

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Karel Kašák

Katedra ocelových konstrukcí

K 134



ČVUT v Praze

Fakulta stavební

Leden 2018



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: KAŠÁK	Jméno: Karel	Osobní číslo: 409703
Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí		
Studijní program: Stavitelství		
Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Zdivo ze skleněných cihel	
Název bakalářské práce anglicky: Glass brick masonry	
Pokyny pro vypracování: Zpracování rešerše použití klasického zdiva ve srovnání se zdivem z plných skleněných cihel, popis již realizovaných konstrukcí. Experimentální ověření různých malt použitelných na spojování skleněných cihel - smykové a tahové zkoušky včetně vyhodnocení + provedení tlakové zkoušky zdiva ze skleněných cihel.	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.	
Datum zadání bakalářské práce: 6.10.2017	Termín odevzdání bakalářské práce: 14.1.2018 <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 bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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

Předložená bakalářská práce v první části shrnuje zdící materiály pro nosné stavební konstrukce. Přehledně jsou popsány jednotlivé technologie od kamenného zdiva po nejnovější materiály používané v současnosti. Druhá část je věnována zdivu ze skleněných cihel, příkladům jejich použití v praxi. Poslední část se zabývá experimentálním ověřováním únosnosti zdiva z plných skleněných cihel. V závěru je provedeno porovnání klasického zdiva z pálených cihel se zdivem z plných skleněných cihel.

Klíčová slova: zdivo, skleněné cihly, zkouška v tlaku, zkouška ve smyku, pevnost malty

Abstract

The presented bachelor thesis summarizes the walling materials for supporting construction structures in the first part. There are described individual technologies from stone masonry to the latest trends used in present. The second part is dedicated to glass bricks, examples of their use in practice. The last part examines the experimental verification of bearing capacity of soled glass bricks. In the end, a comparison is made between the classic masonry brickwork and the brickwork made of solid glass bricks.

Keywords: masonry, glass bricks, compression test, shear test, mortar

Čestné prohlášení

Prohlašuji tímto, že jsem zadanou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Martiny Eliášové, CSc. a uvedl jsem v seznamu literatury veškerou použitou literaturu a ostatní zdroje.

Datum: 14.1.2017

Podpis:

Poděkování

Chěl bych poděkovat svojí vedoucí bakalářské práce paní doc. Ing. Martině Eliášové, CSc. a panu Ing. Jiřímu Fílovi za jejich pomoc při vytváření bakalářské práce a provádění experimentů, které má bakalářská práce obsahuje.

Obsah bakalářské práce

1	Úvod.....	7
2	Klasické zdivo	7
2.1	Kamenné zdivo	7
2.2	Hliněné zdivo	11
2.3	Keramické zdivo	13
2.4	Betonové a pórobetonové zdivo	16
3	Netradiční zdivo ze skleněných plných cihel.....	22
3.1	Atocha memorial.....	23
3.2	Crystal house.....	25
3.3	Korunní Fontána (Crown Foutain)	27
3.4	Optický skleněný dům	29
4	Experimentální ověření zdiva ze skleněných cihel	32
4.1	Smyková zkouška	32
1.1.	Uspořádání experimentů	36
1.2.	Vyhodnocení experimentu	37
4.2	Tahová zkouška	Chyba! Záložka není definována.
4.3	Zkoušky malty	45
4.3.1	Tah za ohybu	48
4.3.2	Tlaková zkouška malty.....	50
4.4	Tlaková zkouška pilíře.....	51
5	Literatura	Chyba! Záložka není definována.

1 Úvod

Zděné konstrukce patří k nejstarším technologiím, které se při výstavbě konstrukcí používají. Z historie je dodnes dochována řada příkladů kamenného zdiva – např. pyramidy, mayské náboženské stavby, aj. V čase se materiál pro zdění proměňoval. Použití nových technologií vedlo od sušených cihel k páleným, betonovým či pórobetonovým tvárniciím s cílem vylepšit pevnost, rychlost výstavby, dopad na životní prostředí, trvanlivost atd. Současná architektura se vyznačuje lehkostí a transparentností, s čímž souvisí poptávka po skleněných konstrukcích – fasády, nosníky, podlahy, zábradlí. Sklo se dnes uplatňuje i jako materiál pro zdivo.

2 Klasické zdivo

2.1 Kamenné zdivo

Kámen se jako stavební materiál používá již od starověkého Řecka přes egyptské pyramidy až po naše středověké hrady a mosty. I v dnešních stavbách najde kámen uplatnění, ale ne na celé stavby (např. ploty), opěrné zdi (gabiony) nebo pro rekonstrukce starých kamenných staveb. Přes celou historii se kameny používaly a používají k výstavbě cest. Pro stavby se používaly různé typy kamenů, ať už ze sedimentárních měkkých hornin (pískovec, opuka, vápenec) nebo tvrdších hornin (žuly, grandioritů). Kameny se opracovávaly ručně za použití jednoduchých nástrojů (např. lemavadlo, prýskač, špičák, dláto), viz *obr. 2.1*. Tyto nástroje se používají i dnes, ale je možné použít i částečnou mechanizaci. V historii nebylo zvykem kamenné zdivo spojovat nějakým materiálem, díky tomu jsou tyto stavby ohromné a to jak půdorysně tak i výškově a odpovídá tomu i tloušťka jejich stěn.^[1]



Obr. 2.1 Špičák s kovovou paličkou

Kamenné zdivo lze použít na základy či sokly budov, opěrné stěny, podezdívky u plotů. Ohledně spojování kamenného zdiva máme dvě možnosti, jak ho provádět. V dřívějších dobách se kameny kladly bez použití spojovací směsi (to znamená na sucho), což lze provést díky velké hmotnosti. Později se začaly kameny spojovat pomocí malty a díky tomu se mohly zdi staveb vyzdívat užší, protože není potřeba taková hmotnost k udržení stability stavby.

Druh kamenů

Pro kamenné zdivo používáme buď neopracovaný kámen, nebo opracovaný kámen (kopáky, haklíky, kvádry). Na stavby se používaly nejvíce žuly, pískovce, mramory a čediče. V *tab.2.1* jsou uvedeny pevnosti v tlaku sedimentárních hornin používaných při výstavbě objektů. ^[1]

Tab.2.1 Pevnost v prostém tlaku vybraných sedimentárních hornin

Typ horniny	pískovec	vápenec	opuka
Pevnost v prostém tlaku (MPa)	30 - 80	50 - 230	40 - 80

V pohledové straně zdiva se mohou setkat maximálně 3 spáry. Styčné spáry mohou jít maximálně přes 2 vrstvy. Vazák se zavazuje do zdiva minimálně 300 mm. Vnitřní prostor zdiva se vyplňuje menšími kameny. Pravidelné zdivo se musí spárovat.

Zdivo z lomového kamene

Zdivo se provádí z hrubě kamenicky opracovaných kamenů, kde tloušťka spáry je 15 - 40 mm. Minimální velikost kamenů pro zdivo je 200 mm. Do rohů stěn se často umísťují větší kvádry (nárožní kámen). Při vyzdívání provádíme po 1 metru výšky srovnání ložné spáry. Tento typ zdiva se používá výhradně pro sokly budov, ale je možné z nich postavit i celou zeď. ^[2]

Řádkové zdivo

U řádkového zdiva rozlišujeme 2 typy podle použitých kamenů - hrubé a čistě řádkové zdivo. Hrubé řádkové zdivo představují kameny opracované pouze na čelní straně. Styčné spáry nemusí být kolmé na ložné spáry a tloušťka spáry je 15 - 40 mm. Čistě řádkové zdivo se skládá z kamenů opracovaných na čelní straně a boční strany jsou opracovány do tloušťky 50 mm. Styčné spáry musí být kolmé na ložné spáry a tloušťka spár je 15 - 20 mm, viz *obr. 2.2.* ^[2]



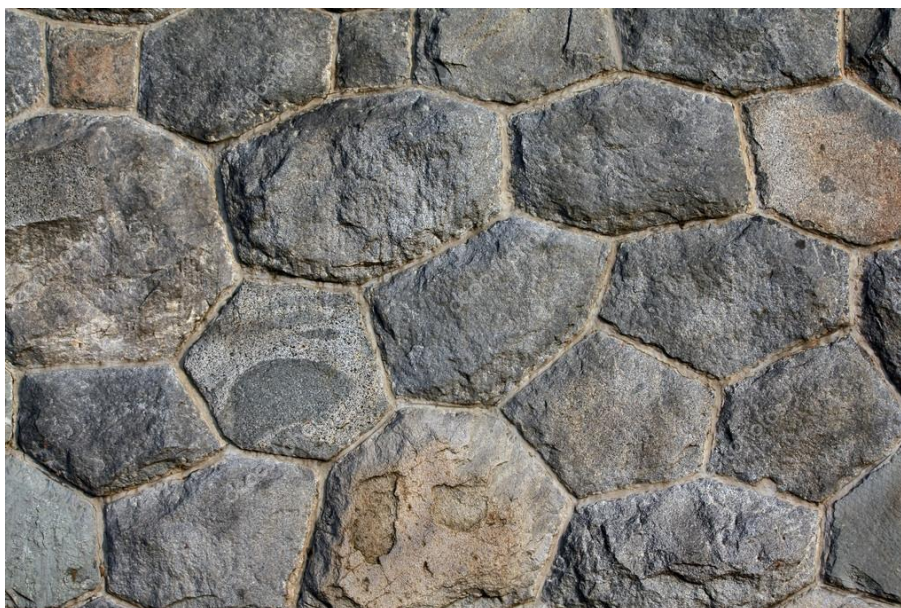
Obr. 2.2 Řádkové zdivo

Haklíkové zdivo

Haklíkové zdivo je svisle provazované zdivo, kde svislé kameny procházejí přes 2-3 vrstvy. Rozlišujeme 2 typy haklíkového zdiva podobně jako u řádkového zdiva a to hrubé haklíkové zdivo a čisté haklíkové zdivo. Na hrubé haklíkové zdivo se používají kameny, které jsou opracovány pouze na čelní straně a tloušťka spár je 15 - 40 mm. Při zdění z čistého haklíkového zdiva je zeď tvořena kameny, které jsou opracovány na čelní straně a boční strany jsou opracovány do tloušťky 50 mm, tloušťka spár je 15 - 20 mm.^[2]

Kyklopské zdivo

Kyklopské zdivo se používá jako pohledová úprava u opěrných a nábřežních stěn. Provedí se z pravidelných pěti až osmiúhelníků a v jednom místě se mohou setkat maximálně 3 spáry v tupých úhlech. Tloušťka spáry je 20 - 40 mm, viz obr. 2.3.^[2]



Obr. 2.3 Kyklopské zdivo

Kvádrové zdivo

Kvádrové zdivo je tvořeno z přesně opracovaných kamenů a spáry jsou o tloušťce 15 - 20 mm. Při zdění jsou k sobě kameny spojovány pomocí malty, která vyplňuje jak ložné tak styčné spáry. Velmi často se používají na stavby opěrných zdí u jezů a řek, viz *obr. 2.4*.^[2]



Obr. 2.4 Kvádrové zdivo

Smíšené zdivo

Je složeno ze dvou či více stavebních materiálů, které tvoří jeden celek (kámen-cihla). Důvody pro takovou kombinaci mohou být rozdílné, například estetické, ekonomické a využití předností jednotlivých materiálů, viz *obr. 2.5*.^[2]



Obr. 2.5 Smíšené zdivo

Gabiony

Používají se především jako ploty, opěrné stěny nebo protihlukové stěny. Provádí se pomocí ocelových drátů, ze kterých se vytvoří klec, do které se umísťují jednotlivé kameny. Je zde kladen požadavek na to, aby se kameny na čelní straně poskládaly tak, že do sebe zapadají. Kameny v gabionovém koši mezi sebou nejsou nijak pevně spojeny, viz *obr. 2.6*.



Obr. 2.6 Gabionová stěna

2.2 Hliněné zdivo

Užívání hlíny jako stavební materiál sahá hodně do historie. Diluviální ložiska poddajné hlíny z bohatých nalezišť umožňovala snadnou těžbu a tvárné zpracování této suroviny. Hlína rovněž dovoluje kombinování s dalšími přírodními materiály, mezi nimiž dominuje dřevo z listnatým stromů, jehličnanů i proutí, kámen a v neposlední řadě sláma či různé druhy travin. Podle způsobu zdění se rozlišuje nabíjené zdivo, zdivo z hliněných válků a nepálené hliněné cihly.^[3]

Nabíjené zdivo

K nejstarším technologickým postupům patřilo dusání hlíny, či pěchování a její tlučení v bedněném dřevěném šalování užívaném jako pohyblivá forma k postupné výstavbě stěn, do nichž se dodatečně vyřezávaly otvory pro okna a vstupní dveře, viz *obr. 2.7*.^[3]



Obr. 2. 7 Nabíjené zdivo

Zdivo z hliněných válků

Další technikou byla výstavba z hliněných válků oválného tvaru. Vytvářely se z hliněného materiálu s příměsí ječmených plev. Válely se ručně z dobře prohněteného nebo prošlapaného hliněného těsta. Bochníkově formované války se kladly diagonálně ve vrstvách kladených proti sobě a prokládaly se v jednotlivých vrstvách povřísky uvázanými ze slámy. Technologický postup a výsledný vzhled připomíná antickou techniku „opus spicatum“^[3], viz obr. 2.8.^[3]



Obr. 2. 8 Zdivo z hliněných válků

Zdivo z nepálených hliněných cihel

Stavby z nepálených hliněných cihel „vepřovic“, „kotovic“, „kotů“ nebo „vepřáků“ patří k nejmladším, nejrozšířenějším a dosud nejméně dotčeným objektům, pakliže nejsou vystaveny přímému působení deště, zatékání, či dalším povětrnostním vlivům. Do hliněné hmoty se přidávaly, mimo plevy a drobně sekané slámy, rovněž prasečí štětiny, případně zbytky suchých rostlin nebo i materiály živočišného původu, viz obr. 2.9.^[3]



Obr. 2.9 Nepálené zdivo

Nevýhodou staveb z nepálených hliněných cihel je, že hliněné cihly nemají potřebnou pevnost v tlaku, a proto není možné z nich stavět více patrové stavby, popřípadě je zatěžovat například betonovou střešní krytinou, viz *obr. 2.10*.



Obr. 2.10 Dům z hliněných cihel

2.3 Keramické zdivo

Keramické zdivo používá jako základní stavební prvek keramickou dutinovou tvárnici, která se spojuje s dalšími tvárnici na pero a drážku, viz *obr.2.11*. V dnešní době je mnoho typů s různými vlastnostmi.

Vlastnosti zdiva určuje kombinace zdících prvků a způsobu spojování keramických bloků. Vysoké tepelné odpory jednotlivých tvární ještě neznamenají uspokojivé hodnoty prostupu tepla celou stěnou. Nezanedbatelný faktor zde hraje šířka spáry a zvolená hmota, jež spojuje jednotlivé tvárnice. Postupem času a zdokonalováním výrobních technologií došlo k minimalizaci mezilehlé spáry.

Jedná se o kompletní stavební systém, používaný jak k horizontálnímu, tak i vertikálnímu zdění, jak je vidět na *obr. 2.12*. Dutiny v keramických tvárnících přinesly dvě inovace – zvýšení tepelné izolace a snížení hmotnosti tohoto materiálu. K jejich přednostem patří i větší rozměr, tudíž se urychlil proces výstavby.

Moderní technologie dovolují dosáhnout velmi vysokých tepelných odporů i bez použití dodatečného zateplování. Nízké difuzní odpory stěn bez kontaktních zateplovacích plášťů pak zaručují kvalitní mikroklima v interiéru stavby.

Zdění urychluje i systém pero - drážka a použití broušených cihel (tzv. přesných tvární), jež snižují spotřebu malty, která se nanáší pouze na horizontální plochy. Vysoce nadstandardními tepelně izolačními schopnostmi disponují tzv. superizolační tvárnice.^[4]



Obr. 2.11 1 Keramické zdivo



Obr. 2.12 2 Keramický strop

Keramické tvárnice se stejně jako klasické cihly vyrábějí pálením z hlíny. Zvýšení pórovitosti se docílí přidáním pórotvorných přísad, například pilin zamíchaných do hlíny, které při vypalování vyhoří.

Výroba začíná vytěžením hlíny a jejím uležením na haldě. Během přípravy suroviny se provádí regulace vlastností změnou množství roztáčovací vody, ostřením, lehčením,

odvzdušňováním, odležením, použitím přísad, ale také důslednou homogenizací, drcením, mletím a míšením.

Přísady upravují chování surovinové směsi při vytváření, sušení a pálení, rozdělují se na ostřiva a lehčiva. Ostřiva snižují plastičnost, nebezpečí smrštění a tvorbu smršťovacích trhlin při sušení (písek, šamot, popílek, struska). Lehčiva snižují objemovou hmotnost vypáleného střepe a tím zlepšují tepelně izolační vlastnosti výrobku (dřevěné piliny, uhelný prach, rašelina).

Způsob tvarování se volí podle tvaru a velikosti výrobku, podle požadované hutnosti a pevnosti, podle požadavků na rozměrovou přesnost. Cihlářské materiály se vyrábí zejména ražením nebo tažením. Tažení znamená protlačování materiálu přes vhodně tvarovaný lis, viz obr. 2.13. Při ražení je těsto tvarováno do formy požadovaného tvaru.



Obr. 2.13 3 Výroba cihel tažením

Výrobky se rozkrájí na potřebný rozměr. Snižuje se tak obsah vody v sušeném materiálu, jinak by v peci došlo k jejich porušení. Doba sušení se pohybuje podle typu výrobku v rozmezí cca 12 – 76 hodin. K sušení se využívá odpadního tepla z výpalu. Výpal výrobků zahrnuje proces ohřevu na požadovanou vypalovací teplotu a postupné ochlazování vypalovaného tělesa na teplotu okolí. Teplota výpalu se pohybuje v rozmezí 860 – 1050 °C po dobu 10 až 30 hodin v závislosti na typu výrobku. V současnosti se v cihlářství používají zejména pece tunelové. Výrobky se po dokončení výrobního procesu naskládají na palety a převáží se na prodejny stavebních materiálů.^[5]

Keramické zdivo (tvárnice) lze spojovat klasicky na maltu, u které vzniknou velké spáry (cca 10 mm). Dále je možné použití tenkovrstvých lepidel, kde se tloušťka spáry pohybuje okolo 1 - 2 mm. V poslední řadě můžeme použít speciální PUR (polyuretanové) pěny, které odstraňují mokré procesy stavby a urychlují celkovou dobu výstavby, což je v dnešní době velká výhoda.^[6]



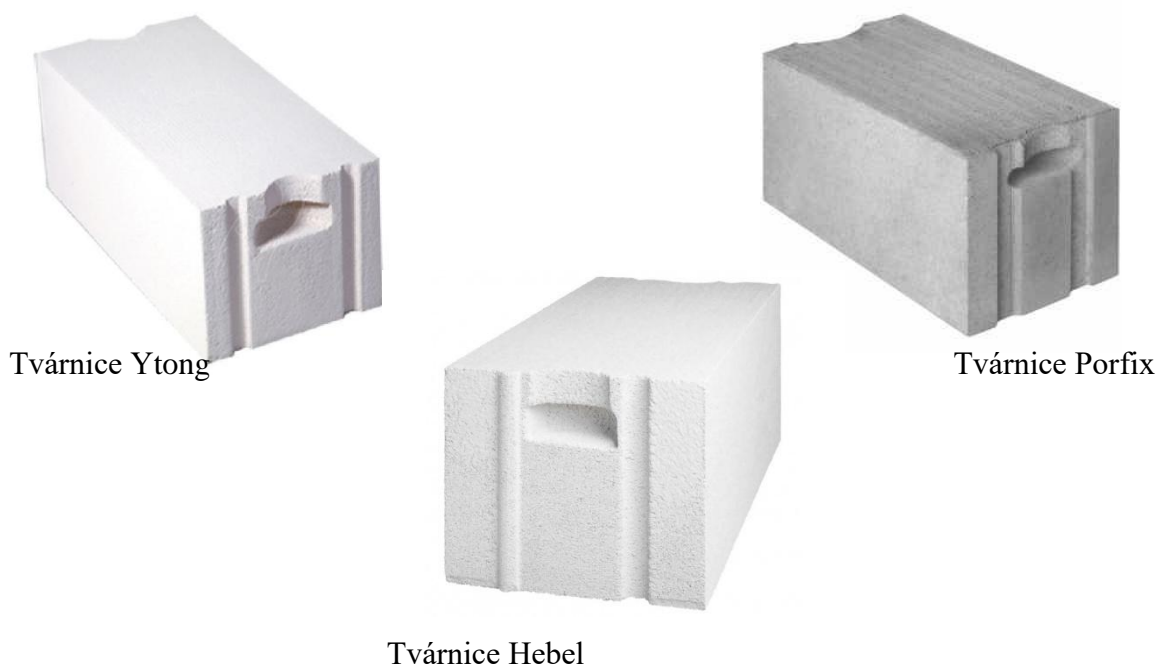
Obr. 2.14 4 Tenkovrstvé lepení keramických cihel

Výhodami pálených keramických bloků jsou velmi dobrá tepelná izolace, vysoká pevnost v tlaku, nenasákavost, vysoká protipožární odolnost, jednoduché, rychlé a přesné zdění. K nevýhodám keramických bloků patří zejména jejich vyšší objemová hmotnost a horší opracovatelnost.^[6]

2.4 Pórobetonové a betonové zdivo

Pórobeton

Na českém trhu můžeme najít mnoho výrobků od různých výrobců pórobetonu. Jsou to Hebel, Porfix, YTONG, aj. Nejpoužívanější z těchto tří je YTONG, a proto se následující text týká těchto tvárnic, viz obr.2.15.



Obr. 2. 5 Pórobetonové tvárnice

Pórobeton nabízí vysoký standard tepelné izolace, mimořádnou stabilitu a odolnost, snadnou manipulaci a zpracování, je nehořlavý a zajišťuje příjemné vnitřní klima. Kromě těchto vysokých funkčních vlastností charakterizuje pórobeton značky Ytong také ekologický přístup.

Surovinami na výrobu tvárnic jsou písek, vápno, cement a voda. Suroviny se nachází na velké části zemské kůry a jsou díky tomu prakticky nevyčerpatelné. Těžba surovin probíhá vhodným způsobem, aby byla šetrná k životnímu prostředí. Výrobní proces začíná tím, že se písek namele na jemno, smíchá se s ostatními surovinami a kypřicí látkou, která naplní pórobetonovou hmotu malými, rovnoměrně rozdělenými bublinkami. Po ztuhnutí se polopevné surové bloky přesně přiříznou a pomocí vodní páry vytvrdí při teplotě 200 °C, jak je vidět na *obr.2.16*. Po vysušení se v pórech nachází pouze tepelně izolující vzduch.^[7]



Obr. 2.16 Směs ve formách

Výroba pórobetonu nezatěžuje spodní vodu a vznikající kondenzát se opět využívá. Recyklované druhotné suroviny z výroby se dostávají zpět do výrobního oběhu. Pórobeton se vyrábí z přírodních surovin, díky tomu při výrobě nevznikají škodlivé látky, které by zatěžovaly životní prostředí.

Pórobeton šetří suroviny díky surovinové bilanci. Z 1 m³ surovin se vyrobí 5 m³ pórobetonu. Pórobeton je vyráběn v uzavřeném cyklu a díky tomu vyžaduje menší spotřebu energie než výroba jiných stavebních materiálů. Při výrobě je snaha o maximálně energeticky úspornou výrobu, například vodní pára potřebná pro vytvrzení se až z 85% použije vícekrát. Další zbývající energie z toho procesu je zpětně využita na vytápění.

Bílý pórobeton je jeden z mála nejčistších a hygienicky nejpříznivějších stavebních materiálů pro použití v bytových nebo občanských stavbách. Neobsahuje žádné škodlivé chemické látky a má nejnižší míru radioaktivity.^[8]

Pro zdravé bydlení je potřeba v objektu zajistit optimální vlhkost vzduchu. Ta by se měla pohybovat v rozpětí od 45 - 55%. Pórobeton jako stavební materiál slouží díky své struktuře, která je tvořená miliony vzduchových pórů, jako ochranná membrána domu. Tyto drobné póry zajišťují, že pórobetonové tvárnice dýchají, a tak v nich nedochází ke kondenzaci

vodních pár. Póry mohou odvádět přebytečnou vlhkost z interiéru nebo ji uvolnit zpět v případě, že je v domě nezdravě přesušený vzduch.

Teplota kolem 20 °C a optimální vlhkost vzduchu jsou považovány za hlavní podmínky zdravého bydlení. Je tak vytvořeno ideální prostředí, které nepodporuje vznik plísní. Díky alkalickému složení tvárnice a výjimečným tepelněizolačním vlastnostem bílý pórobeton potlačuje vznik plísní a pohlcuje pro zdraví nepříznivé kladné ionty. Na stěnách z pórobetonových tvárnice se plísně nešíří. Díky optimální povrchové teplotě zdiva a zásaditému složení tvárnice z bílého pórobetonu, je zamezeno růstu plísní.

Tvárnice z bílého pórobetonu umožňují postavit dům v téměř pasivním standardu. Díky milionům uzavřených pórů je z pórobetonu nejlepší a nejbezpečnější izolant. Tvárnice i bez dodatečného zateplení vykazují výborný tepelný odpor. Díky své pórovité homogenní struktuře mají tvárnice ve všech směrech stejné vlastnosti, a to i když jsou opracovány. Tím je zabráněno vzniku tepelných ztrát. Tepelné mosty napomáhají vzniku plísní a ochlazování povrchu zdi. Jsou nepříznivé jak ze zdravotního hlediska, tak i z důvodu unikání tepla z domu. U nosného zdiva postaveného z pórobetonových tvárnice zůstávají stěny suché a čisté.

Z pórobetonu se vyrábí prvky jak pro svislé konstrukce, tak i pro vodorovné konstrukce, viz *obr.2.17* a *obr.2.18*. Doporučuje se použít jeden systém pro celý objekt a nekombinovat ho s jinými systémy, které vznikají kombinací různých zdících materiálů.^[8]



Obr. 2.17 Stěna z pórobetonových cihel



Obr. 2.186 Pórobetonový strop

Při výstavbě je první řada tvárnic uložena do tepelněizolační malty tl. 10 - 40 mm. Další řady spojujeme pomocí tenkovrstvé malty 1 - 3 mm. Jiné spojovací prostředky, jako třeba lepení pomocí PUR pěny nebo klasické zdění s tlustými spárami, se nedělá.

Betonové zdivo

V dnešní době se i hojně používá pro stavby betonové zdivo (tvárnice). Tyto tvárnice jsou duté a v určitých situacích je lze vylít betonem, čímž se zvýší jejich pevnost v tlaku. Budovy z betonového zdiva je možné stavět velmi rychle a tím zkrátit dobu výstavby, hodí se jak na stavbu podzemních stěn, tak i na stavbu nadzemních stěn. Na horizontální kostrukce se používají stropní betonové panely nebo monolitická betonová deska. Rozměry tvárnic jsou přesné, což je při výstavbě velká výhoda, proto není nutné se při správném zdění bát nějakých nepřesností. V ČR existuje několik výrobců a typů výrobků, jako jsou např. Betong, Best, aj. Velmi zajímavým se na našem trhu stává skořepinové betonové zdivo od firmy Betong. Ta k nám přinesla francouzskou technologii ve stavbě domů. Jejich tvárnice jsou klasicky duté, ale oproti jiným mají plné dno a při stavbě se pokládají dnem dolů, následkem toho zůstane v tvárnici vzduch a to znamená velkou úsporu materiálu, viz obr.2.19. K výrobě tvárnic používají drcený dolomitický vápenec. Tím vzniknul beton, který v sobě nemá jemné kapiláry, které na sebe váží vodu (jde o jediný stavební materiál, v němž voda nevzlíná), viz obr. 2.21. Za zmínku také stojí, že při tomto systému zdění se provádí tepelná izolace zevnitř objektu oproti normálnímu zateplování fasády. Tvárnice lze použít i na ploty, bazény, opěrné zdi.

Tvárnice se k sobě spojují polosuchou betonovou směsí (500 kg jemného písku nebo štěrku a 75 kg cementu, což je váhový poměr 1:6,6).^[9]



Obr. 2.197 Betonová tvárnice

Odolnost proti povětrnosti a chátrání stavby

Mezi hlavní výhody patří odolnost proti povětrnosti a chátrání stavby. Díky novým možnostem lze postavit dům se zárukou barevné stálosti a stejnými vlastnostmi. Tvárnice zůstávají suché, netrhají se mrazem, a to i když jsou vystaveny povětrnostním vlivům, jako jsou ploty nebo protihlukové bariéry. Další výhodou je ochrana proti násilnému vniknutí. Protože se betonové tvárnice vyznačují velkou odolností proti mechanickému narušení, vykazuje i dům postavený z těchto tvárnic vysoký stupeň pevnosti a odolnosti proti násilnému narušení. Při stavbě je možné navíc zdi vyztužovat ocelovou výztuží jak vodorovně, tak svisle, viz *obr.2.20*. Pokud se zabudují předokenní žaluzie, nemůže případný zloděj proniknout přes zeď ani přes okna. Uvedené hledisko většina stavebníků dosud zcela ignoruje tím, že staví domy z různých měkkých pórobetonů, kde stačí ruční náradí k narušení objektu. Tvárnice nejsou zdravotně závadné ani radioaktivní, vzhledem k tomu, že se při výrobě nepoužívá žádný popílek, ani škvára (na rozdíl od některých jiných stavebních materiálů). Betonové tvárnice jsou považovány za neekologičtější stavební materiál vůbec. Při jejich výrobě není potřeba tepelné energie, spotřebovává se velmi malé množství betonu s nejmenším možným množstvím cementu. Cement je jediným prvkem zatěžujícím životní prostředí vzhledem k množství tepla nutného při jeho výrobě.

Tvárnice 200 mm široká má pevnost v tlaku 3,4 MPa. Jeden běžný metr unese 68 tun. Při tloušťce 200 mm s omítkou je možné se dostat na hodnoty $R_w = 53$ dB.

Samotné tvárnice mají velmi špatnou tepelnou izolaci, proto se tyto stavby izolují velkou vrstvou tepelné izolace. Tepelnou izolaci je možné umístit z exteriéru, nebo z interiéru, kde se posléze zakryje pomocí SDK desek. Tím vnikne rovná vnitřní plocha.^[9]



Obr. 2.208 Zdění z betonových tvárnic



Obr. 2.219 Stěna bez vzlínání vody^[1]

3 Netradiční zdivo ze skleněných plných cihel

3.1 Úvod

Zděné stavby najdou využití i v současné architektuře za použití nových technologií a materiálů. Netradičním stavebním materiálem je sklo, které nachází stále větší uplatnění při návrhu nosných konstrukcí, jako jsou např. nosníky, sloupy či zděné konstrukce využívající plných skleněných cihel, viz *obr. 3.1*. Tyto stavby jsou ojedinělé jak svým vzhledem tak i technologií provádění. Velkou výhodou skla je vysoká pevnost v tlaku, která je srovnatelná, ne-li větší než u betonu. Oproti ostatním stavebním materiálům má sklo transparentní vzhled, což nám dává nové možnosti, co se týká staveb a jejich vzhledu.

Ve světě lze nalézt řadu staveb, u kterých byly použité skleněné cihly, jako je např. Atocha memorial, Crystal house, Crown fountain a Optický skleněný dům.



Obr. 3.1 Skleněná plná cihla

3.2 Atocha memorial

Stavba je památkou na tragickou událost z března 2004. Výstavba trvala celé 3 roky, měří na výšku 11 metrů a v průměru měří 8 - 10,5 metrů, viz obr. 3.2. Skleněná hmota má 140 tun. Pomník se skládá ze skleněného válce a podzemní místnosti, viz obr. 3.4. „Návrh má vytvářet dojem, že pomník se z hloubky železniční stanice - “místa smutku“ - upíná ke “svitu naděje“ směrem vzhůru“^[10]. Na vnitřní straně válce jsou ETFE folie, na kterých jsou natištěny tisíce vzkazů od truchlících lidí, viz obr. 3.3. Tyto vzkazy si mohou návštěvníci památníku přečíst ze spodního sálu. Díky skleněné konstrukci se každý den při východu a západu slunce pomník rozzáří pronikajícími slunečními paprsky.^[10]



Obr. 3.2. Památník Atocha memorial¹

Pomník je postaven z 15 100 kusů zakřivených skleněných cihel, které jsou k sobě spojeny pomocí tekuté akrylátové směsi, která byla vytvrzena pomocí UV záření. Během dne, jak sluneční světlo prochází skrz věž, osvětluje podzemní temně modré plachy v sálu pod věží. Po setmění je věž osvětlena jemným světlem ze základny.

Zastřešení konstrukce je tvořeno 5-ti skleněnými nosíky o délce 8,5 metru, na kterých je uloženo 12 krycích skleněných desek s tloušťkou 10 a 12 milimetrů s velkou světelnou propustností. Cihly samotné mají rozměry 200x300x70 mm a každá z nich váží 8,4 kg. Pro výrobu bylo použito borité sklo z důvodu malé výsledné nerovnoměrnosti a vysoké teplotní stability.^[10]



Obr. 3.3 Fólie uvnitř památníku



Obr. 3.4 Podzemní místnost pod památníkem

3.3 Crystal house

V Amsterdamu je vytvořena ze skleněných cihel fasáda, která je podobná architektuře 19. století, viz *obr. 3.5*. Zeď je z masivních cihel a ze skla jsou i rámy oken a dveří. Výška skleněné fasády je 8,8 metrů a je zkonstruována z 6500 kusů cihel, které mají rozměr klasické cihly. Tloušťka spar je 0,2 - 0,3 mm a použitým pojivem bylo speciální transparentní lepidlo. Cihly byly odlévány ručně, viz *obr. 3.6*. Výstavba fasády trvala 1 rok a na výstavbě se podílelo 10 odborníků. Kvůli vysoké citlivosti materiálu byla vyžadována vysoká úroveň přesnosti a řemeslné zručnosti. Tato stavba je první svého druhu na světě a kvůli tomu musely být použity speciální nástroje a výrobní postupy, viz *obr. 3.7*. Před realizací byl proveden experimentální výzkum na TU v Delftu. Díky této stavbě byly využity nové technologie, ačkoliv pro svou náročnost při výstavbě a ekonomické nároky nelze předpokládat větší rozšíření tohoto typu zdiva. Výhodou těchto konstrukcí ale zůstává recyklovatelnost skla. A to se týká i této fasády, jakmile budova dosáhne konce své životnosti, tak se fasáda může roztavit a použít znovu na nové stavby. Jelikož se jedná o stavbu ze skla, musí být stěna odolná proti nárazu auta. Toho je docíleno železobetonovým obloukem, který případnému nárazu odolá. Se skleněnou fasádou by se nedalo uvnitř objektu v různých obdobích vydržet, proto se muselo dobře vyřešit vnitřní klima. Proto byla budova postavena okolo tepelného čerpadla zemního zdroje, jehož potrubí vede 170 metrů pod zemí.

[11]



Obr. 3.5 Pohled na Crystal house



Obr. 3.6 Ruční odlévání skleněných cihel



Obr. 3.7 Výrobní postup

3.4 Korunní Fontána (Crown Fountain)

Crown Fountain, která je umístěna v Millennium Park v Chicagu, navrhl španělský umělec Jaume Plensa. Fontána má půdorysné rozměry 70,7x14,6 m. Na obou koncích objektu jsou umístěny dvě skleněné věže, ze kterých tryská voda, viz *obr. 3.10*. Věže jsou vysoké 15,2 m a využívají řadu designových prvků, mezi které patří barevná světla či projekce obrazů na stěny, viz *obr. 3.8*.^[12]



Obr. 3.8 Jedna z věží fontány

Fontána je postavena z 22 000 kusů skleněných cihel. Jedná se o bílé sklo na rozdíl od klasického zeleného skla, u kterého je zelená barva důsledkem nečistot - železa obsažených ve sklářském kmeni. Cihly byly odlévány ručně do litinových forem. Díky tomu bylo možné denně vyrobit pouze 350 kusů a výroba trvala 4 měsíce.

Velkou výzvou bylo vyřešit lom světla, aby obrazy za sklem byly pořád jasné. Toho se docílilo díky tomu, že jsou cihly štíhlé 5 cm. Cihly jsou sestaveny do ocelových mříží, které jsou vysoké 1,5 metru a široké 4,9 nebo 7 metrů. Každá věž se skládá ze 44 mříží, přičemž každá mříž průměrně obsahuje 250 kusů cihel, viz *obr. 3.9*.^[13]



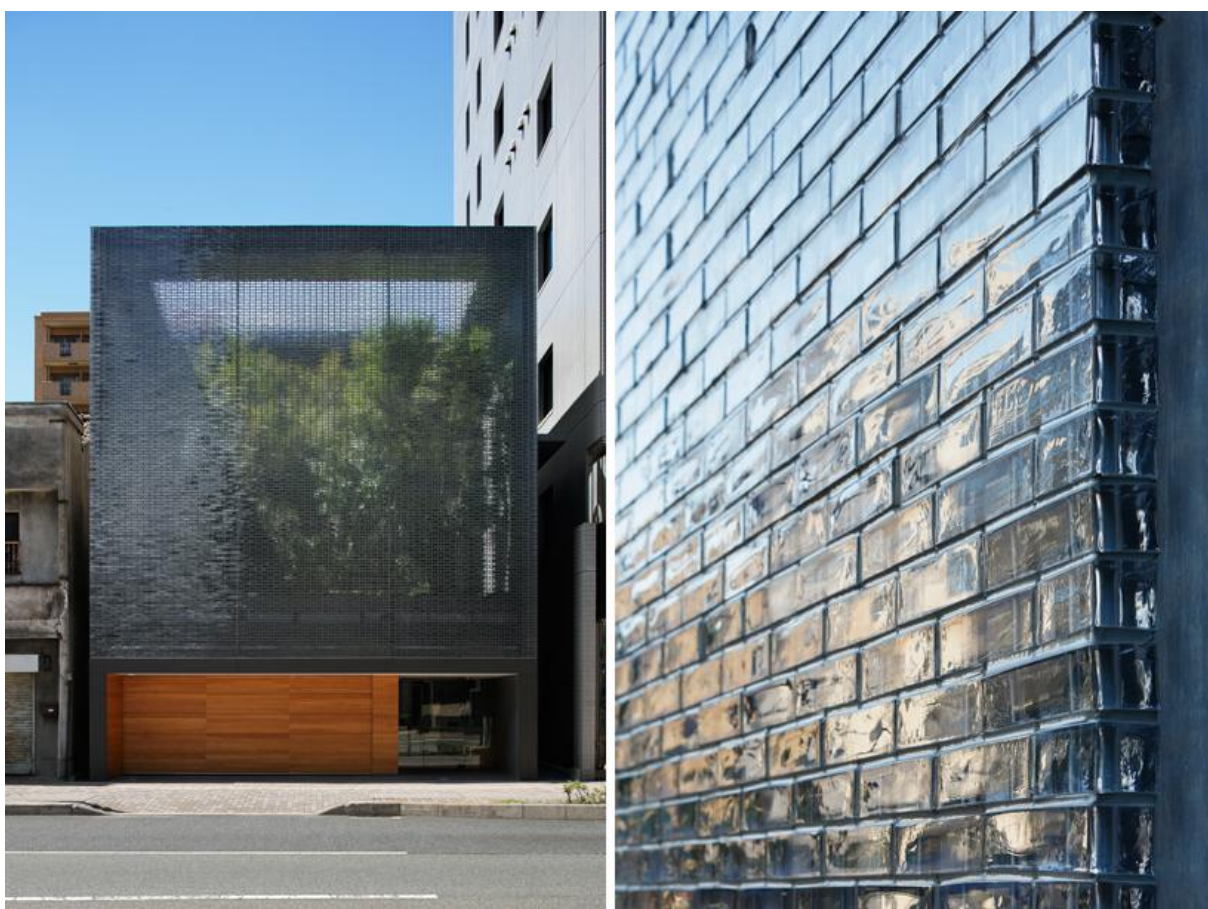
Obr. 3.910 Umístování panelu



Obr. 3.1011 Výstavba fontány

3.5 Optický skleněný dům

Skleněný dům se nachází v Hirošimě v těsné blízkosti velmi rušné silnice, kde jsou neustále slyšet nepříjemné zvuky z dopravy a to jak od aut tak i od tramvají, viz *obr. 3.11*. Japonští návrháři Hiroshi Nakamura & NAP vytvořili akusticky chráněnou klidnou oázu za skleněnou oponou. Díky použití skla se neztratil pohled na město. Skleněná fasáda se nachází nad dřevěnou garáží, vedle které je vstup do domu. Za skleněnou fasádou nalezneme i kousek přírody, protože terasa v prvním patře je osázena stromy, které odstraňují přirozený sluneční svit a tím nám vytvářejí krásné relaxační prostředí, ve kterém lze zapomenout na ruch velkoměsta, viz *obr. 3.12*.^[14]



Obr. 3.1112 Pohled na skleněnou fasádu



Obr. 3.12 Zelené prostředí za fasádou

Realizace fasády nebyla jednoduchá. Na střeše domu je předpjatý ocelový nosník, na kterém jsou připevněny závitové tyče, viz *obr. 3.13*. Na tyče bylo postupně navlečeno 6000 kusů skleněných cihel, které mají rozměry 200x50x50, viz *obr. 3.15*. Mezi jednotlivé řady jsou vloženy kovové pásky, aby nedošlo k poškození cihel při utahování maticek na závitěch tyčí. Celkově má tato fasáda 13 tun a její vzhled připomíná vodopád díky odražení obrazu a světla.^[14]



Obr. 3.1313 Montáž zdi

Výroba probíhala ručním odléváním každé cihly do předem připravené formy, viz *obr. 3.14*. Ve formě ovšem nebyly připravené otvory pro závitové tyče. Otvory se dodělávaly až poté, co skleněná cihla vychladla. Řízené pomalé chladnutí eliminovalo vnitřní pnutí ve skle. ^[14]



Obr. 3.14 Výroba cihel



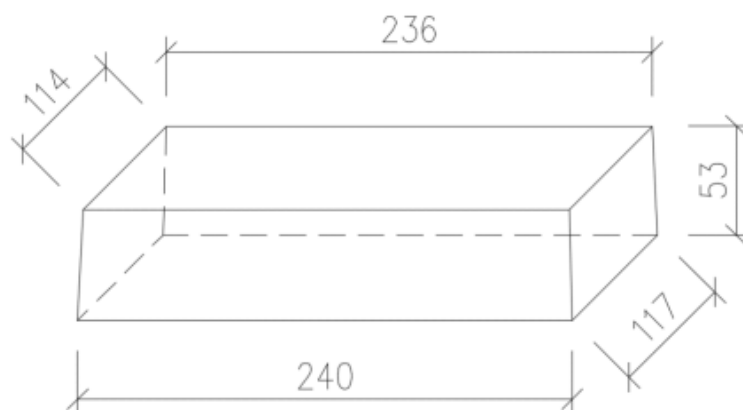
Obr. 3.15 Skleněná cihla

4 Experimentální ověření zdiva ze skleněných cihel

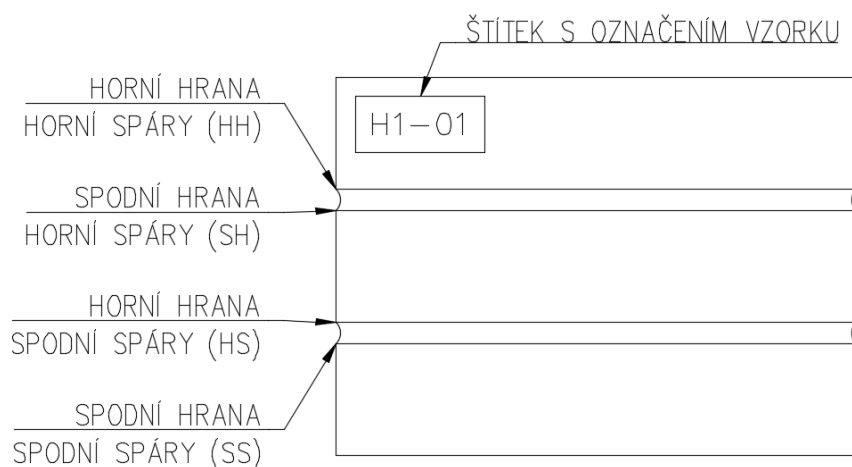
V rámci experimentálního výzkumu zdiva z plných skleněných cihel prováděného na Stavební fakultě ČVUT byly provedeny zkoušky spáry ve smyku, zkoušky pevnosti malt v tahu za ohybu a v tlaku a zkoušky adheze, které sloužily zejména k výběru vhodné malty. Celkem byly provedeny zkoušky pro 8 různých druhů malt a lepidel v delší časovém horizontu. V práci je uveden souhrn všech výsledků, přičemž pouze malty s označením H7 a H8 byly zkoušeny v průběhu zpracování bakalářské práce stejně jako zkoušky piliře.

4.1 Smyková zkouška

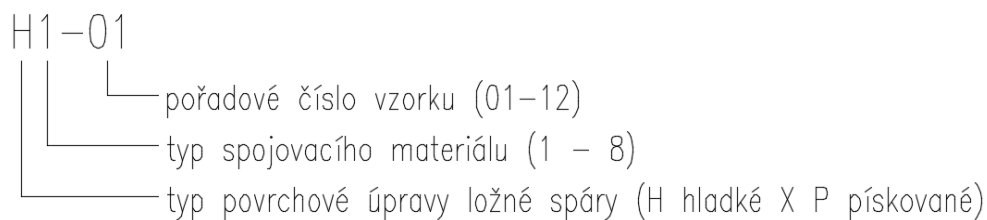
Zkušební tělesa pro zkoušku ve smyku byla vyrobena v souladu s normou ČSN EN 1052-3 ze tří cihel spojených navzájem spojovacím materiálem. Geometrie těles byly pro jednotlivé etapy v zásadě shodné, lišily se pouze v tloušťkách spár. Rozměry skleněných plných cihel jsou patrné z *obr. 4.1*. Každé těleso bylo sestaveno ze tří skleněných cihel vzájemně spojených maltou nebo jiným spojovacím materiálem. Shrnutí všech zkoušených vzorků včetně tloušťky ložných spár je uvedeno v tab. 4.1. ^[15]



Obr. 4.1 Rozměry skleněných cihel



Obr. 4.2 Způsob značení vzorků a jednotlivých hran



Obr. 4.3 Vysvětlení značení vzorků

Tab. 4.1 Souhrn zkušebních těles s tloušťkou ložných spár

Označení vzorku	Úprava povrchu	Druh malty	Tloušťka spár									
			Spodní spára					Horní spára				
			1	2	3	4	Ø	1	2	3	4	Ø
H1-01	Hladké	Druh 1	10	8	9	12	10	10	11	12	11	11
H1-02			11	11	11	11	11	11	12	11	10	11
H1-03			11	10	11	11	11	10	8	9	10	9
H1-04		Druh 2	10	9	10	9	10	8	8	9	9	9
H2-01			10	11	10	11	11	11	11	12	12	12
H2-02			11	12	11	11	11	12	11	11	11	11
H2-03		10	10	12	12	11	11	11	11	12	11	
P1-01	Pískované	Druh 1	12	13	14	12	13	13	13	13	14	13
P1-02			10	10	12	12	11	13	13	13	13	13
P1-03			11	12	12	11	12	12	15	13	11	13
P2-01		Druh 2	12	13	12	12	12	14	14	14	13	14
P2-02			12	13	12	13	13	12	14	12	14	13
P2-03			13	13	13	12	13	13	13	13	12	13
P2-04		12	12	12	12	12	11	13	13	13	13	
H3-01	Hladké	Druh 3	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
H3-02			1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
H3-03			1	1	1	1	1	2	2	1	2	2
H4-01		Druh 4	13	13	11	12	12	10	12	12	14	12
H4-02			12	14	12	12	13	13	13	12	15	13
H4-03			13	13	13	13	13	12	12	11	15	13
H5-01		Druh 5	12	12	11	11	12	13	14	15	10	13
H5-02			9	12	11	13	11	12	14	13	10	12
H5-03			15	16	14	15	15	14	14	16	16	15
H5-04			4	3	4	4	4	2	2	2	2	2
H6-01		Druh 6	9	12	11	11	11	9	9	11	11	10
H6-02			9	11	10	11	10	10	12	13	9	11
H6-03	13		12	12	13	13	13	11	10	14	12	
P4-01	Pískované	Druh 4	13	12	14	12	13	11	12	12	14	13
P4-02			11	12	13	12	12	12	14	13	10	12
P4-03			12	11	12	11	12	12	11	13	12	12

H5-05	Hladké	Druh 5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
H5-06			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
H5-07			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
H5-08			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
H5-09			5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
H5-10			5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
H5-11			5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
H5-12			5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
H7-01	Hladké	Druh 7	3	2	2	2	2	4	3	3	3	3
H7-02			2	3	2	3	3	3	3	3	3	3
H7-03			5	5	6	5	5	8	7	7	8	8
H7-04			6	7	7	6	7	6	7	9	8	8
H8-01		Druh 8	6	7	5	6	6	8	7	7	8	8
H8-02			5	5	5	4	5	6	7	5	4	6
H8-03			2	2	2	2	2	2	3	3	2	3
H8-04			2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
H7-05	Hladké	Druh 7	9	10	10	11	10	8	8	10	10	9
H7-06			11	11	9	10	10	8	11	8	11	10
H7-07			11	10	10	11	11	11	10	10	11	11
H7-08			11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
H7-09			13	11	12	12	12	11	10	11	10	11
H7-10			10	11	12	11	11	10	10	10	10	10
H7-11			10	10	10	10	10	9	7	10	10	9
H7-12			11	11	11	9	11	10	9	11	10	10
H7-13			11	11	11	9	11	9	9	10	11	10
H7-14			10	10	10	10	10	5	5	5	6	5
H7-15			9	9	7	6	8	8	8	7	7	8
H7-16			10	10	10	10	10	7	7	9	8	8
H7-17	Hladké	Druh 7	15	13	14	15	14	12	13	15	16	14
H7-18			15	15	14	15	15	15	14	16	15	15
H7-19			14	16	15	13	15	14	14	15	14	14
H7-20			13	14	13	15	14	15	16	14	15	15
H7-21			12	15	12	14	13	15	14	16	15	15
H7-22			16	16	15	16	16	13	13	14	15	14
H7-23	Hladké	Druh 7	11	12	13	12	12	14	12	13	14	13
H7-24			17	14	15	16	16	16	14	16	16	16
H7-25			16	13	12	16	14	15	13	16	16	15
H7-26			13	13	15	14	14	13	12	14	13	13
H7-27			13	14	12	14	13	14	14	13	12	13
H7-28			13	14	13	12	13	12	13	14	14	13

Na zkoušky smykové pevnosti byly použity různé typy spojovacích materiálů, viz *tab. 4.2*. Spojovací malta č. 1 je vyrobena z trasového cementu a je určena pro sanaci zdiva a pokládku přírodního kamene. Malta č. 2 je speciální zdící a spárovací malta pro skleněné tvárnice. Dalším spojovacím materiálem č. 3 byla pryskyřice. Malta č. 4 je zdící malta používaná na skleněné zdivo z plných cihel. Pod č. 5 je uvedeno bílé flexibilní lepidlo na dlažbu a jako malta č. 6 je pak označeno šedé flexibilní lepidlo na dlažbu. Pod č. 7 se rozumí směs cementové vyrovnávací malty pro vnitřní a vnější svislé plochy, syntetického latexu a vody. Jako č. 8 je označena směs deformovatelného rychle tvrdnoucího cementového lepidla a syntetického latexu jako náhrady za vodu. ^[15]

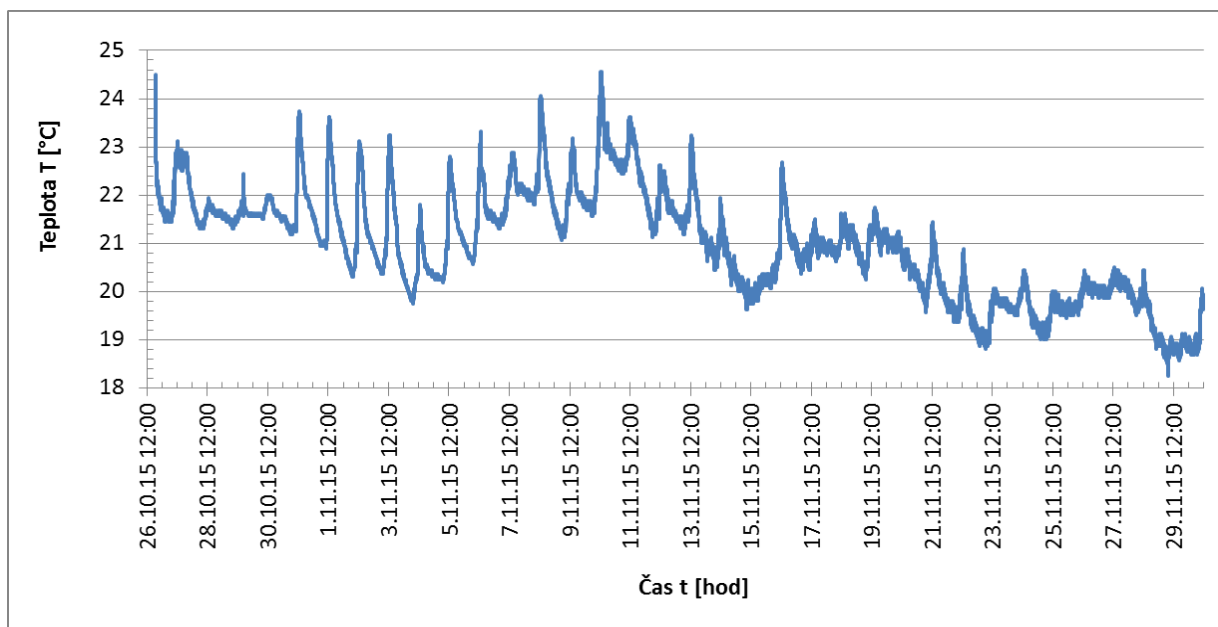
Tab. 4.2 Seznam použitých spojovacích materiálů

Druh mat.	Popis
Druh 1	Malta z trasového cementu určená pro sanaci a pokládání přírodního kamene
Druh 2	Finální malta speciálně vyvinutá na zdění a spárování skleněných tvárníc
Druh 3	Pryskyřice s plnivem
Druh 3*	Pryskyřice bez plniva
Druh 4	Malta speciálně vyvinutá pro zdivo ze skleněných cihel
Druh 5	Suché flexibilní mrazuvzdorné cementové lepidlo bílé barvy pro lepení skleněných obkladů, dlažby, ozdobných prvků, sklokeramiky, skleněných tvárníc, desek z přírodního a umělého kamene, mramoru
Druh 6	Suché flexibilní mrazuvzdorné cementové lepidlo vhodné pro vnitřní i vnější použití
Druh 7	Cementová vyrovnávací malta pro vnitřní i venkovní svislé plochy + syntetický latex pro zlepšení přídržnosti cementových směsí
Druh 8	Deformovatelné rychle tvrdnoucí cementové lepidlo se sníženým skluzem, na obklady a dlažby z keramiky a přírodního kamene + disperze extrémně pružného polymeru s nízkou viskozitou
Druh 9	Finální malta speciálně vyvinutá na zdění a spárování skleněných tvárníc + syntetický latex pro zlepšení přídržnosti cementových směsí
Druh 10	Dvousložkové polyuretanové houževnaté lepidlo určené pro lepení termoplastů s možností vytvrzování za pokojové teploty

Pro smykové zkoušky byla vyrobena tělesa, která se skládala ze tří plných skleněných cihel. Jednotlivá tělesa byla slepena (vyzděna) z malty namíchané bezprostředně před lepením. Tloušťka nanášené vrstvy malty byla zajištěna pomocí plastových distančních křížků tl. 1 mm, 5 mm a 10 mm, viz *obr. 4.5*. Cihly byly na distanční křížky dotlačeny silou tak, aby na ně plně dosedly a byla tak zajištěna požadovaná tloušťka spáry. Přebytké lepidlo bylo při

tomto postupu vytlačeno ven a spára byla zarovnána špachtlí. Kvůli správnému postupu bylo nutné zkušet slepené cihly po vytvrnutí malty, což je doba 28 dní od slepení.

Během tvrdnutí byla zkušební tělesa kvůli vysychání obalena polyetylenovou folií. Teplota vzduchu v místnosti byla po celou dobu tvrdnutí měřena a zaznamenávána s intervalem 1 min. Z grafu teploty je zřejmé, že se teplota pohybovala v rozmezí 18,25 až 24,56 °C a aritmetický průměr teploty byl 20,98 °C, viz obr. 4.4. ^[15]



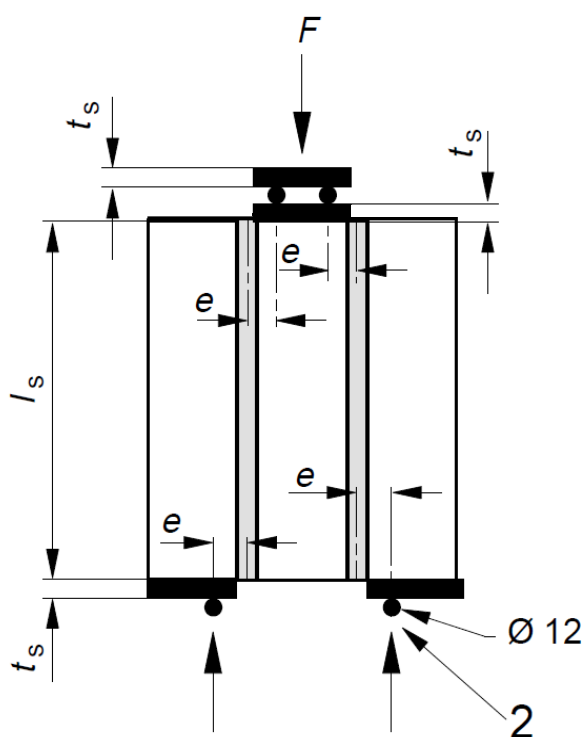
Obr. 4.4 Graf teploty vzduchu v místnosti během tvrdnutí malty



Obr. 4.5 Distanční křížky (vlevo pro 1 mm, uprostřed pro 5 mm a v pravo pro 10 mm spáru)

Uspořádání experimentů

Zkušební tělesa, vyrobená ze tří plných skleněných cihel, byla zkušena ve zkušebním zařízení MTS Elite Q100. Jednalo se o protlačovací zkoušku, kdy dvě krajní cihly byly uloženy na ocelových deskách a střední cihla byla namáhána tlakem tak, aby spáry mezi cihlami byly namáhány smykem, viz obr. 4.6. Tlaková zatěžovací síla působila na zkušební těleso prostřednictvím kloubu umístěného ve středu horní ocelové tlačné desky. Krajní cihly byly uloženy přes ocelové desky na válcové podpory o průměru 20 mm. Mezi ocelovou deskou a skleněnou cihlou byly vloženy pryžové podložky tloušťky 5 mm, aby bylo bráněno přímému kontaktu mezi sklem a ocelí, který by mohl vést k lokálnímu namáhání skleněné cihly a tím k jejímu porušení, viz obr. 4.7. Ve vybraných případech byla navíc tělesa osazena potenciometry k měření deformace obou namáhaných spár mezi cihlami. ^[15]



Obr. 4.6 Uložení vzorku ve zkušebním stroji



Obr. 4.7 Uložení vzorku přes gumové podložky

Vyhodnocení experimentu

Výsledné hodnoty naměřené maximální síly F_{max} a smykového napětí τ v ložné spáře jsou shrnuty v tab. 4.3. Smykové napětí bylo vypočteno z maximální síly dosažené při porušení zkušebního tělesa a plochy rovné ploše obdélníka o rozměrech 114 x 236 mm. Výjimku tvoří tělesa lepená pryskyřicí, kde kontaktní plocha pro výpočet smykového napětí τ byla odměřena pomocí programu AutoCAD podle fotografií ložné spáry. ^[15]

Během přípravy experimentů došlo při běžné manipulaci s tělesy k samovolnému rozlepení některých z nich v ložné spáře. Porušila se vždy zkušební tělesa s hladkým

neupravovaným povrchem, viz obr. 4.. Jednalo se ve všech případech o nedostatečnou přilnavost spojovací malty k povrchu skla, tedy o adhezní porušení. Povrch skla před výrobou vzorků nebyl žádným způsobem čištěn. ^[15]



Obr. 4.8 Tělesa rozpadlá před zkouškou

Výjimku tvořila pryskyřice (materiál č. 3), u které naměřené hodnoty maximální síly převyšovaly řádově maximální síly, kterých bylo dosaženo v případě ostatních spojovacích malt.

Zkušební tělesa se spojovacím materiálem č. 1, č. 2 a č. 4 byla vyrobena jak z cihel s hladkým povrchem, tak z cihel s povrchem zdrsňeným pískováním. Zdrsňení povrchu mělo výrazný vliv na dosaženou maximální sílu při porušení. Pro zkušební tělesa vyrobená za použití spojovacího materiálu č. 5, č. 6, č. 7 a č. 8 byly použity skleněné cihly pouze s hladkým povrchem.

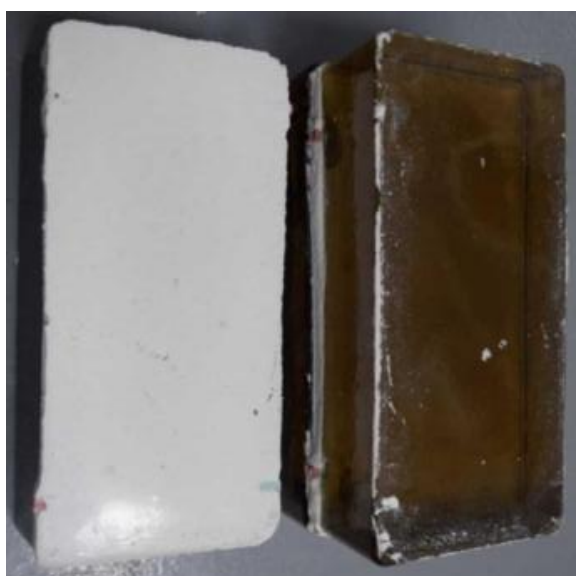
Všechna zkoušená tělesa vykazovala adhezní porušení (ztráta přilnavosti spojovacího materiálu k povrchu). Ani u jednoho tělesa nebylo zjištěno kohezní nebo kombinované adhezně – kohezní porušení či porušení samotných skleněných cihel. Rovněž v případě pryskyřice (spojovací materiál č. 3) došlo k adheznímu porušení kromě tělesa H3-03*, u kterého došlo navíc k přetržení pryskyřice, viz obr. 4.9. K porušení došlo vždy náhle bez předchozího varování.

U vybraných zkušebních těles byla měřena deformace v ložné spáře pomocí potenciometrů. Ve všech případech byla naměřená deformace nulová. Z tohoto důvodu nebyla deformace měřena u všech těles. ^[15]



Obr. 4.9 Kombinované porušení tělesa s epoxidovou pryskyřicí

Většina zkoušených těles vykazovala adhezní porušení (ztráta přilnavosti spojovacího materiálu k povrchu). Zkušební tělesa s typickým adhezním porušením jsou na obr. 4.. K částečnému porušení malty docházelo v převážné většině v místě oslabení distančními křížky. K čistě koheznímu porušení či porušení samotných skleněných cihel nedošlo ani při jedné zkoušce. K porušení došlo vždy náhle bez předchozího varování. ^[15]



Obr. 4.10 Zkušební tělesa s adhezním porušením

Tab. 4.3 Souhrn výsledků pro všechna zkušební tělesa

Označení vzorku	Maximální síla F_{\max}^a [kN]	Místo porušení	Plocha průřezu A [m ²]	Smykové napětí τ [MPa]
H1-01	0	-	-	0
H1-02	0	-	-	0
H1-03	0	-	-	0
H1-04	0	-	-	0
H2-01	0	-	-	0
H2-02	0	-	-	0
H2-03	0	-	-	0
P1-01	11,33	HS	0,0269	0,211
P1-02	31,49	HH	0,0269	0,559
P1-03	27,43	HS	0,0269	0,510
P2-01	13,24	HS	0,0269	0,296
P2-02	13,71	HS	0,0269	0,255
P2-03	15,39	HS	0,0269	0,286
P2-04	11,17	HS	0,0269	0,208
H3-01	27,18	HH	0,0122	1,114
H3-02	61,36	HH	0,0171	1,794
H3*-03	75,52	HS	0,0116	3,255
H4-01	1,02	HH	0,0269	0,019
H4-02	1,68	HS	0,0269	0,031
H4-03	1,78	HS	0,0269	0,033
H5-01	0,93	SH	0,0269	0,018
H5-02	0,59	HH	0,0269	0,011
H5-03	0	-	-	0
H5-04	23,23	SS	0,0269	0,432
H6-01	0,64	HH	0,0269	0,012
H6-02	0	-	-	0
H6-03	0	-	-	0
P4-01	13,02	HS	0,0269	0,242
P4-02	13,95	HS	0,0269	0,260
P4-03	12,55	HS	0,0269	0,234
H5-05	35,1	SH	0,0269	0,603
H5-06	43,8	SH	0,0269	0,814
H5-07	50,7	SH	0,0269	0,943
H5-08	40,3	HS	0,0269	0,750
H5-09	9,4	HS	0,0269	0,088
H5-10	6,7	HS	0,0269	0,125
H5-11	6,1	HS	0,0269	0,114
H5-12	9,4	SH	0,0269	0,175
H7-01	52,5	HS	0,0269	0,976
H7-02	60,0	HS	0,0269	1,115
H7-03	30,4	SH	0,0269	0,565
H7-04	33,6	SH	0,0269	0,623

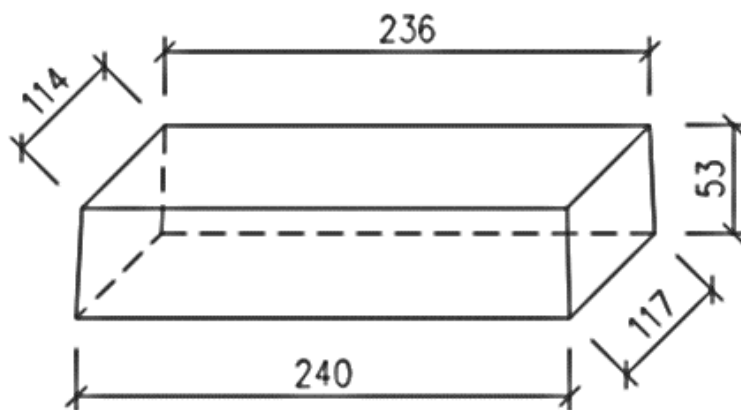
H8-01	88,0	SS	0,0269	1,636
H8-02	95,2	SS	0,0269	1,769
H8-03	133,0	HH	0,0269	2,472
H8-04	137,5	HH	0,0269	2,556
H7-05	0	-	0,0269	0
H7-06	5,22	HS	0,0269	0,970
H7-07	0	-	0,0269	0
H7-08	1,45	HS	0,0269	0,0269
H7-09	0,27	HH	0,0269	0,0054
H7-10	0,73	HH	0,0269	0,0135
H7-11	5,61	HS	0,0269	0,1043
H7-12	0	-	0,0269	0
H7-13	0,47	HS	0,0269	0,087
H7-14	0	-	0,0269	0
H7-15	8,99	HS	0,0269	0,1671
H7-16	17,56	HS	0,0269	0,3264
H7-17	0	-	-	0
H7-18	0	-	-	0
H7-19	0	-	-	0
H7-20	0	-	-	0
H7-21	0	-	-	0
H7-22	0	-	-	0
H7-23	0,34	HH	0,0269	0,0063
H7-24	0	-	-	0
H7-25	0	-	-	0
H7-26	1,77	HH	0,0269	0,0329
H7-27	17,33	SH	0,0269	0,3221
H7-28	0,66	HH	0,0269	0,0123

Tab. 4.4 Souhrn výsledků s průměrnými hodnotami smykového napětí

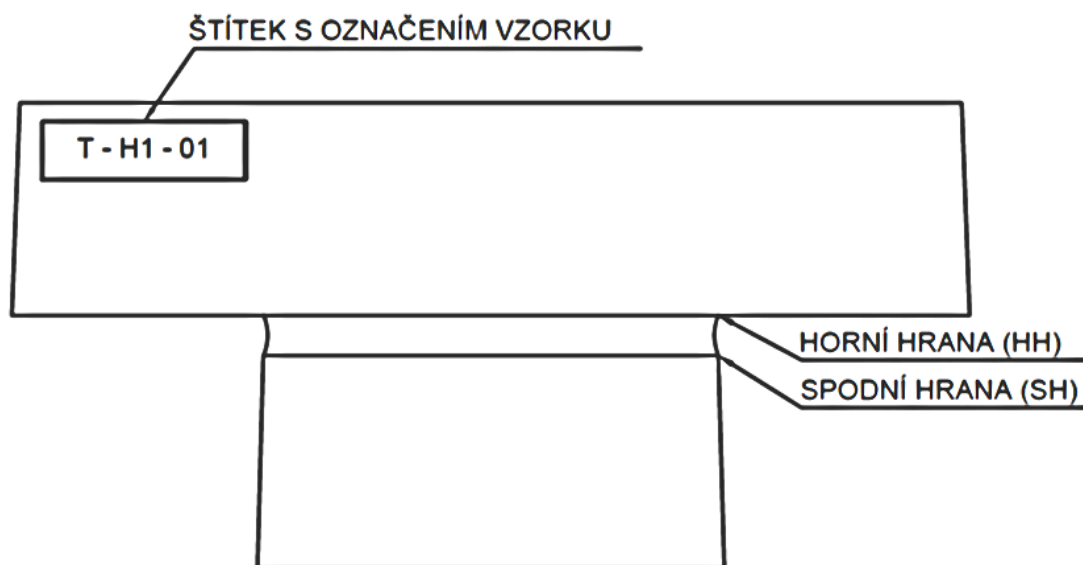
Číslo mat.	Úprava povrchu	Tloušťka spár ^a [mm]	Počet těles [ks]	Síla při porušení F_{max} ^a [kN]	Napětí τ [MPa]
1	Bez úpravy	11	4	0 ^b	0 ^b
	Pískované	12	3	23,42	0,426
2	Bez úpravy	11	3	0 ^b	0 ^b
	Pískované	13	4	13,38	0,249
3	Bez úpravy	1	2	44,27	1,454
3*	Bez úpravy	1	1	75,52	3,255
4	Bez úpravy	13	3	1,49	0,028
	Pískované	12	3	13,17	0,244
5	Bez úpravy	1	4	42,48	0,790
		5	4	7,9	0,147
		12	3	0,76	0,014
6	Bez úpravy	12	3	0,64	0,012
7	Bez úpravy	3	2	56,25	1,046
		7	2	32	0,560
8	Bez úpravy	2	2	135,25	2,514
		6	2	91,6	1,703

4.2 Zkouška adheze malty ke sklu

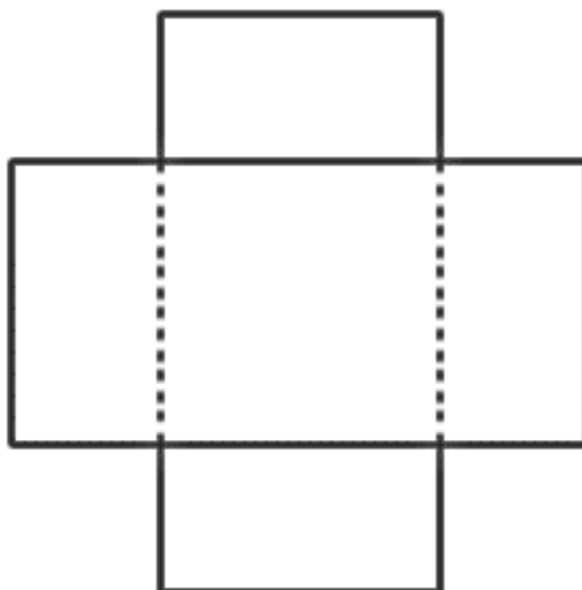
Zkušební tělesa byla vyrobena v souladu s normou ze dvou cihel spojených navzájem spojovacím materiálem. Geometrie těles byly shodné, lišily se pouze v tloušťkách spár. Tělesa byla vyrobena ze skleněných cihel, které jsou tvaru komolého jehlanu s obdélníkovými základnami. Rozměry jsou patrné z obr. 4.11. Každé těleso bylo sestaveno ze dvou skleněných cihel vzájemně spojených maltou nebo jiným spojovacím materiálem, obr. 4.2 a obr. 4.3. Pro zkoušky adheze byl vybrán spojovací materiál č.5 a č.7, který dosahoval dobrých výsledků při smykových zkouškách, viz kap. 4.1. Shrnutí všech zkoušených vzorků včetně tloušťkyložných spár je provedeno v tab. 4.5.^[15]



Obr. 4.11 Rozměr skleněné cihly



Obr. 4.12 Bokorys tahového tělesa



Obr. 4.13 Půdorys tahového tělesa

Tab. 4.5 Souhrn zkušebních těles s tloušťkou ložných spár

Označení vzorku	Úprava povrchu	Druh malty	Tloušťka spár				
			Spodní spára				
			1	2	3	4	Ø
T-H5-01	Hladké	5	1	1	1	1	1
T-H5-02	Hladké	5	1	1	1	1	1
T-H5-03	Hladké	5	1	1	1	1	1
T-H5-04	Hladké	5	1	1	1	1	1
T-H5-05	Hladké	5	5	5	5	5	5
T-H5-06	Hladké	5	5	5	5	5	5
T-H5-07	Hladké	5	5	5	5	5	5
T-H5-08	Hladké	5	5	5	5	5	5
T-H7-01	Hladké	7	10	10	10	10	10
T-H7-02	Hladké	7	10	10	10	10	10
T-H7-03	Hladké	7	10	10	10	10	10
T-H7-04	Hladké	7	10	10	10	10	10
T-H7-05	Hladké	7	10	10	10	10	10
T-H7-06	Hladké	7	10	10	10	10	10



Obr. 4.14 Zkoušené těleso v zařízení MTS Elite Q100

Zkušební tělesa, vyrobená ze dvou plných skleněných cihel, byla zkoušena ve zkušebním zařízení MTS Elite Q100. Jednalo se o tlakovou zkoušku, kdy horní cihla byla podepřena ocelovými trámy a na spodní cihlu byl přes pomocnou konstrukci vyvíjen přístrojem tlak, viz obr. 4.14. Cílem měření bylo zjistit, jak velká síla je potřebná pro odtržení

jednoho tělesa od druhého. Pomocí naměřených sil bylo možné zjistit, jak velké napětí ve spáře působilo, viz tab. 4.6. Při ukládání vzorku na místo do stroje se několik vzorků opět rozlepilo z důvodu nedostatečné adheze. ^[15]

Tab 4.6 Souhrn zkušebních těles s tloušťkou ložných spár

Označení vzorku	Maximální síla F_{\max}^a [kN]	Místo porušení	Plocha průřezu A [m ²]	Napětí τ [MPa]
T-H5-01	3,77	H	0,013689	0,276
T-H5-02	4,56	H	0,013689	0,335
T-H5-03	3,07	H	0,013689	0,224
T-H5-04	2,72	S	0,013689	0,198
T-H5-05	0,75	H	0,013689	0,055
T-H5-06	0,81	H	0,013689	0,059
T-H5-07	0,95	S	0,013689	0,069
T-H5-08	0,90	H	0,013689	0,066
T-H7-01	-	H	-	-
T-H7-02	-	H	-	-
T-H7-03	-	H	-	-
T-H7-04	-	H	-	-
T-H7-05	-	H	-	-
T-H7-06	5,6	S	0,013689	0,409

4.3 Zkoušky malty

Pro úplnost experimentů bylo nutné otestovat i samostatné spojovací materiály. Byly provedeny zkoušky v tahu za ohybu a v tlaku na trámečcích z malt, respektive lepidel, použitých v experimentech. Zkušební tělíska byla vyrobena ze všech druhů použitých malt a lepidel kromě materiálu č. 3. Trámečky byly vyrobeny napěchováním malty do speciální formy, ze které vznikly vždy tři zkušební tělesa pro zkoušku v tahu za ohybu pro každý materiál, viz *obr. 4.15*. Forma je uzpůsobena tak, aby s její pomocí šlo vyrobit normová zkušební tělesa o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Před vlastní zkouškou byla přeměřena výška a šířka trámečků a naměřené hodnoty jsou shrnuty v *tab. 4.7*. Trámečky byly nejprve využity pro zkoušku v tahu za ohybu a po jejich přelomení byly zbylé části přeznačeny a použity na zkoušku v tlaku. Způsob značení je patrný z *obr. 4.16* a *obr. 4.17*, přičemž číslo malty odpovídá pořadovému číslu smykové zkoušky spojovacích malt, viz předcházející kapitola, tedy bez spojovacího materiálu č. 3. ^[15]



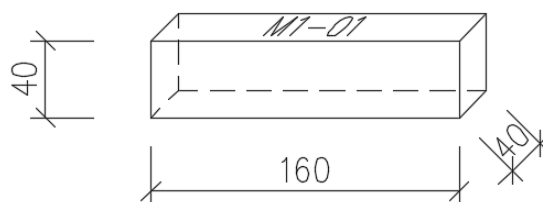
Obr. 4.15 Trojforma na trámečky pro zkoušení malt

Tab. 4.7 Souhrn zkušebních trámečků

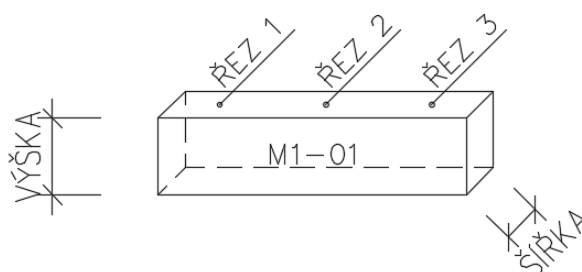
Označení vzorku	Označení části vzorku	Druh mat.	Rozměry					
			Šířka			Výška		
			1	2	3	1	2	3
M1-01	01	Druh 1	40,60	40,86	40,40	40,17	40,19	40,02
	02							
M1-02	01		41,03	40,93	40,40	39,95	40,08	40,00
	02							
M1-03	01		40,57	39,93	40,97	39,93	39,76	39,83
	02							
M2-01	01	Druh 2	40,83	40,71	40,39	39,82	40,02	39,94
	02							
M2-02	01		41,06	40,68	40,24	40,42	40,30	39,80
	02							
M2-03	01		41,30	40,90	40,50	41,03	40,84	40,59
	02							
M4-01	01	Druh 4	40,18	40,30	40,60	40,00	39,87	39,81
	02							
M4-02	01		39,90	40,28	40,52	39,76	39,80	39,90
	02							
M4-03	01		40,35	40,58	40,80	39,85	39,93	39,91
	02							
M5-01	01	Druh 5	40,80	40,61	40,98	40,50	40,49	40,13
	02							
M5-02	01		40,78	40,28	39,88	40,26	40,16	40,02
	02							

M5-03	01		40,39	40,74	40,75	40,33	40,63	40,68
	02							
M6-01	01	Druh 6	40,12	40,10	40,10	40,36	40,45	40,31
	02							
M6-02	01		40,54	40,27	39,79	40,61	40,53	40,34
	02							
M6-03	01		40,07	40,15	39,88	40,18	40,41	40,56
	02							
M7-01	01	Druh 7	41,00	42,00	41,00	40,00	40,00	40,00
	02							
M7-02	01		41,00	42,00	41,00	40,00	41,00	40,00
	02							
M7-03	01		42,00	41,00	41,00	40,00	41,00	40,00
	02							

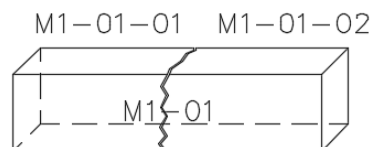
POLOHA PŘI TVRDNUTÍ



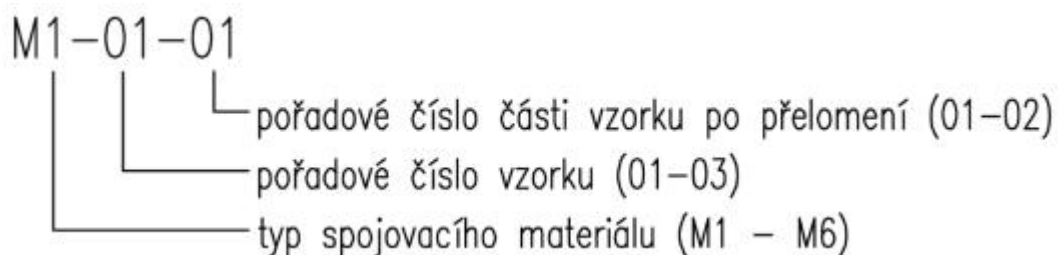
POLOHA PŘI ZKOUŠCE OHYBEM



POLOHA PŘI ZKOUŠCE TLAKEM



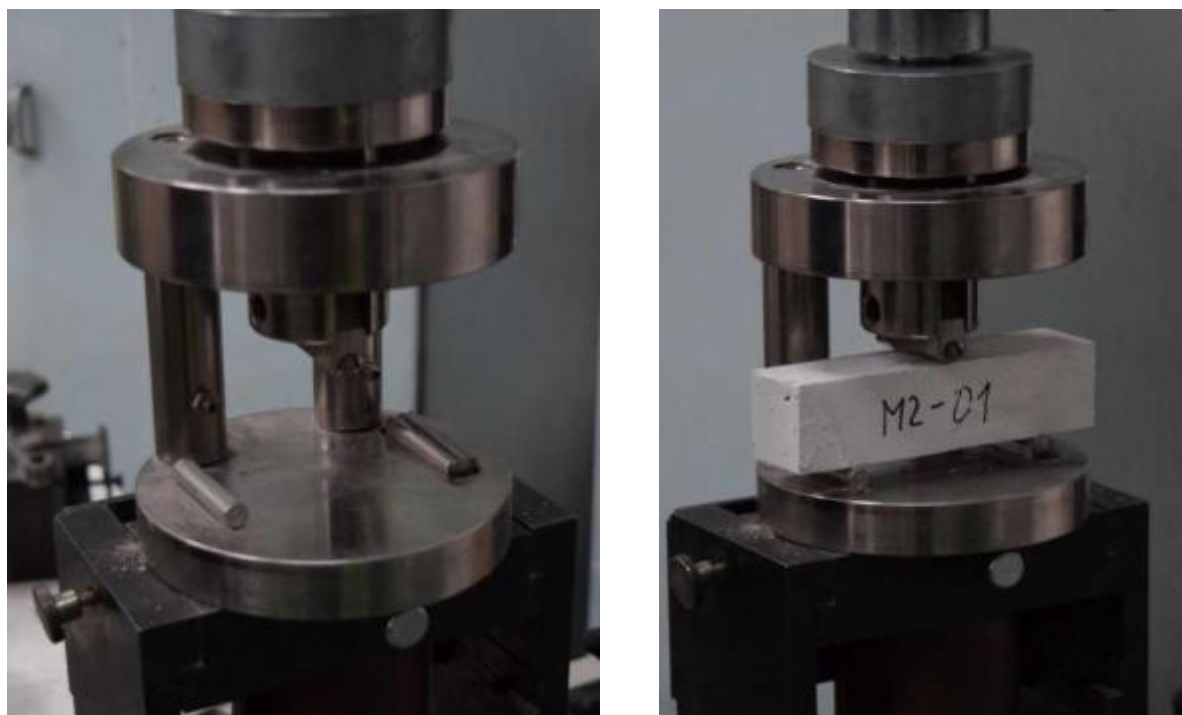
Obr. 4.16 Způsob značení trámečků



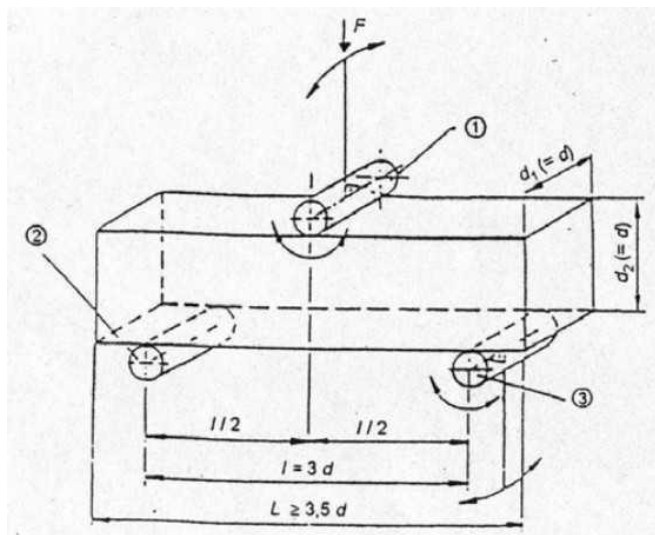
Obr. 4.17 Vysvětlení značení vzorků spojovacích materiálů

4.3.1 Tah za ohybu

Na zkušebním zařízení MTS Elite Q100 byly nejprve provedeny zkoušky malt v tahu za ohybu. Po porušení byly dle normového postupu obě části zkušebního tělesa dále zatíženy tlakem. Na každém zkušebním tělese se vyhodnocovala pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Pro tyto účely byly vyrobeny pro každý druh spojovacího materiálu tři trámečky. Zkoušku bylo možné provést po dostatečném vytvrdnutí malty (min. 28 dní). Zkouška je koncipována jako třibodový ohyb, kde zatěžovací síla působí v polovině trámečku a podpory jsou 30 mm od krajů, viz obr. 4.19. Předepsané vzdálenosti podpor a působící síly byly zajištěny pomocí speciálního přípravku, do kterého se zkoušený vzorek osadil, jak je patrné na obr. 4.18.^[15]



Obr. 4.18 Uspořádání zkoušky v tahu za ohybu



Obr. 4.19 Přípravek na zkoušení trámečků (vpravo s osazeným trámečkem)

Výsledky zkoušek trámečků z malt a lepidel použitých v předchozím experimentu jsou uvedeny v tab. 4.8 pro zkoušku v tahu za ohybu.

Tab. 4.8 Souhrn výsledků zkoušky v tahu za ohybu pro trámečky z malt / lepidel

Označení vzorku	Maximální síla F_{\max} [kN]	Průřezový modul W [mm ³]	Napětí σ [MPa]
M1-01	2,6	10999,758	5,91
M1-02	3,0	10958,369	6,84
M1-03	2,4	10520,607	5,70
M2-01	3,8	10866,859	8,74
M2-02	4,3	11011,33	9,76
M2-03	3,8	11369,557	8,36
M4-01	2,2	10676,927	5,15
M4-02	2,6	10634,189	6,11
M4-03	2,5	10783,492	5,80
M5-01	3,1	11096,277	6,98
M5-02	2,9	10827,436	6,70
M5-03	3,4	11208,911	7,58
M6-01	3,7	10935,287	8,46
M6-02	3,3	11025,127	7,48
M6-03	2,8	10927,278	6,41
M7-01	3,160	11200	7,05
M7-02	3,48	11767	7,40
M7-03	2,79	11486,833	6,08

4.3.2 Tlaková zkouška malty

Trámečky po zkoušce v tahu za ohybu byly dále využity na určení pevnosti v tlaku. Jedná se o zkoušku v prostém tlaku. Přípravek na zkoušení trámečků v tlaku je na *obr. 4.20*. Zkouška byla řízena silou přístroje na trámeček. Výsledky jsou uvedeny v *tab. 4.9*.^[15]



Obr. 4.20 Přípravek na zkoušku v tlaku s osazeným trámečkem

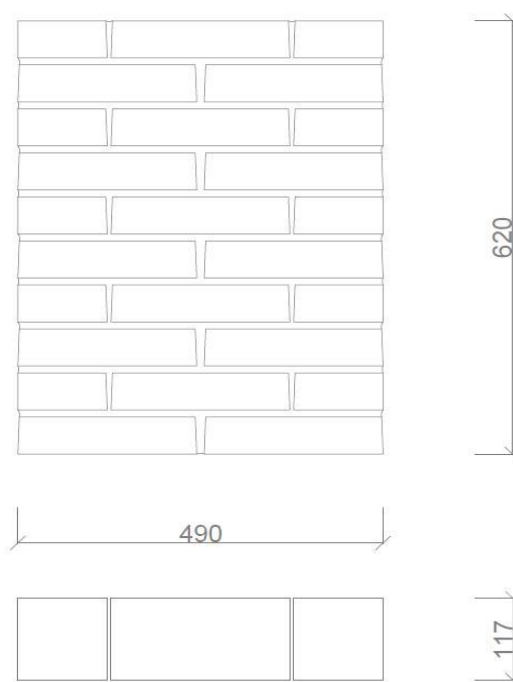
Tab. 4.9 Souhrn výsledků zkoušky v tlaku pro trámečky z malt / lepidel

Označení vzorku	Maximální síla F_{\max} [kN]	Plocha průřezu A [m ²]	Napětí σ [MPa]
M1-01-01	30,6	0,0016	19,13
M1-01-02	28,5	0,0016	17,81
M1-02-01	31,4	0,0016	19,63
M1-02-02	30,6	0,0016	19,13
M1-03-01	28,7	0,0016	17,94
M1-03-02	30,5	0,0016	19,06
M2-01-01	53,2	0,0016	33,25
M2-01-02	58,1	0,0016	36,31
M2-02-01	65,1	0,0016	40,69
M2-02-02	61,6	0,0016	38,50
M2-03-01	67,1	0,0016	41,94
M2-03-02	54,1	0,0016	33,81
M4-01-01	29,0	0,0016	18,13
M4-01-02	27,2	0,0016	17,00
M4-02-01	29,5	0,0016	18,44
M4-02-02	25,4	0,0016	15,88
M4-03-01	28,9	0,0016	18,06

M4-03-02	30,9	0,0016	19,31
M5-01-01	37,6	0,0016	23,50
M5-01-02	32,5	0,0016	20,31
M5-02-01	36,7	0,0016	22,94
M5-02-02	34,6	0,0016	21,63
M5-03-01	43,6	0,0016	27,25
M5-03-02	38,1	0,0016	23,81
M6-01-01	44,8	0,0016	28,00
M6-01-02	45,0	0,0016	28,13
M6-02-01	43,3	0,0016	27,06
M6-02-02	37,8	0,0016	23,63
M6-03-01	41,5	0,0016	25,94
M6-03-02	48,6	0,0016	30,38
M7-01-01	30,00	0,0016	17,86
M7-01-02	30,28	0,0016	18,03
M7-02-01	30,01	0,0016	18,30
M7-02-02	30,63	0,0016	18,68
M7-03-01	32,93	0,0016	19,60
M7-03-02	31,09	0,0016	18,96

4.4 Tlaková zkouška pilíře

Zkušební tělesa byla vyrobena v souladu s normou ČSN EN 1052-1 z dvaceti cihel spojených navzájem spojovacím materiálem. Geometrie těles byly shodné. Tělesa byla vyrobena ze skleněných cihel, které jsou tvaru komolého jehlanu s obdélníkovými základnami. Rozměry jsou patrné z *obr. 4.21*. Shrnutí všech zkoušených vzorků včetně tloušťky ložných spár je provedeno v tab. 4.10. ^[15]



Obr. 4.21 Půorys a bokorys tělesa

Tab. 4.10 Souhrn základních parametrů piliřů

Označení vzorku	Tloušťka ložných spár [mm]	Typ použitých cihel	Druh použité malty
C5-01	10	Hladké	5
C5-02	10	Hladké	5



Obr. 4.22 Těleso před zkouškou

Zkušební tělesa byla sestavena z 20 kusů plných skleněných cihel a spojena maltou č. 5, viz obr. 4.22. Tělesa byla zkoušena ve zkušebním zařízení DSM 2500. Jednalo se o tlakovou zkoušku, kdy na horní stranu vzorku byly přidány dva ocelové I profily pro lepší roznesení zatížení od stroje, viz obr. 4.23.



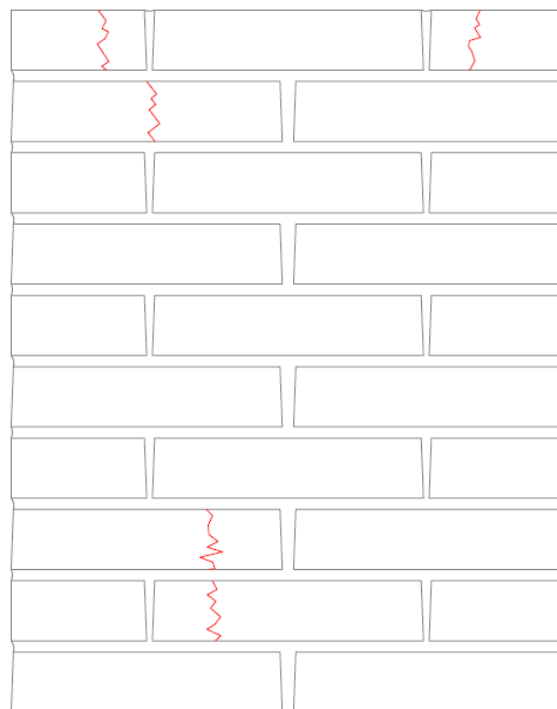
Obr. 4.23 Těleso v zařízení s přilepenými I profily na horní hraně

Tělesa byla zatěžována plynule do porušení, při kterém začaly cihly praskat. Vzorek i přes popraskání neztratil stabilitu ani nedošlo ke kolapsu. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tab. 4.11. U jednoho vzorku bylo měřeno nepřímě napětí pomocí tenzometrů, které byly osazeny uprostřed tělesa z každé strany.

Tab. 4.11 Výsledky tlakové zkoušky na těleso ze skleněných cihel

Označení vzorku	Maximální síla F_{\max} [kN]	Napětí σ [MPa]
C5-01	1410,057	-
C5-02	1565,735	14,39
		15,72

Po vyndání ze zkušebního zařízení bylo vidět, které cihly byly porušeny. Popraskané cihly jsou zobrazeny na obr. 4.24.



Obr. 4.24 Vlevo prasklá cihla po zkoušce a vpravo vidíme schéma prasklin na tělese

5 Závěr

Pro návrh zdiva ze skleněných plných cihel chybí v současnosti dostatečné znalosti nejen o celkové únosnosti zdiva namáhaného v tlaku a ohybem, ale rovněž není k dispozici vhodný materiál, který by byl použitelný pro spojování jednotlivých cihel. V zahraničí používaná akrylátová lepidla vykazují dostatečnou pevnost spoje, ale vyžadují takřka laboratorní podmínky pro zdění (čistota, UV záření, ruční broušení skleněných cihel) a poměrně značné finanční náklady.

Experimentální výzkum, probíhající na Stavební fakultě ČVUT, je zaměřen na nalezení vhodné malty pro spoje skleněných cihel s ohledem na praktické využití a cenu. Vzhledem k hladkému povrchu nelze na spoje použít běžné malty, proto byla v experimentální části ověřována pevnost spoje na malých vzorcích pro malty určené k lepení dlažby či skleněných obkladů.

Experimentální část byla rozdělena na zkoušky spoje ve smyku a na adhezni zkoušky, včetně zkoušek samotné malty. Získané pevnosti spoje a materiálové vlastnosti malty jednak umožní vhodný výběr malty, ale zároveň budou sloužit jako vstupní údaje pro numerické modely.

Z provedených experimentů vyplývá, že úprava povrchu (zdrsnění pískováním) zlepší adhezi malty k povrchu skla a tím se násobně zvýší pevnost spoje ve srovnání s povrchem neupraveným. Ale tyto úpravy nejsou možné z estetického hlediska, protože mají dopad na vzhled zdiva. Zkoušené malty a spojovací materiály vykazovaly rovněž závislost na tloušťce

spáry – čím menší tloušťka, tím lepší pevnost spoje. S ohledem na praktické použití lze konstatovat, že z hlediska proveditelnosti na stavbě není možné provádět spáry s tloušťkou menší než 3 mm. Na základě těchto výsledků však je třeba doporučit, aby v praxi byly navržené tloušťky dodržovány, nejlépe s použitím distančních křížků.

V tab. 5.1 jsou porovnány klasické zdící prvky jako jsou pálené cihly, pórobetonové tvárnice a betonové tvárnice se skleněnými plnými cihlami. K získání porovnatelných výsledků rozdílných materiálů jsou použity stejné rozměry jako mají skleněné plné cihly, tj. šířka prvků je 120 mm, nebo nejbližší možné.

Tab. 5.1 Porovnání typů cihel

Vlastnost materiálu	Pálené tvárnice	Pórobetonové tvárnice	Betonové tvárnice	Skleněné plné cihly
Šířka [mm]	115	125	97	117
Objemová hmotnost [kg/m ³]	870	500	1050	2500
Pevnost cihel v tlaku [MPa]	10	2,8	4	109

Závěrem lze konstatovat, že provedené experimenty prokázaly dotečnou pevnost některých druhů malt, které tak lze použít pro budoucí konstrukce využívající plných skleněných cihel. Rovněž zkouška pilíře vyzděného z plných skleněných cihel potvrdila, že únosnost zdiva je pro praktické využití dostatečná. Je však třeba mít na paměti, že sklo je křehký materiál a nikde nebude využíváno v takovém měřítku jako tradiční stavební materiály.

6 Literatura

- [1] Historické způsoby opracování kamene, metody průzkumu a kritéria výběru náhradního kamene kvádrového zdiva, Kolektiv autorů [ISBN 978-80-7037-229-6]
- [2] Hájek a kol. Pozemní stavitelství pro 1. ročník SPŠ stavebních: vydáno v roce 2005, [ISBN 978-80-86817-12-5]
- [3] <http://www.hlinenydum.cz/wiki/historie-hlinenych-staveb/>
- [4] <http://www.stavebniny-vm.cz/sortiment/zdici-materialy/keramicke-zdici-materialy.htm>
- [5] <https://wienerberger.cz/fakta/pro%C4%8D-stav%C4%9Bt-z--p%C3%A1len%C3%BDch-ciheľ>
- [6] <https://www.ceskestavby.cz/clanky/keramicke-tvarnice-nebo-porobeton-19536.html>
- [7] <http://www.ytong.cz/porobeton-ytong.php>
- [8] <http://www.ytong.cz/zdrave-bydleni-.php>
- [9] <http://www.be-tong.cz/technologie-tvarnice>
- [10] <http://www.archiweb.cz/buildings.php?action=show&id=2119&type=20>
- [11] <https://www.mvrdv.nl/projects/crystal-houses>
- [12] <http://millenniumparkfoundation.org/places/crown-fountain/>
- [13] https://www.cityofchicago.org/city/en/depts/dca/supp_info/chicago_s_publicartercrownfountaininmillenniumpark.html
- [14] <https://www.designboom.com/architecture/hiroshi-nakamura-nap-optical-glass-house/>
- [15] Zdivo ze skleněných cihel souhrnný protokol: vydáno v roce 2018, Eliášová, Sokol a Fíla