Tím bude rozšířena dostupnost střední školy i pro studenty ze vzdálenějších lokalit. Na obrázku 92 je vyobrazena situace školního areálu včetně internátního konceptu a domků sloužících jako zázemí pro dobrovolníky a personál školy.



Obrázek 92 - Mapa areálu střední školy v Kashitu, autor: Tereza Čechová

Samotná výstavba je rozdělena na celkem tři etapy. V té první (vyznačené červenou barvou) bude postaven zkušební objekt sloužící jako zázemí během stavby a

jako workshop, kde budou probíhat školení o správném technologickém postupu při výrobě lisovaných hliněných cihel. Dále bude vybudována první budova s učebnami včetně zázemí s toaletami. V rámci druhé fáze (vyznačené oranžově) vzniknou budovy zajišťující výuku, laboratoře, jídelna s kuchyní, zázemí pro učitele, zázemí pro zdravotníky a ubytovací kapacity pro 150 žáků. Ve třetí fázi (označené žlutě) bude rozšířena kapacita celého areálu o další učebny a ubytovací objekty a uprostřed areálu vznikne zmíněná knihovna s kaplí.

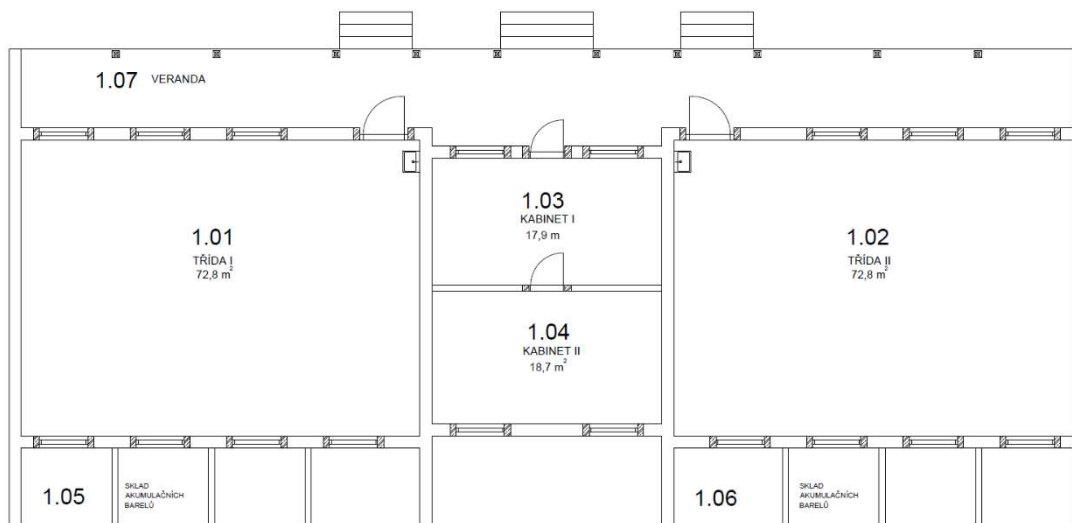
7.2 Referenční budova střední školy

Z areálu střední školy byla vybrána budova s učebnami, která bude vybudována v rámci první etapy. Půdorysné rozměry a dispozice vychází z místních požadavků na místnosti určené k výuce a také ze Zambijské legislativy.



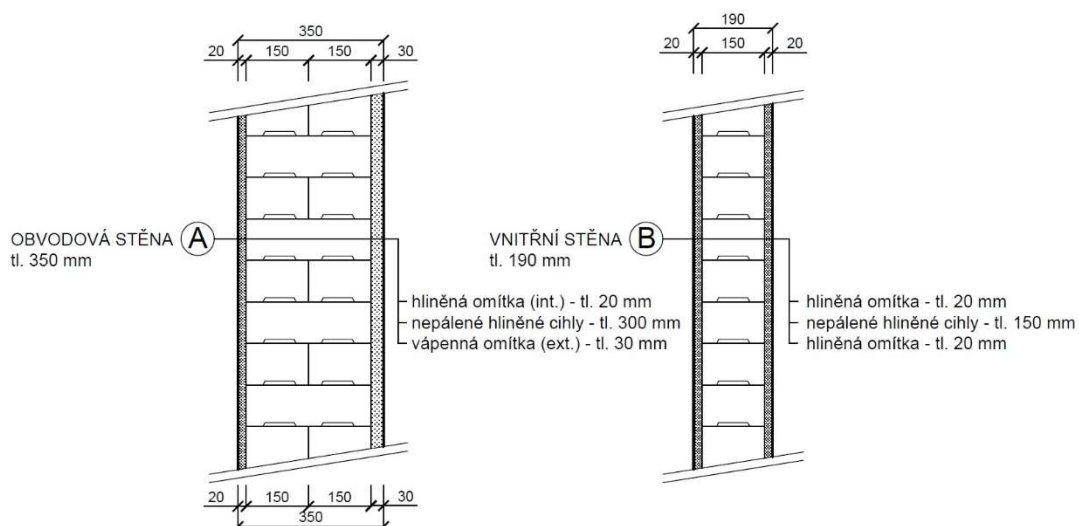
Obrázek 93 - Pohled na školní budovu

Pro tento objekt bude spočítán konkrétní počet lisovaných cihel a potřebné množství materiálu. Na základě získaných zkušeností při výrobě cihel v rámci experimentální části této diplomové práce bude odhadnut počet osob a doba potřebná pro realizaci objektu.



Obrázek 94 - Půdorys školní budovy

V budově se nachází dvě učebny o rozloze 72,8 m², průchozí kabinet s půdorysnou plochou 17,9 m² a neprůchozí kabinet o velikosti 18,7 m². Na obrázku 93 je vidět vnější pohled na budovu ze čtyř světových stran. Budova obdélníkového tvaru se dvěma trakty určenými k výuce je v rozvojových zemích standardním řešením pro školní objekty. Okna na obou stranách zajišťují dostatečné proslunění učeben v průběhu školního roku a zároveň napomáhají k přivádění čerstvého vzduchu do interiéru. Šikmá střecha pomáhá se zadržováním srážkové vody během období dešťů. Získaná voda je akumulovaná v barelech umístěných na jižní straně budovy v uzavíratelných kontejnerech a je následně distribuována areálem. Na severní straně se nachází pochozí veranda a vstup do učeben a kabinetů.

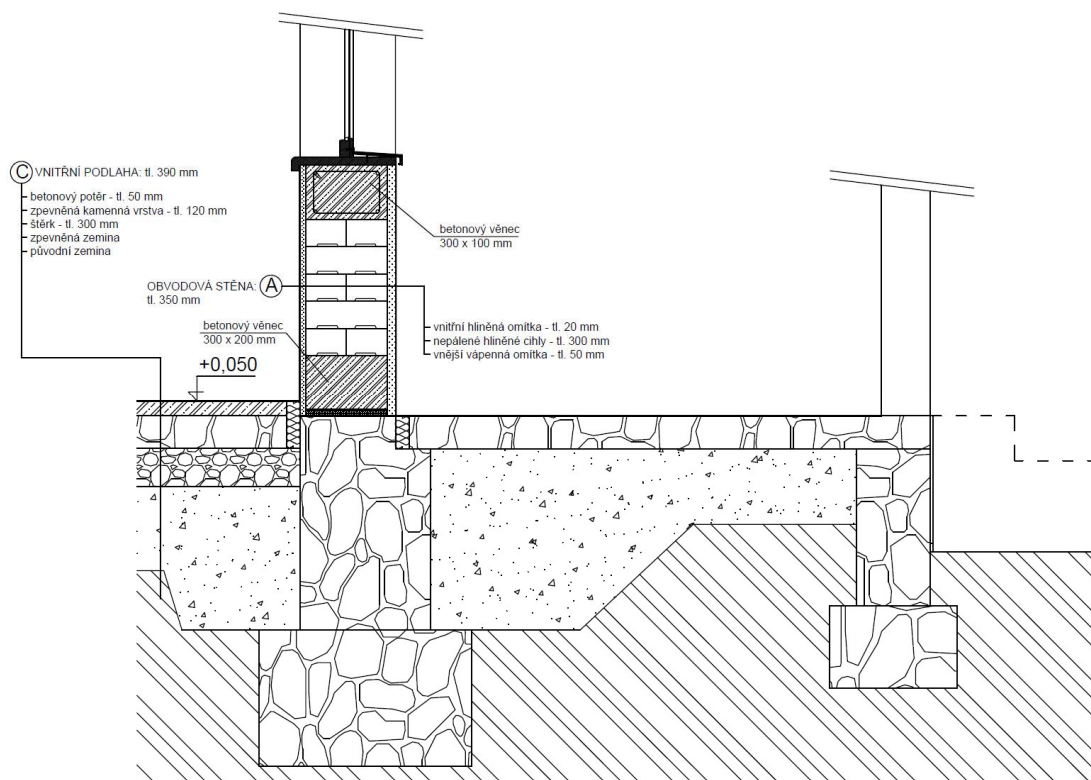


Obrázek 95 - Skladba stěn ve školní budově

Nosné obvodové i vnitřní dělicí stěny jsou vyskládány z lisovaných hliněných cihel. Vnější strana obvodových stěn je omítnuta vápennou omítkou, která částečně chrání hliněné cihly před účinky vody a jiných nepříznivých vlivů. V interiéru jsou stěny omítnuty vrstvou hliněné omítky (viz obrázek 95).

Lisované cihly jsou vyskládány na betonový věnec o výšce 200 mm, který po obvodu ztužuje celý objekt a chrání cihly před vniknutím vzlínající vody, která se do nich dostává z podlahy vlivem kapilární elevace a usazováním srážkové vody. Budova je založena na základových pasech z kamenné vrstvy zpevněné betonem. V interiéru je pochozí vrstva betonového potěru o tloušťce 50 mm, aby byla zajištěna snadná údržba, trvanlivost a odolnost.

Jednoduchost konstrukčního řešení pomáhá zajistit odolnost objektu při případné seismické aktivitě. Vibrace vznikající při zemětřesení narušují strukturu lisovaných cihel a mohou následně způsobit ztrátu únosnosti. Jako preventivní opatření byly přidány ztužující betonové věnce po obvodu výplňových konstrukcí, které zároveň slouží ke kotvení okenních rámců. (viz obrázek 96).



Obrázek 96 - Základy školní budovy

Z půdorysných rozměrů a světlé výšky místností byl stanoven počet cihel potřebných k realizaci školní budovy na 21 027 kusů. Z toho 20 733 plných cihel o rozměru 300 x 150 x 100 mm a 294 půlených cihel o rozměrech 150 x 150 x 100 mm. To odpovídá přibližně 94 m³ hliněné směsi. Pokud by složení hliněné směsi bylo v zambijském prostředí shodné se směsí použitou k lisování cihel v rámci experimentu znamenalo by to 75 m³ hlíny a 19 m³ písku. Při výrobě hliněných cihel byla rychlost lisování na vylepšeném prototypu lisu přibližně 30 cihel za hodinu za přítomnosti tří osob, tedy 15 stlačení. S touto rychlostí by stejný počet osob na jednom lisu vyrobil potřebné množství cihel, při lisování 8 hodin v kuse každý všední den v týdnu, za přibližně 5 týdnů. Pravděpodobná rychlost výroby v závislosti na počtu lisů a osob (který byl zvýšen na 5) k jeho obsluze je stanovena v tabulce 21.

Tabulka 21 - Rychlost výroby cihel v závislosti na počtu osob a lisů

Množství cihel		Množství lisů	Počet pracovníků	Doba
[ks]		[ks]	[osoba]	[týden]
Plných	20733	1	5	5
Půlených	294	3	15	2
Celkem	21027	5	25	1

Z tabulky 21 vyplývá, že pokud bude k dispozici jeden lis, který bude obsluhovat 5 osob, bude potřebné množství cihel pro stavbu jednoho objektu vylisováno za 5 týdnů. Pokud by bylo k dispozici 3 nebo 5 lisů a 15 až 25 pracovníků zkrátila by se doba výroby na 1-2 týdny. K této době je nutné přičíst minimální dobu zrání čerstvých cihel, která je 28 dní a také čas potřebný k zajištění a přípravě samotné hliněné směsi. Období dešťů v Zambii trvá od listopadu do dubna, tedy 6 měsíců. Cihly by tak ideálně měly

být vyrobeny v období s minimálním počtem srážek od května do října, kdy budou vhodné podmínky pro jejich vysychání.

Během zátěžového testu byla stanovena únosnost a deformace tří zděných pilířů o výšce 0,9 m, šířce 0,9 m a tloušťce 0,15 m. Jedním z výsledků byla maximální zatěžovací síla, kterou je pilíř schopný přenést. V tabulce 24 je uveden výpočet předpokládané zatěžovací síly ve školení budově na nejvíce zatíženou meziokenní stěnu vysokou 4,045 m (po odečtení horního a spodního ztužujícího věnce 3,645 m), širokou 0,9 m a tlustou 0,3 m. Síla byla vypočítaná ve vrcholu, středu a patě stěny.

Tabulka 172 - Zatížení na stěnu školní učebny

Charakteristická kombinace						
Zatížení	Součinitel	Char. zat.	Šířka	Délka	Sv. síla	Tlak
	[-]	[kN/m ²]	[m]	[m]	[kN]	[MPa]
Stálé	1	0.75	2.5	5.9	11.06	-
Plechová krytina		1.89	2.5	5.9	27.88	-
Dřevěné latě a podbití		0.16	2.5	5.9	2.36	-
Krokev		0.6	0.2	5.9	0.71	-
Dřevěný trám		1.34	0.24	3.83	1.23	-
Betonový věnec		6.6	0.3	0.9	1.78	-
Celkem ve vrcholu stěny					45.02	0.33
Hliněné cihly	1	5.247	0.9	1.8	8.50	-
Celkem ve středu stěny					53.52	0.40
Hliněné cihly	1	5.247	0.9	1.8	8.50	-
Celkem v patě stěny					62.02	0.46

V tabulkách 23-25 je porovnávána výsledná zatěžovací síla v patě vybrané stěny s maximální zatěžovací silou stanovenou během zátěžového testu.

Tabulka 23 - Porovnání pilíře I

Pilíř I – zděný na sucho		
	F	f_c
	[kN]	[MPa]
Únosnost	135	1
Zatížení v patě	62.02	0.46
$N_R = 135 \text{ kN} > N_E = 62,02 \text{ kN}$ Bezpečnost 218 %		

Tabulka 24 - Porovnání pilíře II

Pilíř II – zděný hliněnou maltu		
	F	f_c
	[kN]	[MPa]
Únosnost	245	1.81
Zatížení v patě	62.02	0.46
$N_R = 245 \text{ kN} > N_E = 62,02 \text{ kN}$ Bezpečnost 395 %		

Tabulka 25 - Porovnání pilíře III

Pilíř III – vyztužený		
	F	f_c
	[kN]	[MPa]
Únosnost	260	1.93
Zatížení v patě	62.02	0.46
$N_R = 260 \text{ kN} > N_E = 62,02 \text{ kN}$ Bezpečnost 420 %		

Cílem porovnání není definovat únosnost, ale pouze hodnoty získané při zátěžové zkoušce vložit do perspektivy vedle předběžného výpočtu zatížení působícího v objektu konkrétní školní budovy. V České republice stejně jako většině jiných zemí v současné době chybí legislativa, podle které by bylo možné stanovit únosnost stěny vyzděné nepálenými lisovanými cihlami výpočtem, jako je v praxi běžné u klasických zdících prvků. Ze zkušeností místních a empirických zákonitostí lze usoudit, že pro jednoduché jednopodlažní budovy s lehkou střešní konstrukcí je pevnost lisovaných hliněných cihel dostatečná.

Při porovnání byla únosnost všech tří pilířů vyšší než síla od působícího zatížení. Způsob zdění a vyztužení pilířů by měl být u nosných stěn zvážen v místech maximálního zatížení detailněji posouzen v závislosti na konkrétní situaci.

Na závěr této kapitoly bych rád přidal několik 3D vizualizací budoucí podoby školního areálu v Kashitu, které vytvořily členky našeho realizačního týmu Tereza Čechová, Monika Mojžíšová a Barbora Kubíčková.



Obrázek 979 - Vizualizace I areálu střední školy v Kashitu



Obrázek 98 - Vizualizace II areálu střední školy v Kashitu



Obrázek 99 - Vizualizace III areálu střední školy v Kashitu

8 Závěr

Diplomová práce zaměřená na technologii výroby nepálených hliněných cihel pomocí manuálního lisu v teoretické části seznamuje čtenáře s hliněným stavitelstvím a technologickým postupem lisování cihel a jejich skladování. Velký význam je připsán optimalizaci použité hliněné směsi, která se v praxi vždy liší v závislosti na lokalitě, vnějších podmínkách a složení. Hliněné konstrukce nemají definované vlastnosti legislativou, a proto se v praxi jejich chování odhaduje na základě zkušeností stavitelů zběhlých v této problematice, empirických zákonitostí a tradičních postupů, které jsou historicky ověřeny.

Technologie výroby nepálených hliněných cihel s využitím ručního manuálního lisu byla zvolena, protože umožňuje výrobu cihel svépomocí bez nutnosti sofistikovaných hydraulických strojů a speciálního náčiní, které nejsou běžně dostupné. Ačkoliv praktická část probíhala ve střeoevropských podmínkách mírného pásu, byl přístup k provádění experimentu přizpůsoben možné budoucí implementaci pro výstavbu střední školy v Zambii. Během osmi měsíců bylo vyrobeno téměř 500 nepálených hliněných cihel a spotřebováno 2,87 tun materiálu. Hlína byla sejmuta ze stavby nedaleko Prahy, kde byla označena za odpadní materiál. Na základě polních zkoušek a praktických experimentů byla hlína odtučněna příměsí písku darovaným z trojské betonárky. U optimalizované směsi byl proveden granulometrický a mineralogický rozbor.

Na základě zkušeností a poznatků získaných při práci se zapůjčeným manuálním lisem byl navržen a vyroben prototyp vylepšeného lisu, na kterém byly vyrobeny hliněné cihly. U vyrobených cihel byly v praktické části ověřeny mechanicko-fyzikální vlastnosti. Cílem bylo zkoumat vliv přidání cementové stabilizace na pevnost cihel v tlaku. Byla ověřena hypotéza, že stabilizované cihly budou schopny odolat většímu zatížení. Současně byl ověřen vliv povrchové úpravy cihel, kde se potvrdilo, že zaříznuté cihly s nanesenou zarovnávací sádrovou vrstvou odolají většímu zatížení než cihly bez povrchových úprav. U cihel s povrchovou úpravou se rozdíl v pevnosti stabilizovaných a nestabilizovaných cihel výrazně snížil.

V druhé části experimentu byly z vyrobených cihel vyzděny tři pilíře o rozměrech 90 x 90 x 15 cm. Jeden pilíř byl vyzděn na sucho, druhý na hliněnou maltu a třetí byl při vyzdívání na hliněnou maltu dodatečně vyztužen výplňovým betonem a ocelovou výztuží. Pilíře byly po 23 dnech podrobeny zátěžové zkoušce, během které byl zkoumán vliv způsobu zdění pilíře na únosnost a deformaci. K výrobě hliněné malty byla využita stejná hlína jako k výrobě cihel, jen tentokrát byla proseta separačním sítem o velikosti 4 mm a nebyla odtučňována příměsí písku. Experiment ukázal, že hliněná malta v ložních a styčných spárách výrazně zvyšuje únosnost a snižuje deformaci. Únosnost obou pilířů zděných na hliněnou maltu byla téměř dvojnásobná než u pilíře zděného na sucho. Naopak ne příliš velký význam byl prokázán u dodatečného vyztužení, kdy se únosnost pilíře oproti nevyztuženému sice zvýšila, ale rozdíl byl zanedbatelný v případě únosnosti i deformace. Během destruktivní zkoušky se ukázalo, že k porušení u vyztuženého pilíře došlo v místě svazování výztuže a že výplňový beton dosahoval nízké pevnosti. Lze tedy usuzovat, že při vhodnějším způsobu vyztužení by se únosnost ještě zvýšila.

Za největší přínos této diplomové práce považuji vedle hodnot naměřených během experimentu získání zkušeností při práci s hlínou jako stavebním materiálem. Z projektu střední školy v Zambii byla vybrána typická budova s učebnami a v nejvíce zatíženém bodě bylo porovnáno maximální zatížení s naměřenými hodnotami při zátěžovém testu. Ukázalo se, že všechny tři pilíře by byly schopné přenést dostatečné zatížení s bezpečností 218 %, 395 % a 420 % v závislosti na zdící technice. Na výstavbu objektu by bylo potřeba vyrobit přibližně 21 000 hliněných cihel. Ze zkušeností během výroby cihel v rámci experimentu byla stanovena výrobní rychlost na 30 cihel za hodinu při přítomnosti 3-4 osob. Potřebné množství cihel by bylo vyrobeno během 5 týdnů, pokud bychom měli jeden lis. Spotřeba materiálu by při stejném složení hliněné směsi byla přibližně 75 m³ hlíny a 19 m³ písku.

Skepse k hliněným konstrukcím pramení především z nedostatku zkušeností a důvěry v tento materiál. Důvěru ani zkušenosti teoretickou rešerší nezískáme, k tomu nám může pomoci jedině vlastní praktická zkušenost. S rostoucím významem environmentálně šetrných materiálů, které vytváří příjemné prostředí pro život a nevyžadují těžkou průmyslovou techniku, se dá v budoucnu předpokládat i nadále rostoucí význam hliněných konstrukcí. S hlínou se pracuje snadno, ale je těžké její chování a vlastnosti zobecnit a přesně definovat. Pro prohloubení znalostí a vyvození konkrétnějších závěrů by muselo být provedeno podrobnější měření s větším kvantem dat na více vzorcích.

Seznam zdrojů

- [1] GERNOT MINKE: Příručka hliněného stavitelství, Bratislava, 2009, ISBN 978-80-969698-2-1
- [2] PAUL JAQUIN a CHARLES AUGARDE: Earth Building, Devon, UK, ISBN 978-1-84806-192-7
- [3] <https://www.jarfel.com.br/>
- [4] ČSN 73 6133 „Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací“, ČR 03/2010
- [5] HOUBEN H., GUILLAUD H.: Earth Construction – A Comprehensive Guide, ITDG Publishing, London, 2003, ISBN 1 85339 193 X
- [6] PIERRE-CLAUDE AITCIN: Vysokohodnotný beton, Praha, 2005, ISBN 80-86769-39-9
- [7] ŠIMEK J., HOLOUŠKOVÁ T.: Mechanika zemin a zakládání staveb, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996, ISBN 80-01-01479-7
- [8] VAN DAMME H., GELARD D., FONTAINE L., MAXIMILIEN S., OLAGNON CH., LAURENT J.-P., HOUBEN H.: Water and Cohesion of Earthen Materials. Towards an Optimum Water Content for Earthquake Resistance, Proceedings of International Conference „Living in Earthen Cities – Kerpic’05, Istanbul Technical University, 2005, ISBN 975-561-269-6
- [9] MECHLOVÁ E., KOŠTÁL K. A KOL.: Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz fyziky, Prométheus, 2001, ISBN 80-7196-151-5
- [10] ZIEGLER V.: Základy mineralogie a petrografie pro studenty Pedagogické fakulty, skriptum, UK v Praze, 2003, ISBN 80-7290-111-7
- [11] BERNARD, J.H., ROST, R. A KOL.: Encyklopedický přehled minerálů, Academia Praha, 1992
- [12] KORBEL P., NOVÁK, M.: Encyklopedie minerálů, REBO Productions, 1999
- [13] PAVLÍK, ZBYŠEK; PAVLÍKOVÁ, MILENA; HOŠEK, JIŘÍ. Materiálové inženýrství I. Praha: CVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04932-7.
- [14] MIKE BOLTON, STEVE BURROUGHS: Building Houses with Earth Blocks, CSIR Pretoria, South Afrika, 2001, ISBN 0-7988-5689-0
- [15] THOMAS STURN MOREIRA: Experimental characterization of dry-stack interlocking compressed earth block masonry, University of Minho, Portugal, 2014
- [16] ČSN EN 12350-6 (73 1301) Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost, Praha, 2020

- [17] <http://hgf10.vsb.cz/546/VHZ1/vyuka/hmoty/vlastnosti.html>
- [18] ČSN EN 12390-3 (73 1302) Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles, Praha 2020
- [19] <http://www.itam.cas.cz/>
- [20] ČSN EN 1015-11 (72 2400) Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku
- [21] ČSN EN ISO 17892-4 (72 1007) Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovené zrnitosti
- [22] <http://www.pedologie.cz/postupy/postupy.htm>
- [23] <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/elektro-mechanicka-prosevacka.html>
- [24] ČSN 73 6133 (736133) Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací
- [25] <https://www.smartshelterfoundation.org/25-eqr-schools-in-rubble-stone/#>
- [26] <https://impactnepal.org/>
- [27] www.lehmtonerde.at
- [28] www.mcarchitects.it
- [29] www.levs.nl
- [30] www.zrs.berlin
- [31] www.impactnepal.org

Seznam obrázků

- Obrázek 1 - Používaný pákový lis, foto: Petr Čanda
- Obrázek 2 - Provizorní výpalna cihel, foto: Petr Čanda
- Obrázek 3 - Vysušování čerstvě stlačených cihel, foto Petr Čanda
- Obrázek 4 - Chrám Ramesse II., Egypt, zdroj: <http://home.tiscali.cz/>
- Obrázek 5 - Haus Rauch vstup, zdroj: www.lehmtonerde.at
- Obrázek 6 - Haus Rauch interiér, zdroj: www.lehmtonerde.at
- Obrázek 7 - Haus Rauch schodiště, zdroj: www.lehmtonerde.at
- Obrázek 8 - Haus Rauch vnější pohled, zdroj: www.lehmtonerde.at
- Obrázek 9 - Pohled na neomítnutou slaměnou stěnu, zdroj: <https://www.idnes.cz/>
- Obrázek 10 - Pohled na lesní školku, zdroj: <https://www.idnes.cz/>
- Obrázek 11 - Pohled na lesní školku před dokončením, zdroj: <https://www.idnes.cz/>
- Obrázek 12 - Interiér lesní školky, zdroj: <https://www.idnes.cz/>
- Obrázek 13 - 3D tisk domu, zdroj: <https://www.mcarchitects.it/>
- Obrázek 14 - Interiér, zdroj: <https://www.mcarchitects.it/>
- Obrázek 15 - Detail struktury stěny, zdroj: <https://www.mcarchitects.it/>
- Obrázek 16 - Pohled na dům, zdroj: <https://www.mcarchitects.it/>
- Obrázek 17 - Příprava hliněné směsi, zdroj: <https://www.jarfel.com.br/>
- Obrázek 18 - Čerstvá nepálená hliněná cihla, zdroj: <https://www.jarfel.com.br/>
- Obrázek 1910 - Ukládání a vyztužování cihel, zdroj: <https://www.jarfel.com.br/>
- Obrázek 20 - Pohled na hrubou stavbu domů, zdroj: <https://www.jarfel.com.br/>
- Obrázek 21 - Pohled na vstup do budovy, zdroj: <https://www.levs.nl/>
- Obrázek 22 - Příprava hliněné směsi pro zastřešovací vrstvu, zdroj: <https://www.levs.nl/>
- Obrázek 23 - Pohled na hrubou stavbu, zdroj: <https://www.levs.nl/>
- Obrázek 24 - Interiér školy, zdroj: <https://www.levs.nl/>
- Obrázek 25 - Budova jednoho z 11 realizovaných vzdělávacích center, zdroj: <https://www.zrs.berlin/>
- Obrázek 2611 - Výroba nepálených hliněných cihel, zdroj: <https://www.zrs.berlin/>

Obrázek 27 - Interiér budovy a pohled na bambusový krov, zdroj:
<https://www.zrs.berlin/>

Obrázek 28 - Detail napojení bambusu a hliněné svislé konstrukce, zdroj:
<https://www.zrs.berlin/>

Obrázek 29 - Lisování hliněných cihel, zdroj: www.impactnepal.org

Obrázek 30 - Skladování lisovaných cihel, zdroj: www.impactnepal.org

Obrázek 31 - Zdění vylisovaných cihel, zdroj: www.impactnepal.org

Obrázek 32 - Postavené domy, zdroj: www.impactnepal.org

Obrázek 33 – Kaolinit [1]

Obrázek 34 – Illit [1]

Obrázek 3512 – Montmorillonit [1]

Obrázek 36 - Stav drsného povrchu

Obrázek 37 - Stav drsnosti

Obrázek 38 - Klasický stav

Obrázek 39 - Hlína po zkoušce volným pádem, zdroj: [1]

Obrázek 40 - "Ball test", zdroj: [15]

Obrázek 131 - Ukázka zatěžovací zkoušky (beton), zdroj: [17]

Obrázek 42 - Trámeček umístěný mezi 3 zatěžovací válce, zdroj: [20]

Obrázek 43 - Elektromechanický stroj na prosévání, zdroj: [23]

Obrázek 44 - Pipetovací sestava, zdroj: [22]

Obrázek 45 - Formy na výrobu hliněných cihel, zdroj: [14]

Obrázek 46 - Jednoduchý manuální lis na výrobu hliněných cihel, zdroj [15]

Obrázek 47 - Zapůjčení manuální lis využitý během I. etapy, foto: autor

Obrázek 48 - Jednotlivé díly vylepšeného prototypu manuálního lisu, foto: autor

Obrázek 49 - Výkres vylepšeného manuálního lisu, zdroj: Cut-Tech s.r.o.

Obrázek 50 - Sestavený prototyp vylepšeného manuálního lisu, foto: autor

Obrázek 51 - Příprava hliněné směsi, foto: autor

Obrázek 52 - Pěchovací trychtýř manuálního lisu, foto: autor

Obrázek 53 - Lisování cihel, foto: autor

Obrázek 54 - Čerstvě vylisované cihly, foto: autor

Obrázek 55 - Vyskládané čerstvě vylisované cihly, foto: autor

Obrázek 56 - Přikryté čerstvě vylisované cihly, foto: autor

Obrázek 57 - Nakládání cihel před jejich transportem, foto: autor

Obrázek 58 - Pilíř zděný na sucho

Obrázek 59 - Maltové lože, foto: autor

Obrázek 60 - Zdění pilíře, foto: autor

Obrázek 61 - Vyzděný pilíř I., foto: autor

Obrázek 62 - Pilíř zděný na hliněnou maltu

Obrázek 63 - Prosévání hlíny, foto: autor

Obrázek 64 – Hl. malta v ložní spáře, foto: autor

Obrázek 65 - Vyzděný pilíř II, foto: autor

Obrázek 66 - Pilíř vyztužený betonem a ocelovou výztuží

Obrázek 67 - Vyztužování pilíře, foto autor

Obrázek 68 - Provazování výztuže, foto: autor

Obrázek 69 - Vyzděný pilíř III, foto: autor

Obrázek 70 - Odebírání hlíny, foto: autor

Obrázek 71 - Převoz hlíny, foto: autor

Obrázek 72 - Hlína převezena na místo výroby cihel, foto: autor

Obrázek 73 14 - Ball test (1), foto: autor

Obrázek 74 Ball test (2), foto: autor

Obrázek 75 - Ball test (3), foto: autor

Obrázek 76 - Vzorky z I. výrobní sady, foto: autor

Obrázek 77 - Vzorky z II. výrobní sady, foto: autor

Obrázek 78 - Zkouška pevnosti v ohybu, foto: Petr Čanda

Obrázek 79 - Zkouška v tlaku na zlomcích. foto: Petr Čanda

Obrázek 80 - Zkouška pevnosti v tlaku výplňového betonu, foto: Petr Čanda

Obrázek 81 - Porovnání cihel bez stabilizace a s cementovou stabilizací, foto: autor

Obrázek 82 - Zaříznuté a zasádrované vzorky cihel před stlačení, foto: Petr Čanda

Obrázek 83 - Porušení cihly bez povrchových úprav, foto: autor

Obrázek 84 - Způsob porušení cihel s povrchovou úpravou, foto: Petr Čanda
Obrázek 155 - Porušení pilíře I při zátěžové zkoušce, foto: Petr Čanda
Obrázek 86 - Porušení pilíře II při zátěžové zkoušce, foto: Petr Čanda
Obrázek 87 - Porušení pilíře III při zátěžové zkoušce, foto: Petr Čanda
Obrázek 88 - Odhalená výztuž pilíře po odstranění cihel, foto: Petr Čanda
Obrázek 89 - Vesnice Kashitu, Zambie, foto: Petr Čanda
Obrázek 90 - Základní škola v Kashitu, foto: Petr Čanda
Obrázek 91 - Areál střední školy v Kashitu, autor: Tereza Čechová
Obrázek 92 - Mapa areálu střední školy v Kashitu, autor: Tereza Čechová
Obrázek 93 - Pohled na školní budovu
Obrázek 94 - Půdorys školní budovy
Obrázek 95 - Skladba stěn ve školní budově
Obrázek 96 - Základy školní budovy
Obrázek 9716 - Vizualizace I areálu střední školy v Kashitu
Obrázek 98 - Vizualizace II areálu střední školy v Kashitu
Obrázek 99 - Vizualizace III areálu střední školy v Kashitu

Seznam tabulek

- Tabulka 1 - Hlína jako stavební materiál
- Tabulka 2 - Klasifikace zrn podle velikosti částic [4]
- Tabulka 3 - Rozdělení zemin na základní skupiny [4]
- Tabulka 4 - Nejběžněji vyskytované minerály [11, 12]
- Tabulka 5 - Hlavní minerály v portlandském slínku [13]
- Tabulka 6 - Množství složek hliněné směsi pro I. výrobní sadu
- Tabulka 7 - Množství složek hliněné směsi pro II. výrobní sadu
- Tabulka 8 - Dílčí zrnitostní složení
- Tabulka 9 - Stanovené vlastnosti hliněné směsi
- Tabulka 10 - Výsledky rentgen-fluorescenční spektrometrie
- Tabulka 11 - Složení jednotlivých hliněných směsí
- Tabulka 18 - Pevnost v ohybu hliněné malty
- Tabulka 19 - Pevnost v tlaku hliněné malty
- Tabulka 20 - Pevnost v tlaku výplňového betonu
- Tabulka 21 - Průběh pevnosti tlaku hliněných cihel
- Tabulka 22 - Pevnost v tlaku koncovaných a nekoncovaných cihel
- Tabulka 17 - Deformace pilíře I
- Tabulka 18 - Deformace pilíře II
- Tabulka 19 - Deformace pilíře III
- Tabulka 20 - Maximální hodnoty naměřené při zátěžové zkoušce
- Tabulka 21 - Rychlost výroby cihel v závislosti na počtu osob a lisů
- Tabulka 232 - Zatížení na stěnu školní učebny
- Tabulka 23 - Porovnání pilíře I
- Tabulka 24 - Porovnání pilíře II
- Tabulka 25 - Porovnání pilíře III

Seznam grafů

Graf 1 - Křivka zrnitosti – jílová půda [1]

Graf 2 - Křivka zrnitosti – prachová hlína [1]

Graf 3 - Křivka zrnitosti – Silně písčité hlína [1]

Graf 4 - Pevnost v tlaku v závislosti na typu hlíny a množství cementu [5]

Graf 5 - Křivka zrnitosti

Graf 6 - Průběh pevnosti v tlaku

Graf 7 - Pevnost v tlaku po 28 dnech

Graf 8 - Objemová hmotnost po 28 dnech

Graf 9 - Deformace pilíře I

Graf 10 - Deformace pilíře II

Graf 11 - Deformace pilíře III

Graf 12 - Maximální pevnost v tlaku

Graf 13 - Maximální deformace

Graf 14 - Porovnání deformace pilířů

Seznam vzorců

Vzorec 1 - Smyková pevnost zeminy [7]

Vzorec 2 - Kapilární síla za stavu drsného povrchu [8]

Vzorec 3 - Kapilární síla za stavu drsnosti [8]

Vzorec 4 - Kapilární síla za klasického stavu [8]

Vzorec 5 - Objemová hmotnost [16]

Vzorec 6 - Pevnost v tlaku [18]

Vzorec 7 - Pevnost v ohybu [20]

Vzorec 8 - Hmotnostní podíl frakce na sítu [21]

Seznam příloh

Výkres 1 - Pohled na budovu školy

Výkres 2 - Půdorys

Výkres 3 - Řez

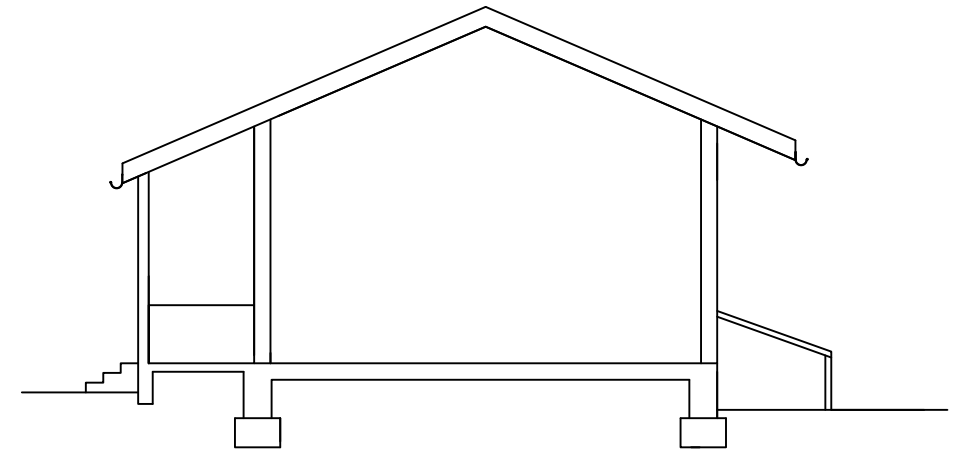
Výkres 4 - Komplexní řez

Výkres 5 - Modulové rozmístění cihel

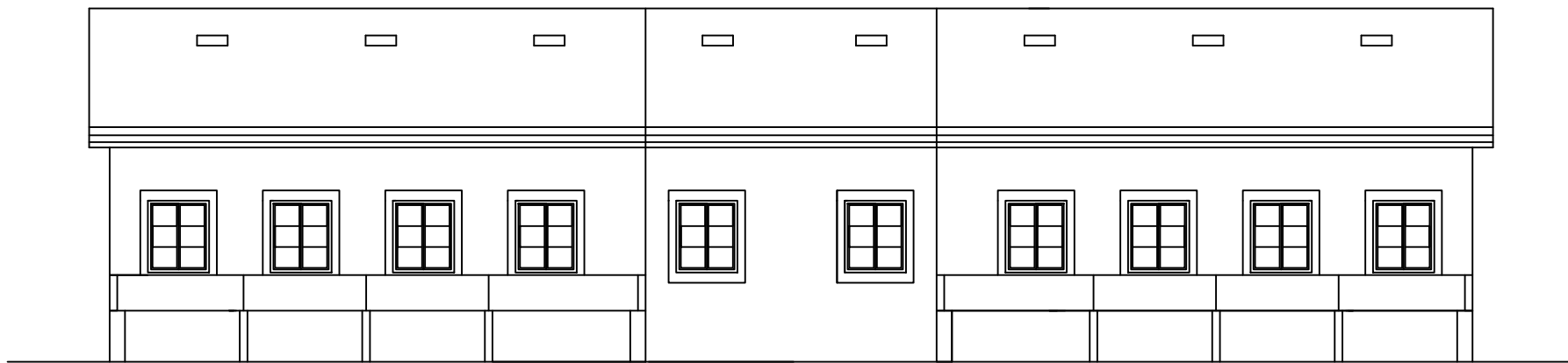
SEVER



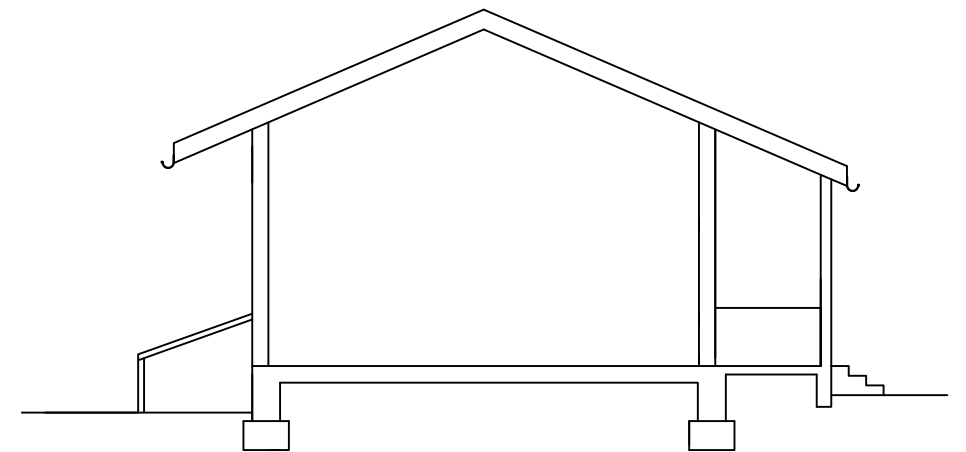
ZÁPAD




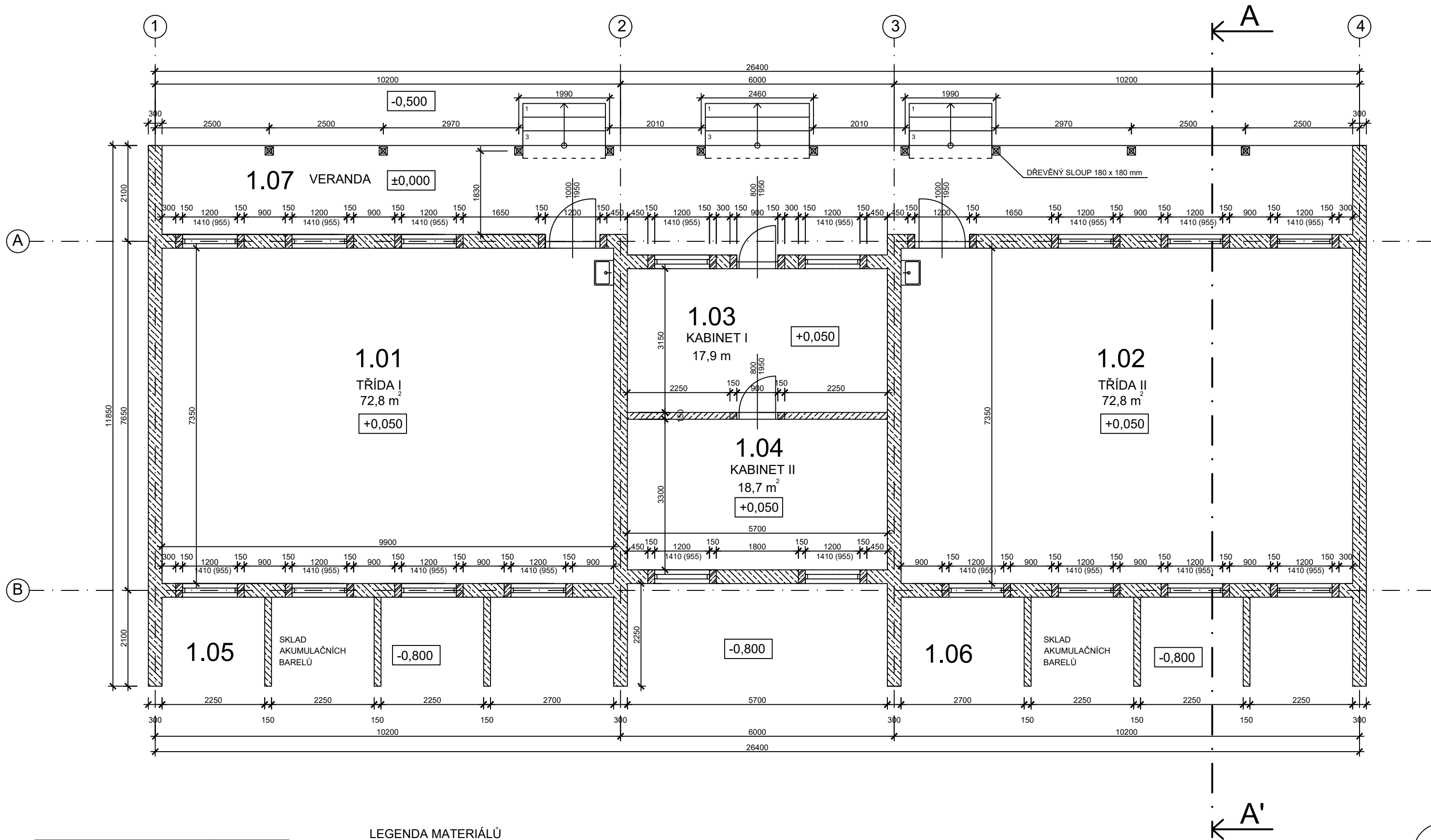
JIH



VÝCHOD







Student: Bc. Lukáš Bejček	Vedoucí práce: Ing. Jan Růžička, Ph.D.	Školní rok: 2021/2022	Budovy a prostředí ČVUT 
Předmět: Diplomová práce			Datum: 20/12/2021
Výkres: POHLED NA BUDOVU ŠKOLY			Měřítko: 1:130 (A3)
			Č. výkresu: 1

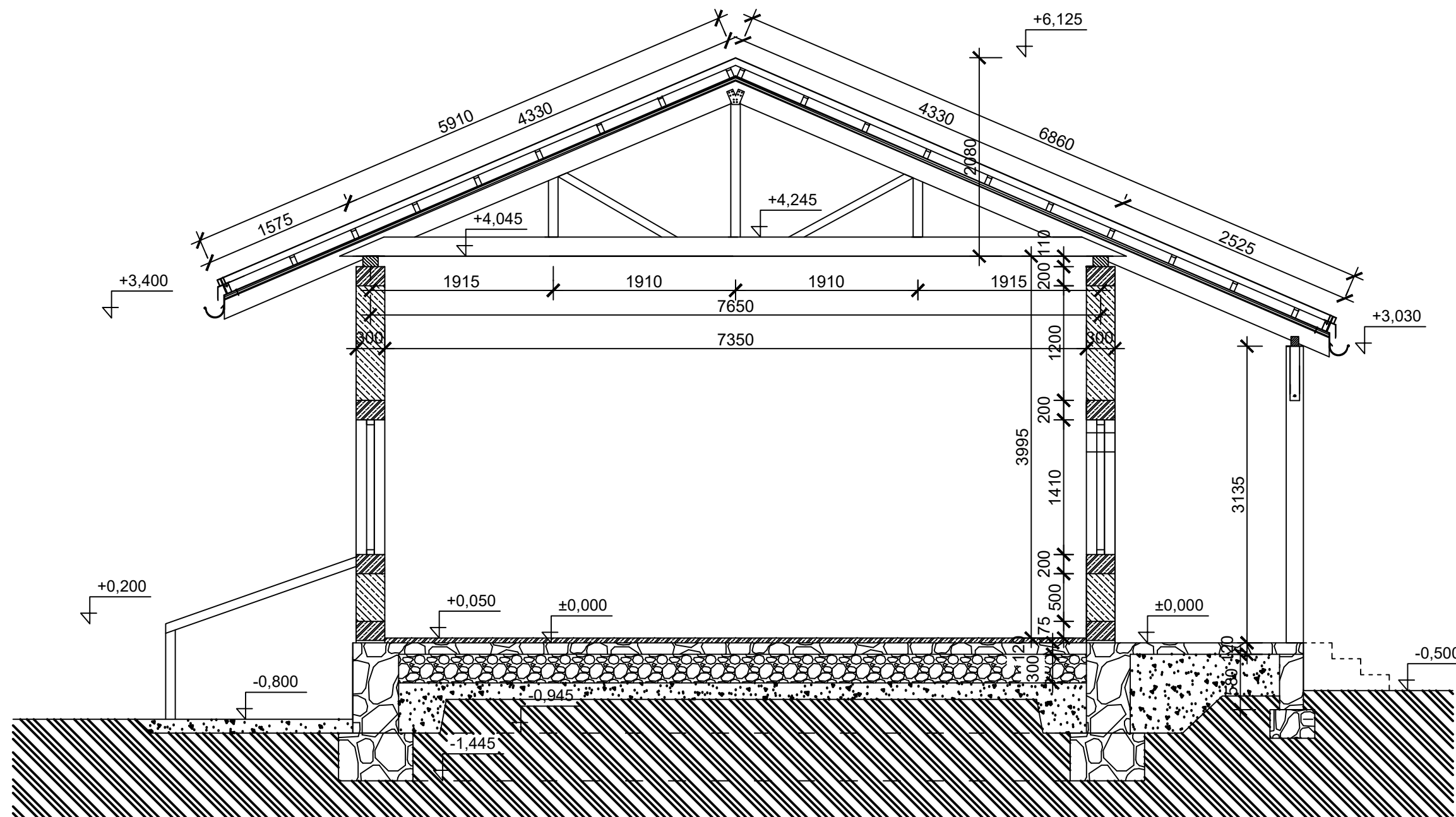


MÍSTNOST	VELIKOST
1.1 TŘÍDA I	72,8 m ²
1.2 TŘÍDA II	72,8 m ²
1.3 KABINET I	17,9 m ²
1.4 KABINET II	18,7 m ²

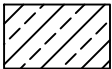

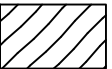



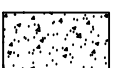
LEGENDA MATERIÁLŮ


-  - Nepálené hliněné cihly tl. 300 mm
-  - Železobeton
-  - Nepálené hliněné cihly tl. 150 mm

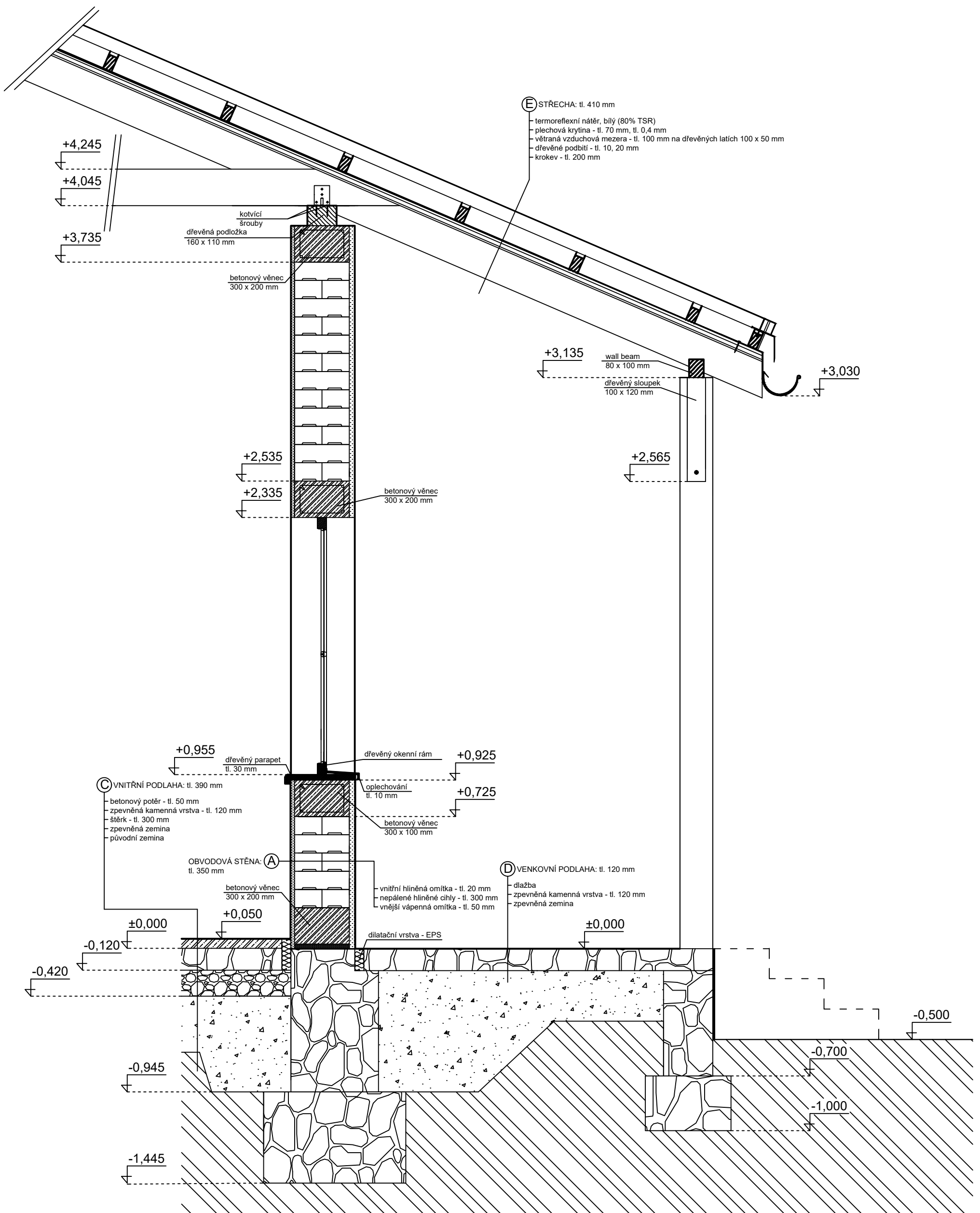
Student: Bc. Lukáš Bejček	Vedoucí práce: Ing. Jan Růžička, Ph.D.	Školní rok: 2021/2022	Budovy a prostředí ČVUT
Předmět: Diplomová práce			
Výkres: PŮDORYS			Datum: 20/12/2021
			Měřítko: 1:80 (A3)
			Č. výkresu: 2



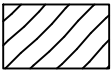
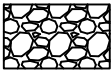
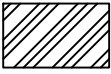

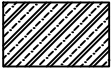

LEGENDA MATERIÁLŮ:


- | | | | | | |
|---|--|---|-------------------|---|---------|
|  | - Nepálené hliněné cihly
tl. 300 mm |  | - Štěrk |  | - Dřevo |
|  | Původní zemina |  | - Kámen | | |
|  | - Železobeton |  | - Zpevněná zemina | | |

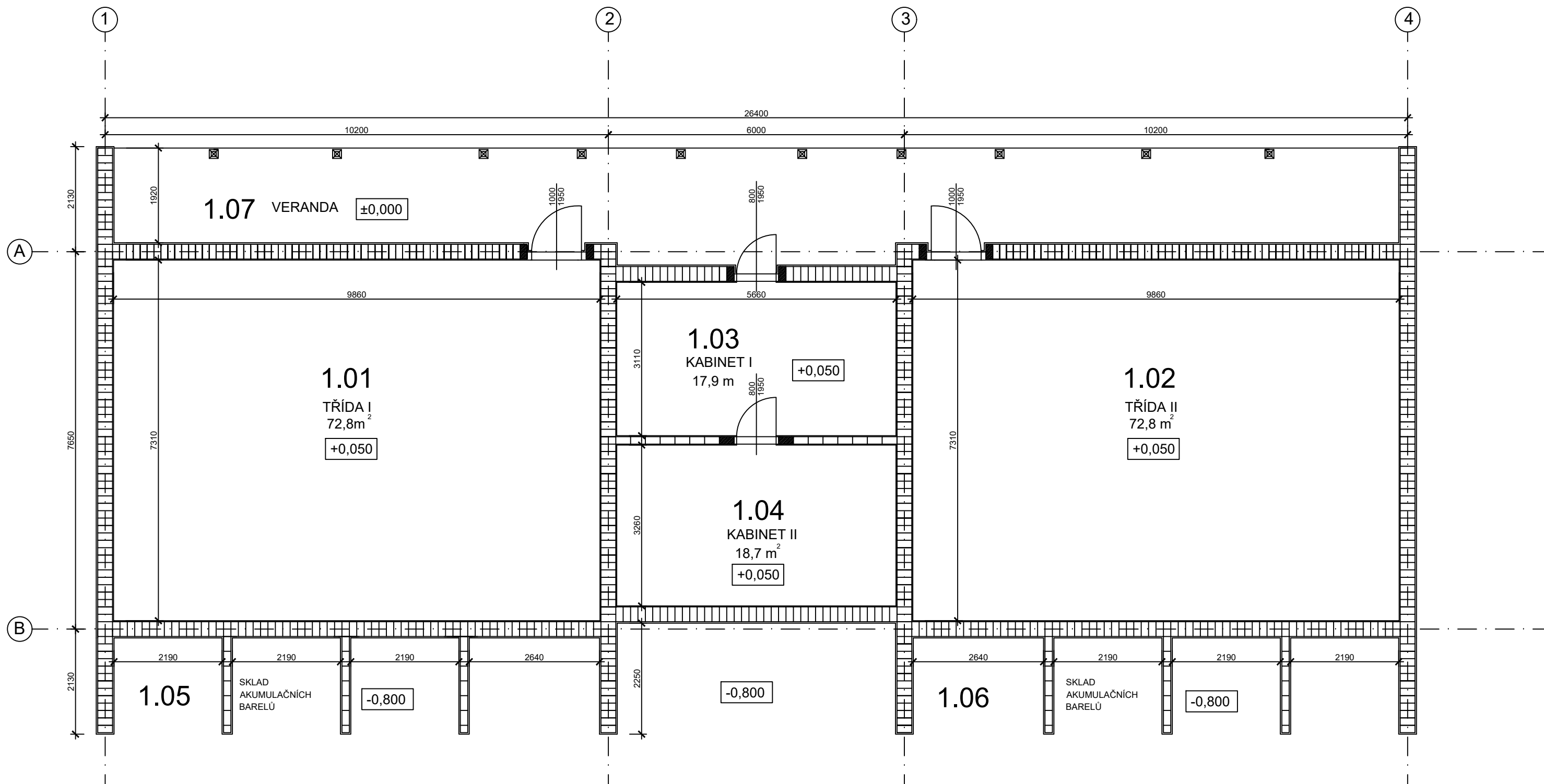
Student: Bc. Lukáš Bejček	Vedoucí práce: Ing. Jan Růžička, Ph.D.	Školní rok 2021/2022	Budovy a prostředí ČVUT 
Předmět: Diplomová práce			Datum: 20/12/2021
Výkres: KOMPLEXNÍ ŘEZ			Měřítko: 1:50 (A3)
			Č. výkresu: 3



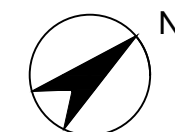
LEGENDA MATERIÁLŮ:

	- Dřevo		- Štěrk
	- Původní zemina		- Kámen
	- Beton		- Zpevněná zemina

Student: Bc. Lukáš Bejček	Vedoucí práce: Ing. Jan Růžička, Ph.D.	Školní rok: 2021/2022	Budovy a prostředí ČVUT
Předmět: Diplomová práce			
Výkres: KOMPLEXNÍ ŘEZ			Datum: 20/12/2021
			Měřítko: 1:20 (A3)
			Č. výkresu: 4



MÍSTNOST	VELIKOST
1.1 TŘÍDA I	72,8 m ²
1.2 TŘÍDA II	72,8 m ²
1.3 KABINET I	17,9 m ²
1.4 KABINET II	18,7 m ²



Student: Bc. Lukáš Bejček	Vedoucí práce: Ing. Jan Růžička, Ph.D.	Školní rok 2021/2022	Budovy a prostředí ČVUT
Předmět: Diplomová práce			Datum: 20/12/2021
Výkres: MODULOVÉ ROZMÍSTĚNÍ CIHEL			Měřítko: 1:80 (A3)
			Č. výkresu: 5