

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra technologie staveb



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Specifika technologie pro robotickou

výstavbu kleneb

Bc. Radka Pokorová

2019

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Kovářík

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury

V Praze dne.....

Podpis:.....

Bc. Radka Pokorová

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce panu Ing. Michalovi Kováříkovi, pod jehož vedením tato práce vznikala a prof. Ing. Petrovi Štemberkovi, Ph.D. za odborné konzultace. Dále bych ráda poděkovala Ing. Janu Kubešovi a Ing. Pavlu Pokorovi za odborné rady v oblasti strojírenství, Mgr. Jitce Pokorové za jazykové revize a Ing. Tomášovi Koulovi za odbornou pomoc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Pokorová Jméno: Radka Osobní číslo: 423655

Zadávací katedra: 122 Katedra technologie staveb

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Příprava, realizace a provoz staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Specifika technologie pro robotickou výstavbu kleneb

Název diplomové práce anglicky: Specifics of technology for robotic construction of vaults.

Pokyny pro vypracování:

Rešerše technologií pro výstavbu kleneb z ruky

Specifikace zařízení staveniště pro robotickou výstavbu kleneb

Specifikace parametrů robotického systému vzhledem k provozu v podmínkách staveniště

Specifikace parametrů robotického systému vzhledem k technologii výstavby kleneb

Specifikace požadavků na robotickou výstavbu kleneb z hlediska legislativy, BOZP a OŽP atd.

Seznam doporučené literatury:

1. WENDLAND, David, 2007. Traditional Vault Construction Without Formwork: Masonry Pattern and Vault Shape in the Historical Technical Literature and in Experimental Studies. International Journal of Architectural Heritage [online]. 1(4), 311-365 [cit. 2018-06-12]. DOI: 10.1080/15583050701373803. ISSN 1558-3058. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15583050701373803>

2. GRAMAZIO, Fabio a Matthias KOHLER, ed., 2014. Made by robots: Challenging Architecture at the Large Scale : May/June 2014. London: Wiley. Architectural design (Wiley). ISBN 978-1-118-53548-6.

3. Sborníky konferencí ISARC 2003-2018

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing Michal Kovářík

Datum zadání diplomové práce: 3.10.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Anotace

Název DP:

Specifika technologie pro robotickou výstavbu kleneb

Anotace:

Práce specifikuje zařízení staveniště pro výstavbu kleneb za použití robotické technologie. V práci jsou popsány technologie zdění kleneb z ruky a robotické zdící technologie. Cíle práce jsou specifikování zařízení staveniště, navržení parametrů robotického systému vzhledem k provozu v podmínkách staveniště a k technologii výstavby kleneb, specifikovat požadavky na robotickou výstavbu z hlediska bezpečnosti a ochrany zdraví při práci a ochrany životního prostředí.

Klíčová slova:

Klenba, robotizace, specifika zařízení staveniště, technologie zdění z ruky, katalánská klenba

Abstract

Name:

Specifics of technology for robotic construction of vaults

Annotation:

The thesis specifies construction equipment for the construction of vaults using robotic technology. The thesis describes the technologies of free hand vaulting and robotic masonry technologies. The aim of the thesis is to specify the construction site equipment, to design parameters of the robotic system in relation to the site construction conditions and to the technology of the construction of vaults. Another aim of the thesis is to specify the requirements for robotic construction in terms of Health and Safety and Environmental Protection.

Key words:

Vault, robotization, specific site equipment, free hand vaulting, Catalan vault

Obsah

Úvod.....	9
1. Rešerše	10
1.1. Klenbové konstrukce	10
1.1.1. Základní pojmy	10
1.1.2. Rozdělení kleneb	11
1.1.3. Statické řešení kleneb.....	11
1.1.4. Technologie zdění kleneb.....	13
1.2. Robotické technologie ve stavebnictví.....	20
1.2.1. Průmyslové roboty	20
1.2.2. Ostatní robotické technologie.....	24
2. Praktická část	26
2.1. Návrh a specifikace robota	27
2.1.1. Návrh pracovního nástroje – Robotické ruky	27
2.1.2. Výběr vhodného typu podvozku	28
2.1.3. Specifikace podvozku robota	36
2.1.4. Návrh autonomního dopravníku materiálu	38
2.1.5. Pohon stavebního robota a dopravníku materiálu	39
2.2. Specifikace stavby.....	40
2.3. Technologický postup	42
2.3.1. Přípravenost staveniště.....	42
2.3.2. Skladování materiálu.....	42
2.3.3. Pracovní postup	44
2.3.4. Diagram pracovního postupu pro zděné konstrukce	50
2.3.5. Model robota při stavbě.....	52

2.3.6. Podmínky realizace	52
2.3.7. Bezpečnost a ochrana zdraví při práci.....	53
2.3.8. Ochrana životního prostředí	65
2.3.9. Obecné požadavky na zařízení staveniště	66
Závěr.....	69
Reference.....	70
Rejstřík obrázků	73
Rejstřík tabulek	75

Úvod

V dnešní době se robotické autonomní jednotky objevují v mnoha odvětvích lidské práce. Můžeme je vidět v lékařství, kde robotická ruka je schopna operovat člověka přesněji než ruka lidská. Ve strojírenství tyto jednotky zastupují těžce pracující dělníky u montážních linek, zrychlují výrobu a pomáhají předcházet zraněním, která jsou způsobena přetížením lidského organismu v důsledku těžké manuální práce. Ve stavebnictví je možné tyto technologie zavádět pro prefabrikovanou výrobu, která podobně jako výroba strojírenská, probíhá v továrně u montážních linek. Pokud se ale podíváme na výstavbu in situ (tedy na výstavbu přímo na staveništi), je náročné tyto technologie zavádět. I přes podrobné časové plánování projektů a přesnost výkresů a technologických postupů nastávají na stavbě nenadálé situace, které jsou třeba okamžitě vyřešit a mohou změnit časový i technologický ráz výstavby. Přizpůsobit autonomní robotickou technologii těmto situacím je velmi obtížný úkol, ale i přes to již byly vyvinuty technologie pro zdění svislých stěn, které jsou do výstavby již zapojeny.

Prvotní myšlenkou pro vznik této práce bylo spojení moderních trendů vývoje stavebního průmyslu a tradičního umění vyzdívání klenbových konstrukcí, které fungují obdobně jako betonové skořepiny a autorka práce je považuje za estetičtější a ekologičtější. Bohužel jsou takové konstrukce časově i technologicky náročné. Proto se tato práce zaměřuje na návrh vytvoření autonomní robotické technologie, která by urychlila výstavbu zděných konstrukcí a dokázala by zdít klenbové konstrukce.

Cílem této práce je zhodnotit a navrhnout specifika robotického autonomního zařízení, které bude schopné zdít klenbové konstrukce takzvaně z ruky, tedy bez použití podpěrného bednění a navrhnout obecné zařízení staveniště pro robotickou výstavbu. Na základě staveništních podmínek bude navržen podvozek, který v rámci parametrů staveniště a robotické technologie bude nejlépe vyhovovat potřebnému účelu. Práce má sloužit jako základ pro další vývoj této technologie, pro úspěšné zavedení do praxe bude v budoucnosti nutné rozvedení popisovaných myšlenek ve spolupráci s odborníky na danou problematiku.

Nakonec bude robotická výstavba posouzena z hlediska legislativy bezpečnosti a ochrany zdraví při práci a ochrany životního prostředí.

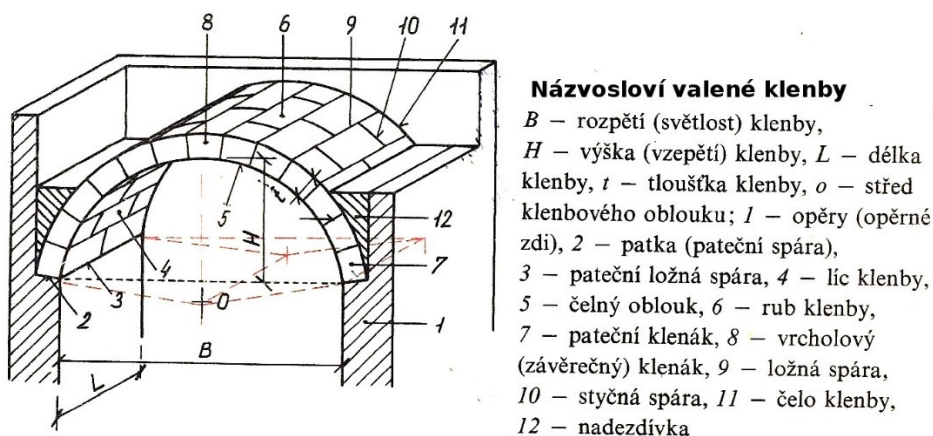
1. Rešerše

1.1. Klenbové konstrukce

Trámové a klenbové konstrukce se v průběhu dob střídaly podle dostupnosti znalostí a materiálů a v některých případech se tyto konstrukce mohly i doplňovat, což se objevuje hlavně u megalitických staveb. Kámen jako stavební materiál má vysokou pevnost v tlaku, kvůli nízké pevnosti materiálu v tahu ale není vhodný pro vytvoření nosníku (ohybové namáhání způsobuje tahové účinky na straně spodních vláken nosníku). Správně provedená klenba je namáhána pouze tlakem, nedochází ke ztrátě pevnosti materiálu a tím pádem je kamenná klenba na rozdíl od kamenného nosníku dlouhodobě stabilní. [1]

Klenby menších měřítek mohly být pro středověké stavaře experiment a příprava pro stavbu klenby větších měřítek. Tyto „menší modely“ se totiž chovají stejně jako zvětšené stavby, protože rovnováha a stabilita záleží na geometrii klenby, a ne na velikosti. [2]

1.1.1. Základní pojmy



Obrázek 1 - Názvosloví klenby [3]

Opěry klenby – nosná podpěra kleneb. Nejčastěji se jedná o nosné zdi.

Rozpětí klenby – vzdálenost mezi opěrnými zdmi.

Výška klenby – převýšení vrcholu klenby nad patkami.

Líc klenby – spodní viditelná plocha klenby.

Rub klenby – horní neviditelná plocha klenby.

Čelní klenbový oblouk – křivka, která tvoří líc klenby.

Tloušťka klenby – vzdálenost mezi lícem a rubem klenby (může být v patce klenby větší než ve vrcholu).

Klenáky – stavební prvky zděných kleneb, mohou být kamenné nebo cihelné.

Závěrečný a pateční klenák – klenák ve vrcholu nebo v patkách klenby.

Ložné spáry – spáry mezi klenáky směřující do středu klenbového oblouku, kolmé na oblouk, přenášejí se do nich tlaky klenby.

Styčné spáry – spáry mezi klenáky, jsou kolmé k ložním spárám, jsou vystřídány a nepřenášejí tlak.

Nadezdívka – vyplňuje prostor mezi klenbou opěrnou zdí, zpevňuje klenbu. Na únosnost klenby má vliv nadezdívka i zásyp klenby.

Klenební pás – úzký pruh valené klenby. [3]

1.1.2. Rozdělení kleneb

Klenby jsou nejčastěji rozdělovány podle geometrického tvaru. Toto dělení je jednoduché a poskytuje rychlou orientaci pro stavební praxi [4].

- 1) Klenby válcové
 - a. Klenba valená
 - b. Klenba klášterní
 - c. Klenba necková
 - d. Klenba zrcadlová
 - e. Klenba křížová
- 2) Klenby sférické
 - a. Kupole
 - b. Česká klenba
 - c. Česká placka
- 3) Klenba pruská
- 4) Klenba sklípková
- 5) Klenba s lunetami

1.1.3. Statické řešení kleneb

Pro statické řešení se v minulosti používalo mnoho zjednodušení, která se opírala o znalosti konkrétní doby. Tato zjednodušení se týkala hlavně výpočetních modelů statických i geometrických, zatížení v závislosti na tvaru a charakteru zatížení

tlakem. Charakter převážného zatížení tlakem je určen zakřivením střednicové plochy klenby. [5]

Jestliže ve kterémkoliv průřezu klenby je rovnováha vnitřních sil způsobených vlastní tíhou klenby a nahodilým zatížením je klenba v rovnováze. [5]

Základem pro návrh tvaru a tloušťky klenby je posouzení tlakového namáhání klenby. Pokud je klenba masivní a má velkou rezervu v únosnosti, je možné připustit tahové namáhání, a to za podmínky:

$$\frac{t}{4} < e < \frac{t}{6}$$

kde t je výška průřezu a e je vzdálenost tlakové čáry od těžiště průřezu. Podpory kleneb musí být dostatečně tuhé a neposuvné, aby přenesly výsledné šikmé podporové zatížení od kleneb, aniž by se deformovaly více, než je přípustné. [5]

Základními předpoklady pro spolehlivé působení jsou:

- 1) Neposuvnost podpor (v obou směrech)
- 2) Výslednice působících zatížení musí ležet v jádru klenby
- 3) Omezení, či vyloučení lokálních a nesymetrických zatížení [5]

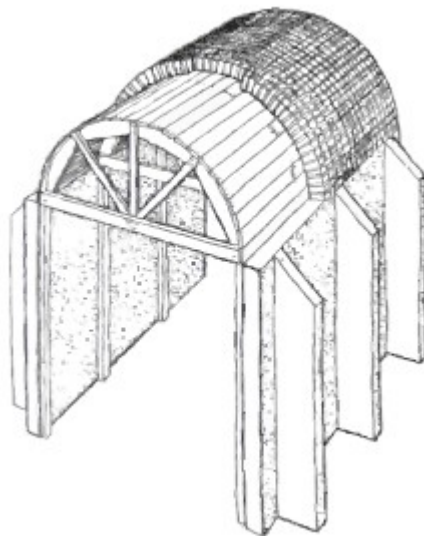
1.1.4. Technologie zdění kleneb

1.1.4.1. Technologie zdění kleneb za pomoci bednění a ramenátů

Evropská klenba

Evropská klenba je těžká, zděná z plných pálených cihel nebo z kamene a pro stavbu této konstrukce bylo nutné podpěrné bednění, protože konstrukce při zdění nebyla samonosná. Pro stavbu podpěrného bednění bylo zapotřebí velké množství dřeva. [6]

Klenby se zdily na ramenátů nebo se použilo plné zaskružení (zakřivené bednění po celém půdorysu klenby, které určuje tvar zdění). Ramenátů se vytvářejí z prken nebo z fošen a jejich tvar kopíruje výsledný tvar klenby. Pod ramenátů i zaskružení se osazovaly klínky, aby bylo možné snadné a rychlé odskržení. I přes mnohé nevýhody této konstrukce, jako jsou velká pracnost, vysoká hmotnost konstrukce a velká tloušťka stropu, se ve své době klenby jevíly jako nejvýhodnější způsob zastropení místností. Velkými výhodami kleneb jsou dlouhá životnost, vysoká statická únosnost, velká požární odolnost a schopnost zastropit velké rozpětí. [3]



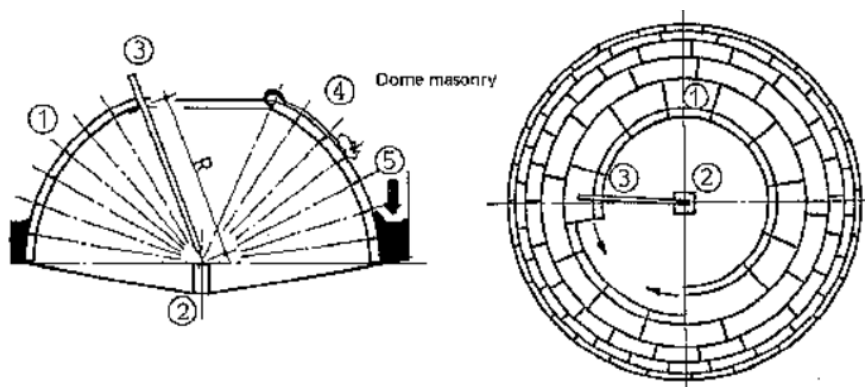
Obrázek 2 - Evropská klenba (valená) [6]

1.1.4.2. Technologie zdění kleneb z ruky

V některých oblastech, kde bylo potřeba redukovat použití dřeva jako podpěrného bednění pro zdění (z důvodů ekonomického a nedostatku dřeva) vznikaly jiné postupy zdění kleneb, a to zdění kleneb z ruky. Tyto technologie nevyžadovaly žádné podpůrné konstrukce, ale nesly stejné výhody jako technologie zdění do zaskružení. Z ruky se zdily například klenby núbijská, mexická a katalánská nebo kopule (sférická klenba).

Kopule

Kopule se používala k zastřešení kruhového půdorysů a pro dodržení tvaru se používala dřevěná tyč, která byla na jednom konci v rovině paty klenby kloubově držena přesně ve středu půdorysu. Pokud byl půdorys eliptický nebo se zdila nižší bání, používalo se otáčivého ramenátu. Tento ramenát nebyl podpěrný, ale sloužil pouze pro určení tvaru. Vrchol kopule, se zaklenuje tak, že se ve výši posledního věnce vyklene pas, který se zdí na šířku cihly. Samotný závěr zaklenutí se vyzdí tzv. „na rybinu.“ Každá vyzděná řada kopule funguje jako věnec a je tedy samonosná, z toho důvodu lze klenbu kdykoliv ukončit a není potřeba bednění. [7]

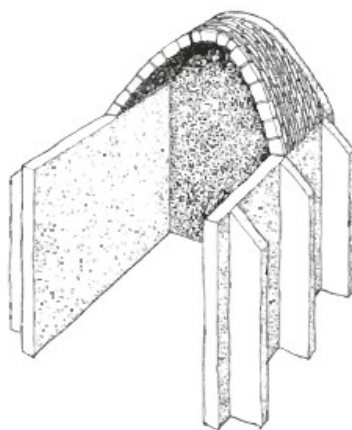


Obrázek 3 - Schéma stavby kopule [8]

Núbijská/Mexická klenba

Núbijská klenba vznikla, jak její název napovídá, v Núbii, zhruba v roce 1200 př. n. l. Pro moderní stavebnictví byla znovuobjevena ve 20. století egyptským architektem Hassanem Fathym, který její konstrukci použil nejprve ve své domovině při návrhu objektů ve vesnici Gourna poblíž Luxoru. V 80. letech navrhl v americkém státě Nové Mexiko budovu mešity Dar al-Islam. Od 19. století se v Mexiku používá podobná metoda zdění kleneb. [6], [9]

Rozdíl mezi klenbou núbijskou a mexickou je takový, že núbijské klenby se opírají o čelní zeď, která tvoří štít na protilehlých koncích zaklenuté místnosti. Klenby mexické podpírají boční zdi (v případě dlouhých obdélníkových půdorysů) nebo rohy (v případě čtvercových půdorysů). [10]

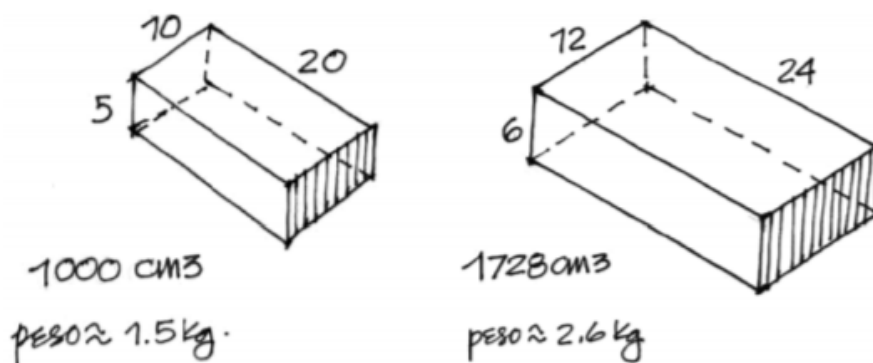


Obrázek 4 - Mexická klenba [6]

Metoda „skloněného zdění“

Metoda „Leaning Brick“ neboli metoda „skloněného zdění“, se používá pro stavbu střech bez užití podpěrného bednění, absence bednění z této techniky dělá ekonomicky výhodnou pro zastřešování. Další ekonomickou výhodou této metody je to, že je velmi rychlá na výstavbu (1 m² klenby vyzdí 1 člověk za 2 hodiny, zkušený dělník s pomocníkem dokáže za den vyzdít 7-8 m² klenby, což je zhruba čtyřikrát kratší čas, než je potřebný pro betonáž stejné plochy konstrukce). Tímto způsobem se zastřešují převážně stavby čtyřúhelníkových půdorysů a klenba musí být podepřena po celém půdorysu. K nízkým nákladům této metody napomáhá také použití nízkonákladového materiálu. Není potřeba žádné oceli na vyztužování prvků, pouze

cihly a malta. Použité cihly, se kterými se mexická klenba zdí, se nazývají cuña, mají rozměry 5x10x20 cm, jejich objem je 1000 cm³ a plošná hmotnost mezi 60 a 75 kg/m². Je možné používat i standardní mexickou cihlu, která má rozměry 6x12x24 cm. Cihla pro zdění klenby váží 60 % hmotnosti cihly používané pro zdění [10]

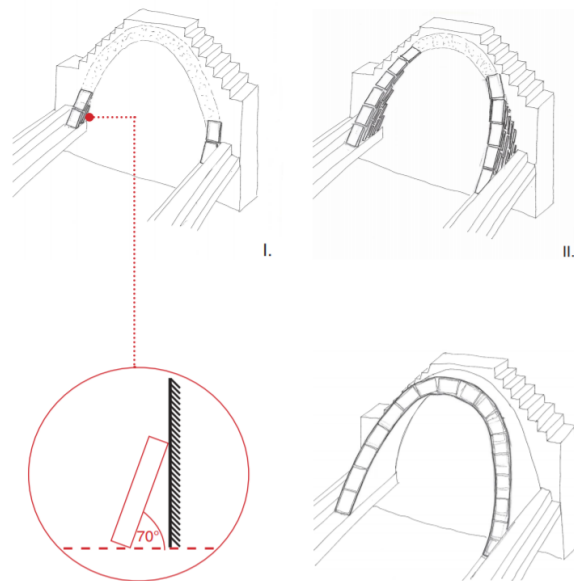


Obrázek 5 - Mexická cihla pro stavbu klenby a standardní mexická cihla [10]

Použitá malta na zdění se skládá z kombinace křídý, cementu a písku v poměru 1:1:8 nebo 1:1:10. Pro zdění se používá velmi suchá cihla. Díky tomu se voda z malty rychle vsakuje do cihly a tím malta rychle získává pevnost. [10]

Principem této metody je pokládání cihelných řad na řadu předcházející. První cihla se položí na štítovou stěnu pod úhlem 70° a další řady se pod stejným úhlem přidávají. [11]

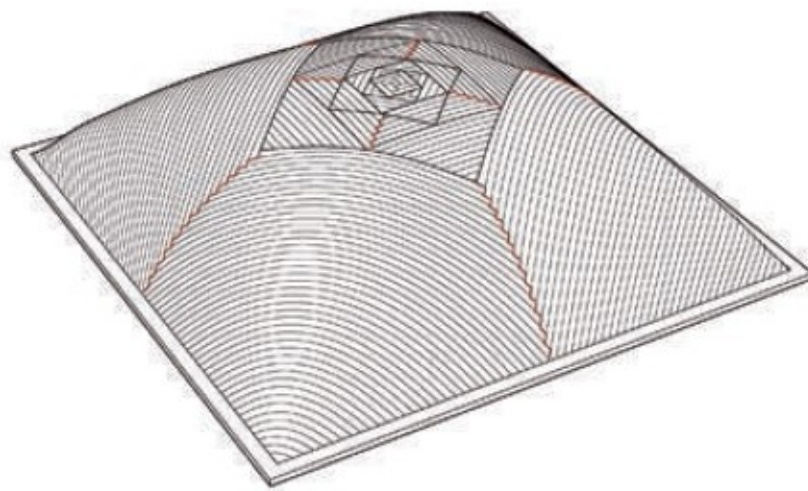
Núbijská klenba se zdí na základě stejného principu. Rozdílem těchto dvou metod je velikost štítové zdi a v typu cihel. Pro klenbu núbijskou se používaly tzv. vepřovice a pro klenbu mexickou se používaly pálené cihly menších rozměrů, než jsou cihly standardní. [10]



Obrázek 6 - Princip stavby mexické klenby metodou leaning brick [11]

Mexická klenba nad čtvercovým půdorysem

Další metodou, která se používala v Mexiku je metoda zdění z rohů nad čtvercovým půdorysem. Pokud se zdí klenba nad čtvercovým půdorysem (dvojitě zakřivení), vždy se začíná zdít z rohů a zdění postupuje směrem dovnitř a vytváří se zakřivená spára, kde se jednotlivé klenbové výseče potkávají. Při uzavírání klenby se opět postupuje od rohů již vyzděné výseče klenby. Zakřivená spára zavírajících výsečí je od původní spáry otočena o 45° . [6]

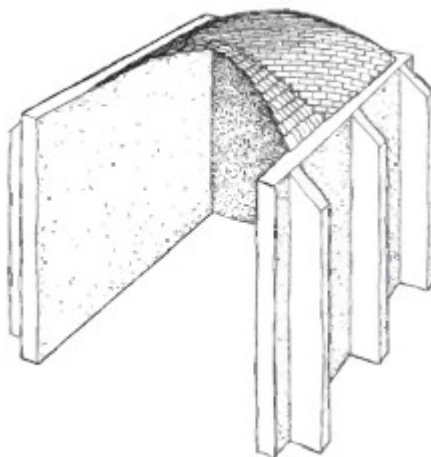


Obrázek 7 - Mexická klenba zděná z rohů nad čtvercovým půdorysem [6]

Katalánská klenba

Katalánská klenba je historická středomořská stavební technologie, která vznikla v 15. století ve Španělsku a díky Rafaelu Guastavinovi se později dostala i do Spojených Států Amerických.-Tato technika se rychle rozšířila díky své nenáročnosti a malým nákladům. [6]

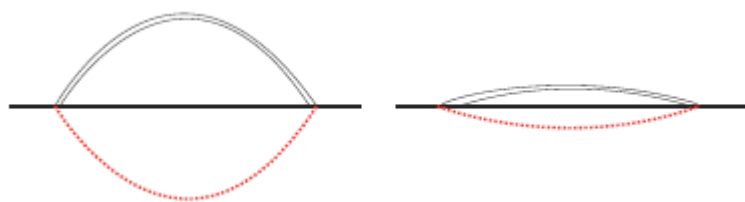
Katalánská klenba je konstrukce z tenkých hliněných dlaždic, které mají tloušťku 3 cm. Tyto dlaždice se pokládají na sebe do 2 a více vrstev na sebe v různých směrech kladení a každá z vrstev je posunuta o 45° od vrstvy předcházející, aby spáry nebyly symetrické a tím se zajistila malá křehkost konstrukce. Tradiční tenké dlaždice se používají z důvodu vlastní lehkosti, která je důležitá pro položení první vrstvy klenby. Jako pojivo je použita sádra nebo rychle tuhnoucí sádrová malta, další vrstvy dlaždic se zdí pomocí vápenocementové malty. [12]



Obrázek 8 - Katalánská klenba [6]

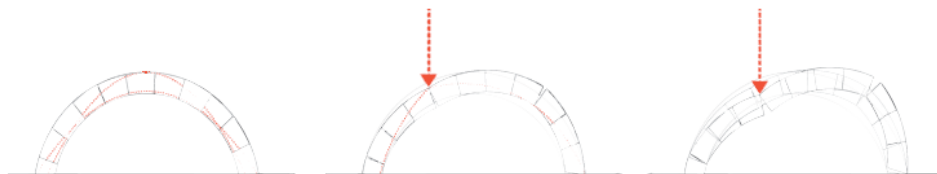
Hledání ideálního tvaru klenby

Ideálním tvarem kleneb je tvar určený pomocí tzv. „řetězovky“, který má podobu zavěšeného řetězu. V konstrukci zatížené pouze vlastní tíhou působí pouze tahové síly a v tzv. „obrácené“ řetězovce se vytvoří oblouk konstantní tloušťky, ve kterém při zatížení vlastní tíhou vznikají pouze tlakové síly. Díky jednoduchému určení tohoto tvaru se v minulosti tvar využíval pro klenby zděné z ruky, aby měli stavitelé jistotu statické bezpečnosti konstrukce. [6]



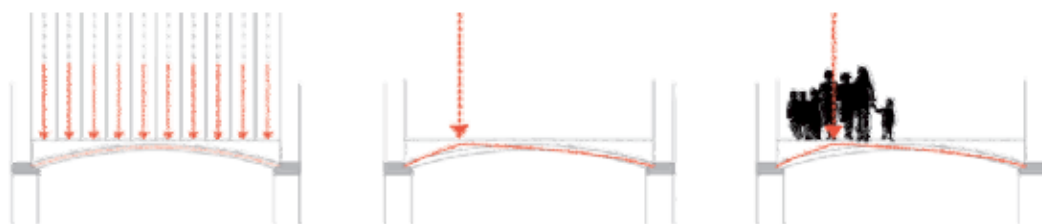
Obrázek 9 - Příklad hledání tvaru klenby pomocí tzv. řetězovky [6]

Tlakové napětí v oblouku může být znázorněno tlakovou čarou, která kopíruje tvar již zmíněné řetězovky. Jestliže je klenba zatížena pouze vlastní tíhou, tak by tlaková čára měla procházet těžištěm průřezu. Pokud na klenbu působí velká osamělá síla, může dojít k vychýlení tvaru tlakové čáry, která má v nezatížené konstrukci tvar řetězovky, mimo jádro průřezu a způsobit v oblouku tahové síly, které tato konstrukce nepřenese. [6]



Obrázek 10 - Průběh tlakové čáry – nezatížená kce, zatížení osamělou silou [6]

V případě že se klenba použije pro vícepodlažní budovy, její povrch se přitíží podlahovou vrstvou a tato vrstva zvětší jádro průřezu klenby, tedy oblast, ve které se může výslednice reakčních sil od ztížení pohybovat, aby síly byly stále pouze tlakové. [6]



Obrázek 11 - Průběh tlakové čáry u klenby přitížené podlahou – různá zatížení [6]

1.2. Robotické technologie ve stavebnictví

1.2.1. Průmyslové roboty

Průmyslové roboty jsou určeny primárně pro práci ve strojírenství, kde jsou postaveny v řadách kolem montážní linky a periodicky opakují stále stejný úkon. Na trhu se objevuje několik výrobců těchto průmyslových robotů, jsou to např. ABB Robotics, KUKA robotics a FANUC. Ve stavebnictví tento princip funguje pouze pokud se jedná o prefabrikovanou stavební výrobu, kde robot může například frézovat stavební dílec. Pokud se jedná o stavební výrobu na staveništi (tzv. in situ), může se stále jednat o monotónní periodicky se opakující úkony, ale tyto úkony jsou složeny z mnoha malých kroků. Programování těchto úkonů je složitější, ale ne zcela nemožné. V rámci vývoje technologií pro stavební výrobu bylo vyvinuto několik funkčních robotických systémů, které vycházejí z průmyslového robota a vzhledem k možnostem a rozmanitosti koncových pracovních nástrojů robota (jako jsou například tryska, fréza nebo chapadlo) je možné tyto technologie využít pro stavební výrobu in situ. [13]

Výrobcem průmyslových robotů je např. ABB Robotics, který je předním dodavatelem průmyslových robotů. Po celém světě již pracuje více než 300 000 robotů, kteří pomáhají zvyšovat pracovní výkon v průmyslové výrobě. ABB dodává průmyslové roboty, řídicí systémy, příslušenství i aplikační software pro své roboty. [14]

Další společností, která se zabývá výrobou průmyslových robotů je společnost KUKA Robotics, která nabízí velký sortiment průmyslových robotů. Jedná se ve většině případů o šestiosé robotické ruky, které mají různou nosnost, různé rozsahy a různé parametry. Jsou odolné proti nečistotám a některé jsou určeny pro extrémní podmínky. Tyto ruky jsou velmi přesné a mají velkou pohyblivost. Robotická ruka je schopná po naprogramování zvládat práci v mnoha odvětvích (např. svařování, stavba, montování součástí atd.). [15]

1.2.1.1. Semi-Automated Mason SAM100

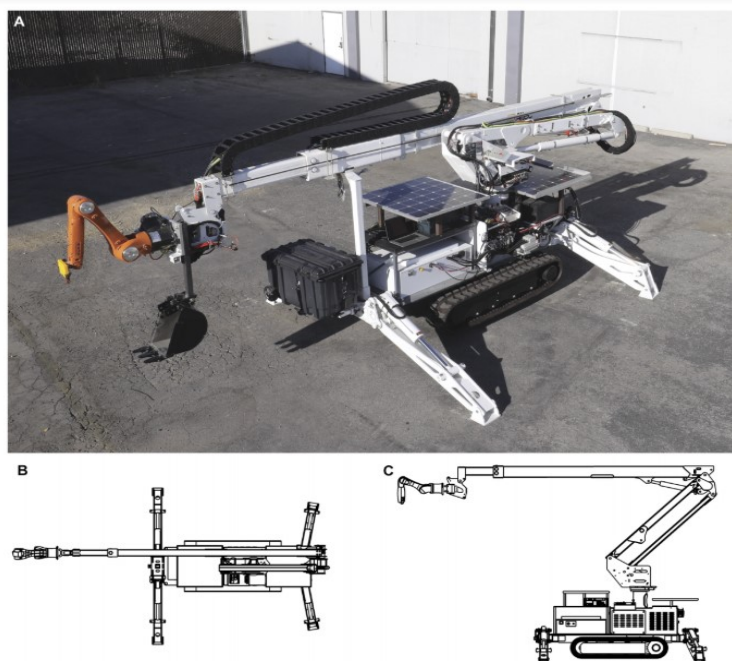
Americká společnost *Construction Robotics* vyvinula robota s názvem *Semi-Automated Mason* (SAM). Tento robot je dle výrobce vhodný pro zdění dlouhých úseků svislých stěn. Robot se skládá z pásového dopravníku pro dopravu cihel, betonové pumpy pro dopravu malty a robotické ruky s modifikovaným nástavcem pro zdění. Systém dle výrobce výrazně zvyšuje produktivitu práce na stavbě a zvládne položit až 3000 cihel za den. Pro představu zedník položí pouze zhruba 500 cihel za den. Další výhodou použití robota je redukce zranění způsobených přetížením lidského těla v důsledku zvedání těžkých břemen a monotónnosti práce. Při práci robot pomocí ruky vezme z pásového dopravníku cihlu. Na cihlu nanese maltu pomocí pumpy a položí cihlu na její místo na právě budované zdi. [16]



Obrázek 12 - *Semi Automated Mason (SAM 100)* [17]

1.2.1.2. Digital Construction Platform

Zajímavým projektem, který využívá technologie robotické ruky, je například „Digital Construction Platform“ (DCP), který byl vyvinut na americké univerzitě MIT (Massachusetts Institute of Technology). Prototyp tohoto stroje se skládá z podvozku 2015 Altec AT40GW a robotické ruky KUKA AGILUS KR 10 R 1100 sixx WP. Tato ruka je připevněna na konec zvedáku, který je součástí podvozku. Tento stroj je schopen za pomoci vytlačování polyuretanu z trysky „vytisknout“ ztracené bednění pro spodní část železobetonové kopule. [18] Bohužel z dostupných zdrojů není známo, jak je tato technologie schopna sférickou klenbu uzavřít vrchlíkem.



Obrázek 13 - Digital Construction Platform [18]

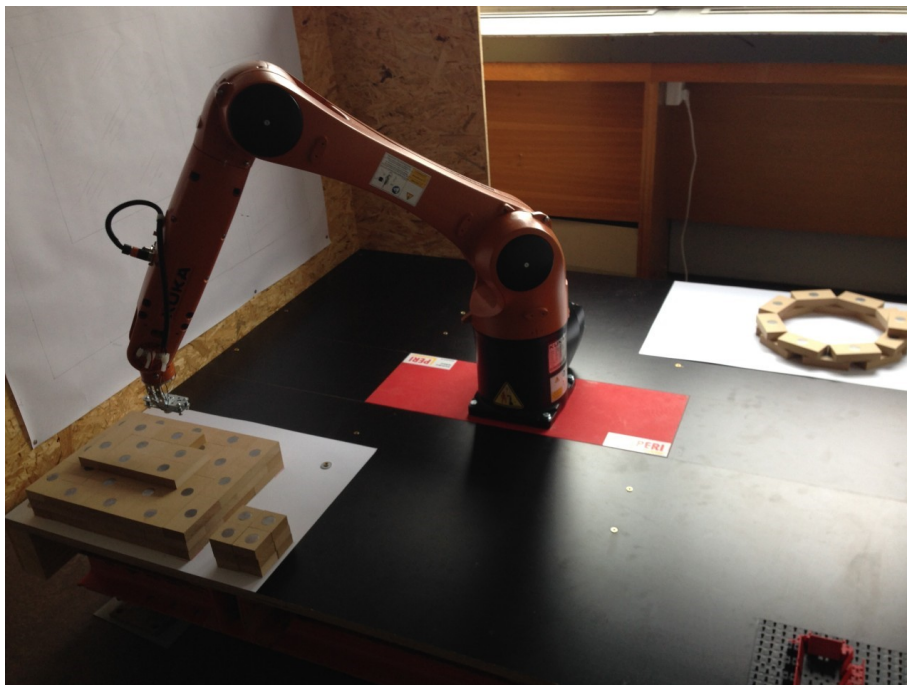
1.2.1.3. Modelování robotického zdícího systému

Robotickému zdění se věnuje i výzkumný tým Ing. Usmanova, PhD a Ing Šulce, PhD. na Katedře technologií Fakulty stavební ČVUT v Praze. Tento tým se zabývá vývojem systému průmyslového robota pro hrubou stavbu i dokončovací práce. Díky softwaru, který byl pro tyto účely vyvinut je možné převádět informace z modelu BIM (ve formátu IFC), ve kterém je stavba navržena, do softwaru KRC4, který je vyvinut firmou KUKA Robotics a který je určen pro ovládání robotické ruky. Formát IFC je všeobecný formát, který je podporován všemi databázemi BIM a díky

tomu je možné sdílet data z různých BIM platforem. Systém průmyslových robotů KUKA používá svůj vlastní operační systém KRL, který je založen na programovacím jazyku C++. Nakonec je použit konvertor, který je schopen převádět data z formátu obecného modelu IFC do formátu robotického systému KRL. [13]

Pro tvorbu pohybů robota bylo použito video stavebního dělníka, který zdi zed' a byla vytvořena ideální trajektorie při odebírání cihly z místa skladu a pokládání na určené místo. Pro uchopování cihel bylo použito elektromagnetu, který je buď zapnutý nebo vypnutý, v závislosti na pohybu a na stávající činnosti. Na povrchu poblíž robota je postavena malá železná destička, která umožňuje robotu kalibraci uchopení cihly. Po kalibraci uchopení materiálu položí robot cihlu na místo, které je předem určeno z výchozího 3 D BIM modelu. Pro zdění je použit stejný technologický postup, jako u zdění zedníkem, tedy začíná se zdít z rohu, cihly se provazují o půl cihly a v místě, kde je umístěn otvor, se proces zdění vynechá. [13]

V další fázi výzkumu by se tým chtěl zabývat výzkumem spojovacích materiálů, konkrétně použitím spojovací pěny, která by mohla být ekonomicky výhodnější než dnes používaná malta. [13]



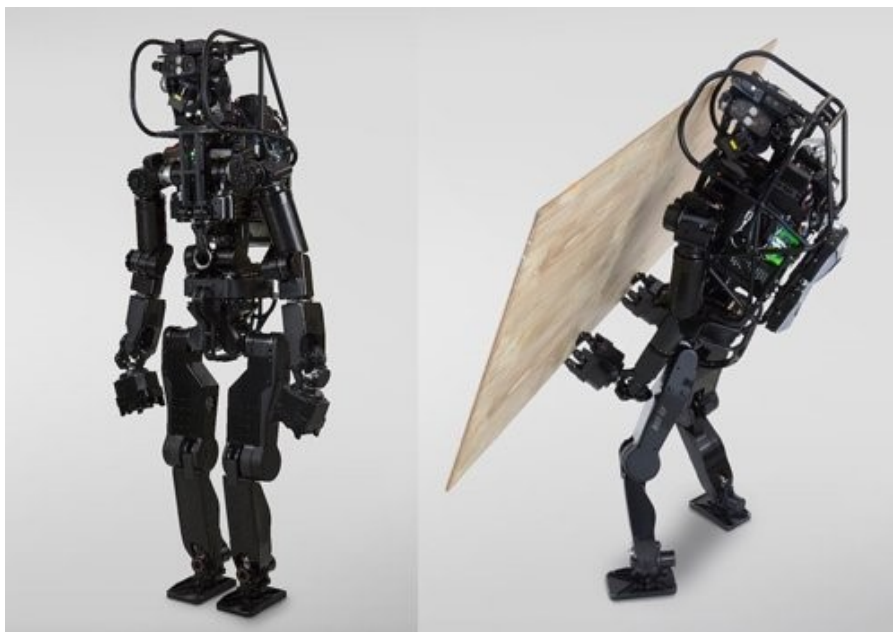
Obrázek 14 - Robotická ruka KUKA použitá pro výzkum na ČVUT v Praze [13]

1.2.2. Ostatní robotické technologie

1.2.2.1. HRP 5P

Humanoidní robot HRP-5P je vyvinutý japonskou společností AIST. Tento robot je schopný připevňovat SDK desky na určené místo. Robot měří 182 cm a váží 101 kg a je vhodný pro práci na místech, která jsou určena pro lidi. Celkem má v kloubech 37 stupňů volnosti (2 na krku, 3 v zápěstí, 8 na každé paži, 6 v každé noze, 2 na každé ruce). Výhodou robota je, že není omezován vlastnostmi lidského těla. V kloubech je schopen mnohem větších rozsahů pohybu než člověk, což mu umožňuje lepší řešení problémů. V kyčelním kloubu má robot rozsah až 202° (u člověka je to pouze 140°) a trup je schopen otočit až o 300° . Tento robot je schopen bez problémů zvednout sádrokartonovou desku o rozměrech $1820 \times 910 \times 10$ mm vážící 11 kg a upevnit ji na předem určené místo na stěně. Robot si dokáže vytvořit 3 D mapu okolí, a to mu umožňuje pohyb v prostoru. [19]

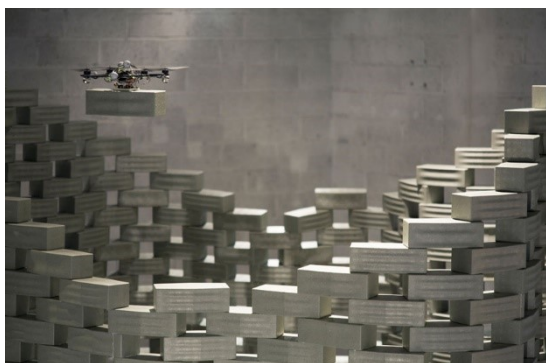
Tohoto robota by bylo možné použít pro zdění z větších stavebních dílců (tvárnic, prefabrikovaných dílců apod.). Při naprogramování na uchopení menších předmětů by bylo možné jej využít i pro zdění.



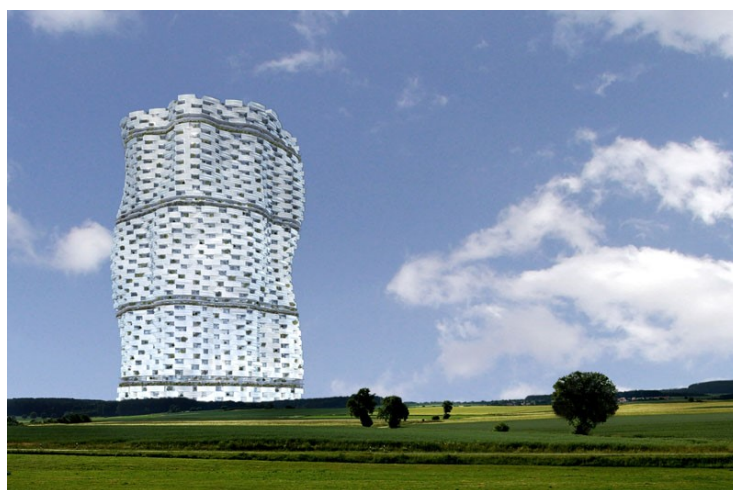
Obrázek 15 - Humanoidní robot HRP - 5P [19]

1.2.2.2. Flight Assembled Architecture

Projekt Flight Assembled Architecture vznikl ve spolupráci společnosti Gramazio & Kohler, která vytvořila architektonický návrh, Raffaella D'Andrea z university ETH Zurich, který vytvořil vizi robotického systému létajících dronů. Jedná se o první konstrukci vytvořenou drony bez zásahu lidské ruky. Flight Assembled Architecture se zakládá na přibližně 1500 modulů, které spolupracují na základě matematického algoritmu, jenž převádí digitální model do chování dronů. Cílem tohoto výzkumu je postavit vertikální vesnici cca 600 m vysokou, která bude sloužit pro 30 000 obyvatel. Pro výzkum technologií a funkčnosti způsobu stavby je použit model této vesnice v měřítku 1:100. [20]



Obrázek 16 - Zdění pomocí létajících dronů [20]



Obrázek 17 - Vizualizace výsledné stavby – výzkum ETH Zurich [20]

2. Praktická část

V dnešní době se začíná rozrůstat použití robotických technologií, které jsou v porovnání s lidskou prací přesnější, rychlejší a kladou menší nároky na bezpečnost práce (jako jsou přestávky, úrazy apod.). U montážních linek, kde se neustále opakuje jedna činnost a není zapotřebí řešit mnoho nenadálých problémů, je již toto použití běžné. Robotické technologie se již začínají objevovat i na stavbách, kde jsou pomocnými silami pro dělníky.

Po prozkoumání možných dostupných technologií autorka předpokládá, že je možné vytvořit autonomní robotickou sestavu, která bude schopná postavit klenbovou konstrukci. Při vyvíjení technologie je potřeba začínat na jednoduché stavbě, aby se prozkoumaly možnosti a schopnosti technologie. Proto je v práci řešena jednoduchá stavba kruhového půdorysu zastřešená kopulí. Cílem dalších výzkumů a pokroků této technologie by měla být kompaktní konstrukce podobná skořepině, která by se dala využít pro zastřešení zastávek, společenských prostor například v parcích nebo pro realizaci výstavních hal.



Obrázek 18 - Cíl dalšího vývoje [21]

2.1. Návrh a specifikace robota

Tato část práce se zabývá ilustračním návrhem podoby robota, který by byl vhodný pro stavbu stavby kruhového půdorysu, která je zaklenutá kopulí, jeho pracovního nástroje (robotické ruky), podvozku, pohonu a dopravníku materiálu. Po průzkumu nabídky trhu a způsobu využití robotů pro stavební účely ve světě, které jsou popisovány na předchozích stranách, byly autorkou pro účely práce a pro představu podoby výsledného stroje použity parametry technologií, které jsou uvedeny na trh od společností KUKA (robotická ruka) a Catterpillar (podvozek).

2.1.1. Návrh pracovního nástroje – Robotické ruky

Základním pracovním nástrojem robotického zdícího systému by měla být robotická ruka s koncovým nástavcem určeným pro uchopení stavebního materiálu (tzv. gripper). Autorka práce pro představu dimenzí robota vybrala robotickou ruku KUKA CYBERTECH ARC. Maximální nosnost ruky je 8 kg, dosah ruky činí 2101 mm a hmotnost robotické ruky je 255 kg. [22]



Obrázek 19 - Robotická ruka KUKA CYBERTECH ARC [22]

Existuje i možnost výběru menší ruky KUKA KR Agilus. Tato ruka nebyla zvolena pro svůj malý dosah, který je max. 1,1 m. Vzhledem k tomu, že pro potřeby této práce byla zvolena stavba s průměrem 5 metrů, je dosah této menší ruky příliš malý, tuto ruku by bylo možné použít pro stavby menších rozměrů. [15]

2.1.2. Výběr vhodného typu podvozku

Pro návrh robota je dále nutné vybrat ideální typ podvozku, který musí zajistit optimální pohyb stroje po staveništi v různých klimatických podmínkách a dostatečnou stabilitu při práci. Zároveň je nutné, aby podvozek příliš nezvyšoval výslednou hmotnost celého stroje a s ohledem na konečnou cenu robota nebyl příliš náročný na výrobu. Stroj bude pracovat v obtížných terénních podmínkách staveniště a tím pádem musí být podvozek odolný vůči znečištění. Zároveň musí být stroj schopný manévrovat na omezeném prostoru. [23]

Při práci působí na podvozek nežádoucí venkovní síly, které vyvolávají destabilizační klopný moment M_k . Pro stabilitu stroje musí platit, že moment stabilizační M_s , který je vyvolaný vlastní hmotností stroje a protizávažím, je větší než moment klopný M_k (viz kapitola Výpočet minimální hmotnosti podvozku). Pro zvýšení stability stroje se na stroj umisťují opěry, které lze snadno ovládat. [23]

2.1.2.1. Obecné požadavky na podvozek [23]

1. Stabilita stroje
2. Dovolené měrné tlaky na podložku
3. Manévrovatelnost
4. Přesnost přemístění
5. Pracovní přesnost
6. Brždění
7. Pracovní a transportní rychlost

2.1.2.2. Typy podvozků

Kolový podvozek

Kolový podvozek je vhodný v případech, kdy je vyžadována vysoká pohyblivost a časté přemístění stroje. Kolový podvozek tvoří asi 20 % celkové hmotnosti stroje. Vzhledem k malé ploše třecích částí mají kolové podvozky větší životnost než podvozky pásové. Dosahují přepravní rychlosti až 35 km/h a vykazují menší náklady na dopravu než podvozky pásové, jelikož se mohou přemísťovat po komunikacích samostatně bez podvalníků. [23]

Pásový podvozek

U pásového podvozku se hmotnost stroje rozkládá na velké ploše. To umožňuje větší pojezdové síly než u kolových podvozků. Stroje s pásovým podvozkem jsou stabilnější, lépe se vyrovnají s náročným terénem (jsou vhodné i pro měkká podloží) a jsou schopny stoupat v terénu s vyšším stoupáním. [23]

Pásový podvozek tvoří 30 % - 40 % celkové hmotnosti stroje. V důsledku velké pojezdové plochy, na kterou působí třecí síla má tento podvozek přibližně poloviční životnost podvozku kolového. Z toho důvodu jsou náklady na údržbu a opravy těchto zařízení vyšší. Také pořizovací náklady jsou výrazně vyšší než pro kolový podvozek. Vyšší náklady jsou kladeny také na dopravu. Vzhledem k tomu, že pásový podvozek by svou konstrukcí ničil komunikace, je nutné jej převážet na valníku. [23]

Kráčivý podvozek

Kráčivý podvozek má 4 kloubově uložená ramena, z toho 2 ramena mají na koncích osazené pneumatiky a druhá 2 ramena mají na koncích uložené opěry. Každá noha je samostatně ovládaná mechanicky nebo hydraulicky. [24]

Způsoby kráčení jsou plíživý (překonává třecí účinek podložky a střední desky ve směru pohybu) a kráčivý (má možnost odlehčit střední desku). Kráčivé podvozky se používají hlavně v náročných terénech při sklonu svahu vyšším než 60°. [23]

Kolejový podvozek

Kolejové podvozky se používají pro velké a těžké stroje pro povrchové dobývání (např. u korečkového rypadla). U takových vozidel se nepoužívá standardní železniční podvozek, ale podvozek na principu vahadel. Výhodou tohoto podvozku je, že dokáže značnou hmotnost stroje přenést do velké plochy. [23]

2.1.2.3. Výběr podvozků pomocí vícekriteriální analýzy

Hodnotící parametry

1. Doprava na staveniště

Vzhledem k parametrům navrhovaného robota, který je autonomní bude nutné v každém případě stroj naložit na valník a dopravit na staveniště. Pokud se autonomní řízení v budoucnosti zdokonalí natolik, že bude možné do běžného provozu zapojit i autonomní jednotky, bude možné uvažovat samostatnou dopravu robota na staveniště. Hodnocena je tak schopnost stroje se samostatně pohybovat po místních komunikacích (zda bude stroj schopen se na místo dopravit sám nebo jej bude nutné naložit na valník).

Dále je v tomto parametru uvažována náročnost na nakládku a vykládku stroje. Jedná se o to, zda robot na daném podvozku dokáže sám najet na valník a následně sjet z valníku nebo bude nutné použít nakládacího stroje. Je také uvažována náročnost připravenosti staveniště před uvedením stroje do provozu (například pro kolejové podvozky je nutné připravit koleje, aby se stroj mohl pohybovat).

2. Stabilita

Vzhledem k tomu, že se jedná o stavebního robota, u kterého je vyžadována vysoká přesnost práce, je jeho stabilita velmi důležitá k funkčnosti technologie. V tomto bodu je hodnocena stabilita stroje při práci, jeho náchylnost na překlápění. Dále se hodnotí, jak je daný podvozek schopen reagovat na nerovnosti terénu, aby při malé nerovnosti terénu stavby nedošlo k vychýlení stroje ze své pracovní osy, což by mohlo vést až ke kolapsu vyzdívané konstrukce.

3. Manévrovatelnost

Manévrovatelnost na malém prostoru je pro tento projekt zcela zásadním parametrem. Vzhledem k tomu, že bude robot stavbu zdít zevnitř, je potřeba, aby byl schopen se na co nejmenším prostoru otočit nebo přesunout, aniž by poničil již vyzděné části stavby.

4. Hmotnost

Hmotnost podvozků je důležitá pro celkovou stabilitu stroje. Robotická ruka bude na stroji vytvářet významné rameno síly. Je tedy nutné, aby moment, který vznikne od sil působících od stavebního materiálu a vlastní hmotnosti ruky, byl zachycen protiváhou v podobě podvozků. Pokud k takovému zachycení

nedojde nebo není možné jej učinit, je nutné uvažovat se stabilizačními rameny. Také je pomýšleno na vliv celkové hmotnosti na stabilitu stroje v závislosti na únosnosti podloží. Při větší hmotnosti robota je nutné, aby měl podvozek dostatečnou plochu, kterou bude přenášet zatížení do podloží.

5. Rychlost

Tento bod hodnotí možnosti přepravní a pracovní rychlosti jednotlivých podvozků. Přepravní rychlost pro potřeby výstavby, a tedy pro hodnocení daného podvozku není příliš důležitá. Pracovní rychlost, na druhé straně, už je velmi důležitá, protože na této rychlosti závisí celý pracovní proces (rychlost dopravních vozíků na materiál, rychlost nakládky materiálu, rychlost umíchání malty).

6. Přípravenost staveniště

Každý typ podvozku vyžaduje jiné podmínky pro provoz na staveništi. Tento parametr zhodnocuje, jaká je náročnost přípravy staveniště pro provoz stroje po staveništi. Zda je nutná speciální příprava staveniště pro daný podvozek (např. rozmístění kolejí), jaká je vyžadovaná rovinnost komunikací staveniště, jak se daný podvozek vyrovná s výkopovou rampou.

7. Provozní náklady

Posledním hodnotícím bodem jsou provozní náklady. Některé podvozky jsou téměř bezúdržbové, některé potřebují větší péči. Náklady na pořízení, údržbu, opravy a celkový provoz stroje mohou velmi ovlivnit výběr.

Vícekriteriální analýza

Pro vyhodnocování vhodnosti podvozku pomocí vícekriteriální analýzy byly zvoleny hodnoty váhy pro jednotlivé parametry od 1 do 5 s tím, že hodnota 5 udává nejdůležitější parametr. Pro hodnocení splnění kritérií vybraných parametrů jednotlivými typy podvozků byla zvolena bodová stupnice od 1 do 4, kde hodnota 4 určuje podvozek, který nejlépe vyhovuje danému parametru.

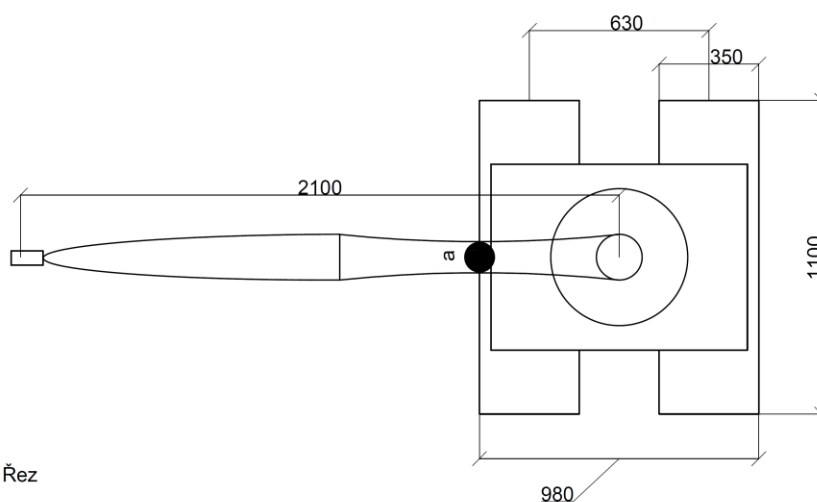
Tabulka 1 - Vícekriteriální analýza pro výběr vhodného typu podvozku

Parametr	Váha	Kolový	Pásový	Kráčivý	Kolejový
Doprava na staveniště	1	4	2	2	2
Stabilita	4	1	4	2	2
Manévrovatelnost	5	3	4	2	1
Hmotnost	3	4	1	3	2
Rychlost	3	4	3	1	3
Přípravenost staveniště	2	3	4	4	1
Provozní náklady	3	4	3	2	1
Výsledné hodnocení podvozku		65	67	46	35

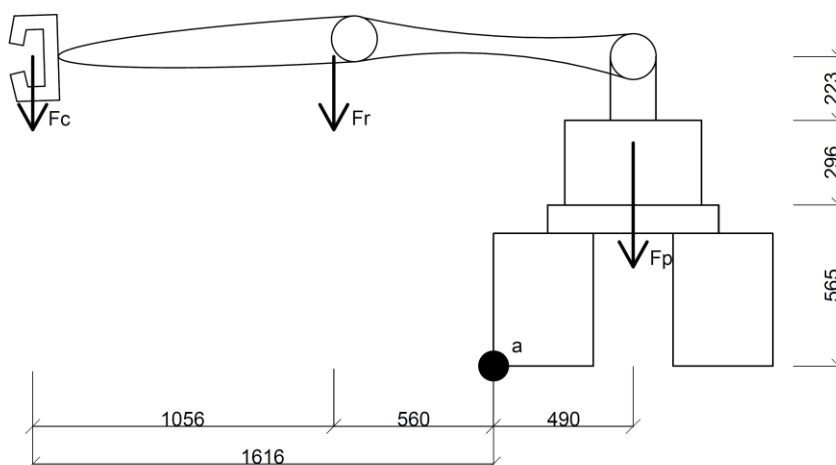
2.1.2.4. Výpočet minimální hmotnosti podvozku

Pro vybraný pásový podvozek byl autorkou proveden zjednodušený výpočet minimální hmotnosti podvozku, který vychází z momentové rovnováhy vůči určenému bodu klopení a (viz. Obrázek 20). Síly působící destabilizačním účinkem jsou síly na rameni robotické ruky. Stabilizační účinky pak má síla, která působí v těžišti podvozku a je vypočtena z vlastní tíhy podvozku. Pro zajištění dynamických účinků při práci robota bude pro výpočet použit součinitel $d = 1,5$.

Půdorys



Řez



Obrázek 20 - Schéma vyjadřující působení sil na robota

Vyjádření momentů působících na bod klopení (a):

$$M_1 = d \times (F_c \times r_1 + F_r \times r_2)$$

$$M_2 = F_p \times r_3$$

$$M_1 \leq M_2$$

kde: d = dynamický součinitel

F_c = síla, kterou působí cihla

r_1 = rameno F_c

F_r = síla od působení ruky

r_2 = rameno působení síly F_r

F_p = síla, která působí v těžišti podvozku

r_3 = rameno působení síly F_p

Rovnovážná momentová rovnice:

$$d \times (F_c \times r_1 + F_r \times r_2) = F_p \times r_3$$

Vyjádření síly F_p :

$$F_p = \frac{d \times (F_c \times r_1 + F_r \times r_2)}{r_3}$$

Dosazení hodnot: $d = 1,5$

$F_c = 50 \text{ N} = 0,05 \text{ kN}$

$r_1 = 1,616 \text{ m}$

$F_r = 5355 \text{ N} = 5,355 \text{ kN}$

$r_2 = 0,56 \text{ m}$

$F_p = x \text{ kN}$

$r_3 = 0,49 \text{ m}$

$$F_p = \frac{1,5 \times (0,05 \times 1,616 + 5,355 \times 0,56)}{0,49}$$

$$F_p = 9,360 \text{ kN} = 9360 \text{ N}$$

Pokud platí, že:

$$F_p = m_p \times g$$

$$m_p = \frac{F_p}{g}$$

kde: m_p = hmotnost podvozku

g = tíhové zrychlení

tak po dosazení hodnot: $F_p = 9360 \text{ N}$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$m_p = \frac{9360}{10}$$

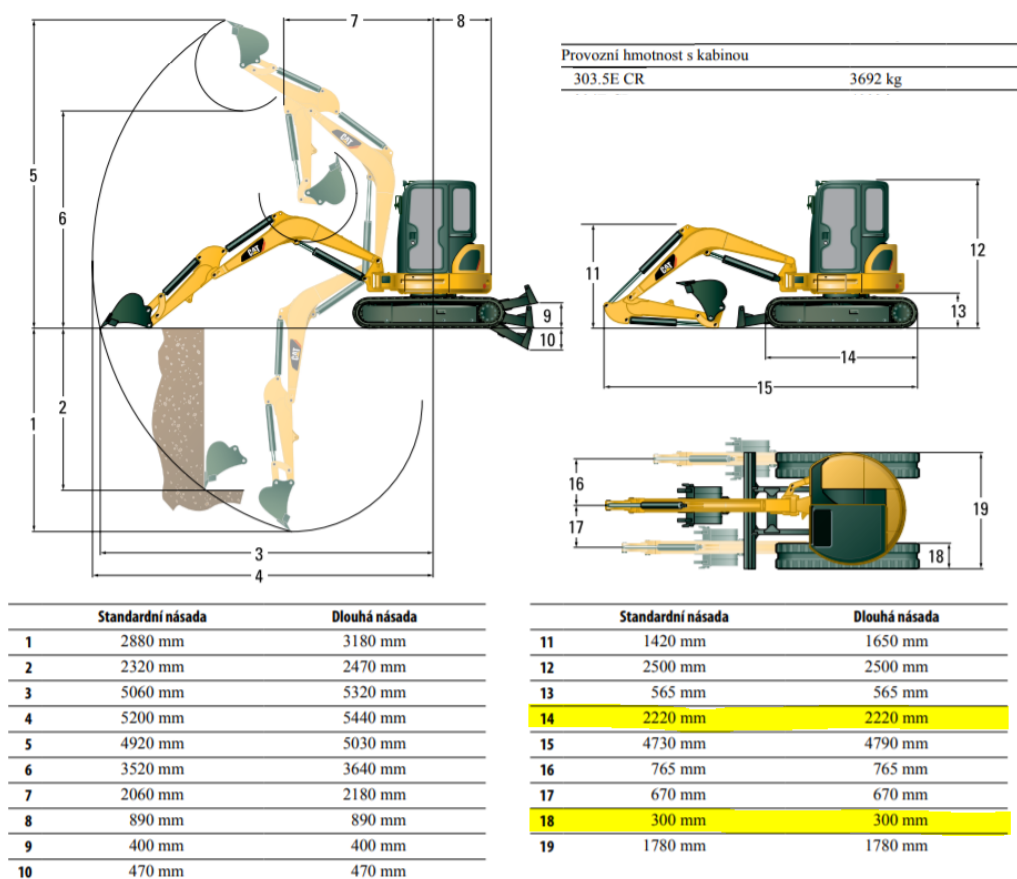
$$m_p = 936 \text{ kg}$$

Z výpočtu vychází, že minimální hmotnost podvozku, aby byla vyrovnána stabilita, je 936 kilogramů.

2.1.3. Specifikace podvozku robota

Vícekritériální analýzou byl vybrán pásový podvozek. Z výpočtu rovnováhy vychází minimální hmotnost podvozku robota 936 kg.

Hmotnost pásového podvozku tvoří 40 – 60 % celkové hmotnosti stroje [23]. Pro návrh přibližných parametrů stroje byly použity parametry stavebních strojů CATERPILLAR, konkrétně rypadel. Podvozek byl vybírán podle parametru hmotnosti. Nejlépe podmínku rovnováhy splnilo rypadlo CAT 303.5E CR. Tento stroj má hmotnost 3690 kg. Je uvažováno, že hmotnost podvozku je 40 % celkové hmotnosti stroje. V takovém případě je hmotnost podvozku 1476 kg. [25]

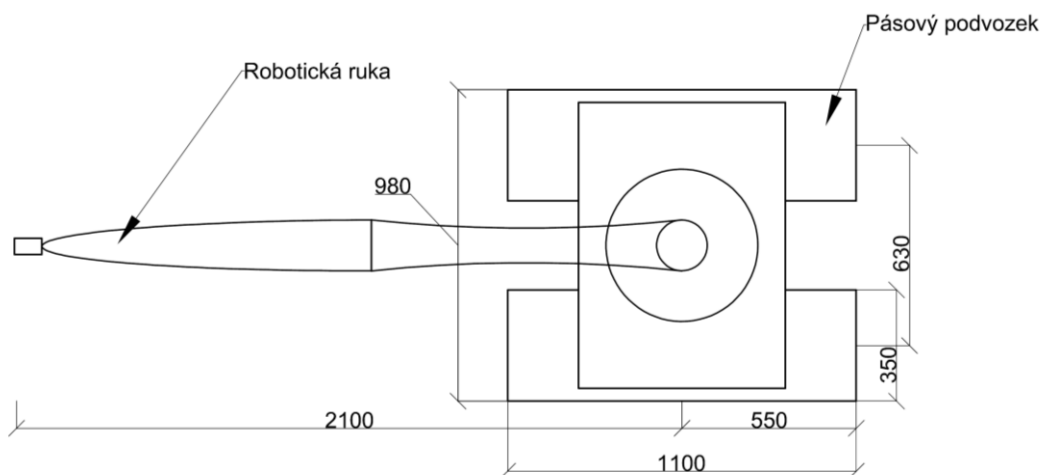


Obrázek 21 - Parametry zvoleného rypadla z technického listu [25]

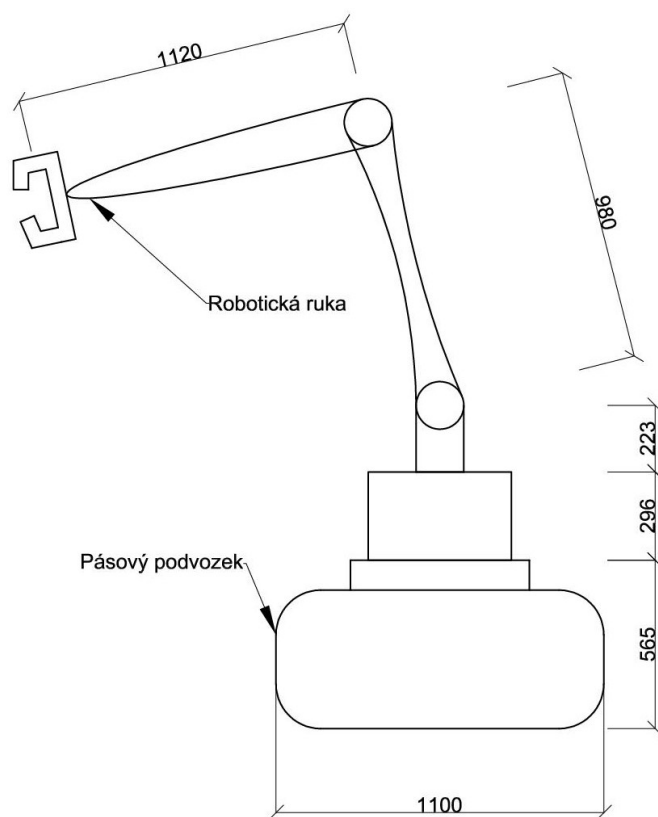
Hmotnost podvozku je dostačující, jeho rozměry jsou však pro velikost stavby příliš velké. Vzhledem k velké rezervě v hmotnosti je autorkou usuzováno, že lze pásy podvozku zkrátit o 1 m.

S ohledem na menší dosahu navržené robotické zdící ruky bude pro realizaci referenční stavby nutné použití hydraulického zvedacího zařízení, aby bylo možné

zdění v potřebném rozsahu. Toto zařízení zvýší celkovou hmotnost stroje a přispěje ke stabilizaci celého stroje. Pokud by stále nebylo dosaženo potřebné hmotnosti, aby došlo k vyvážení destabilizačních momentů působících z ramene ruky, bude nutné podvozek opatřit závažím, popřípadě stabilizačními rameny.



Obrázek 22 - Schematický půdorys robota



Obrázek 23 - Schematický boční pohled na robota



Obrázek 24 - Vizualizace robota vytvořená na základě náčrtů Ing. J. Kubešem

2.1.4. Návrh autonomního dopravníku materiálu

Autonomní dopravník materiálu bude vycházet z funkce vysokozdvizného vozíku a bude schopen pomocí vysokozdvizných ližin nabrat paletu s cihlami. Vozík bude mít terénní kola, aby se dobře vypořádával s terénem na staveništi. Pro robota je navržen pásový podvozek, u vozíku není nutná tak vysoká stabilita a přesnost pohybu jako u robota, proto je možné, aby se pohyboval na kolech. Dalším důvodem pro návrh kolového podvozku dopravníku materiálu je možnost připojení dopravníku za robota a jeho následné tažení za robotem. Pro připojení dopravníku na robota je navržen bajonetový uzávěr.

Dopravník bude vybaven zásobníkem na maltu, který pojme množství malty na jeden záběr včetně rezervy. Malta bude připravována v kontinuální míchačce, která bude napojena na silo, kde se bude skladovat materiál. Další možností by bylo v kontejneru dopravníku zabudovat malé nádoby na materiál potřebný pro umíchání

malty na jeden záběr a malou míchačku. Materiál by se do míchačky dávkoval po částech a vždy by se umíchala malta na část záběru.

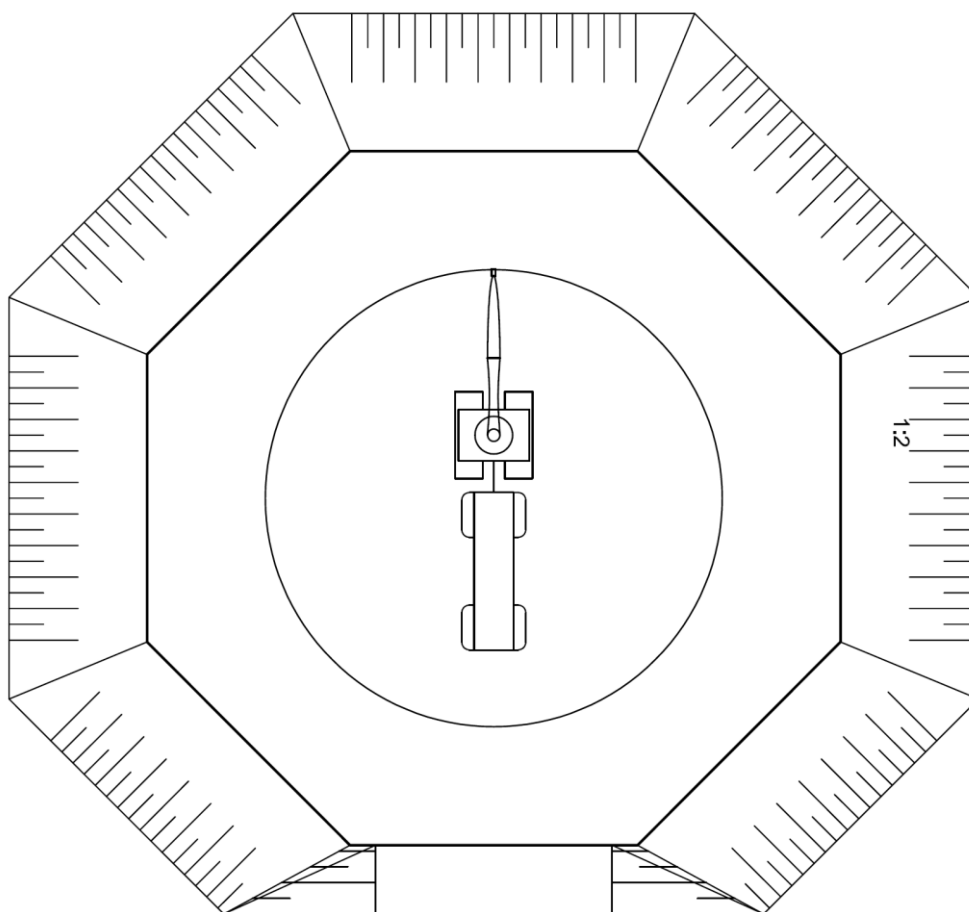
2.1.5. Pohon stavebního robota a dopravníku materiálu

Obě zařízení budou poháněna elektromotorem, bude tedy nutné mít na stavbě odpovídající zdroj elektrické energie. Teoreticky je možné, aby byl robot trvale připojen k síti napájecím kabelem. Nevýhodou tohoto řešení je omezenost pohybu. Ideálním řešením je tedy zajištění přívodu energie pomocí baterie. Kapacita baterie se bude odvíjet od výkonu motoru, od předpokládané doby provozu na jedno nabití a aktuálního vývoje technologie baterií.

Pokud nebude výdrž baterie robota dostačující, nabízí se několik možností, jak tuto situaci vyřešit. První možností je navýšení kapacity baterie dopravníku a po připojení dopravníku ke stavebnímu robotovi z baterie v dopravníku nabíjet baterii robota. Další možností je vyměnitelná baterie. V případě nízkého stavu baterie robot vyše informaci, přeruší se provoz a provozní technik vymění baterii (pokud to bude technicky možné). Bylo by také možné vyvinout technologii autonomní výměny baterie pomocí dopravníku nebo jiné technologie. Jednou z možností by mohlo být to, že robotická ruka i podvozek budou poháněné každý z vlastní baterie. Tím by se dala zvýšit doba práce na jednu kapacitu baterie.

2.2. Specifikace stavby

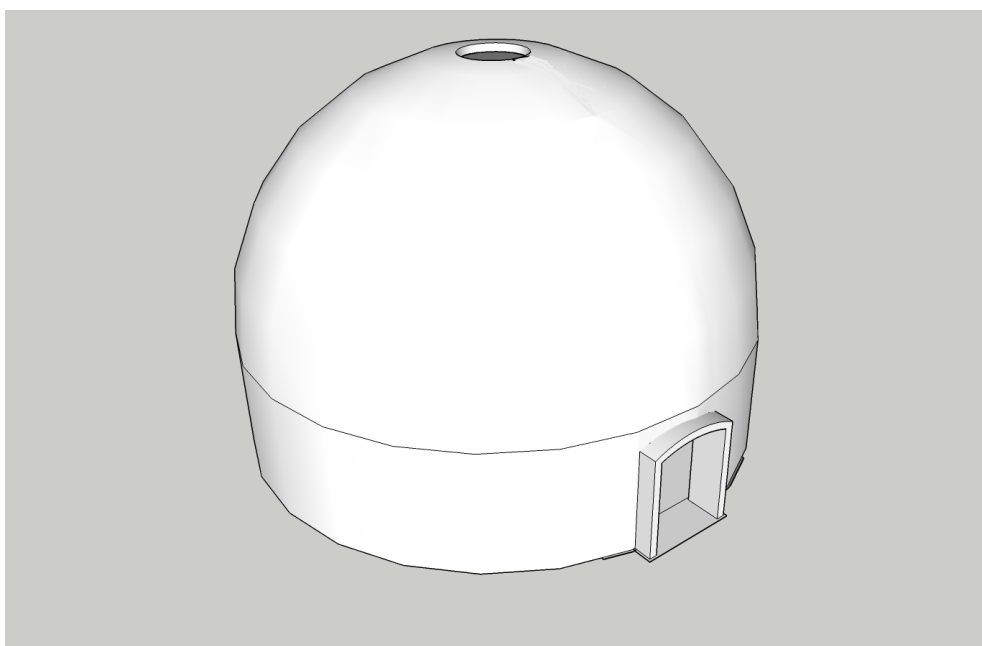
První variantou návrhu stavby, která by sloužila jako námět pro vytvoření technologického postupu pro robotickou stavbu, byla kopule o poloměru 3 m. Po návrhu a umístění robota na místo stavby bylo usouzeno, že pro stavbu takové velikosti není vhodné použití této velikosti robota. Pracovní strojní sestava by v místě stavby neměla dostatečný prostor na práci. Pro stavbu takové velikosti by bylo vhodnější použití pouze robotické ruky s dosahem 3 m, která by se umístila na otočnou základnu do středu stavby, v takovém případě by nebylo nutné použití podvozku. Nevýhodou takové varianty by byla nutnost vytvoření základu pro umístění robotické ruky. Z těchto důvodů byla pro účely této práce stavba změněna, poloměr půdorysu se zvýšil o 2 m a kopule je postavena na zdi výšky 2,4 m.



Obrázek 25 - Původní návrh stavby

Jedná se tedy o stavbu kruhového půdorysu zaklenutou sférickou klenbou. Stavba je částečně pod zemí. Obvodové zdi budou zděny z plných pálených cihel

do výšky 2,4 m. Poloměr půdorysného rozměru je 5 m. Poloměr klenebního oblouku je též 5 m. Stavba bude zděná z cihel na vápenocementovou maltu. Nejdříve se zhotoví obvodové zdivo. Na obvodové zdivo se provede hydroizolace a pak se stavba částečně zasype zeminou, aby se zachytily účinky vodorovných sil při vyzdívání klenby. Celkový objem zdiva pro realizaci stavby je 173,23 m³, bude potřeba přibližně 55 000 cihel. Vrchlík klenby nebude proveden z cihel, ale z prefabrikovaného kusu s prosklením. Toto prosklení bude také zajišťovat denní osvětlení v místnosti.



Obrázek 26 - Model stavby

2.3. Technologický postup

2.3.1. Přípravenost staveniště

Staveniště bude opatřeno staveništní komunikací, buňkami, které budou určeny pro obsluhu robota a kontrolní techniky. Staveniště bude oploceno neprůhledným plotem výšky min. 180 cm. Tento plot bude osazen bránou, která umožní vjezd automobilům a strojům, a vstupem pro pěší osoby. U brány bude osazena vrátnice, kde se bude nacházet vrátný a ostraha. Vrátný bude na vrátnici po celou pracovní dobu. Po skončení pracovní doby zůstane na vrátnici pouze ostraha staveniště. Toto opatření musí zamezit vstupu nepovolaných osob do prostor staveniště. Bude připravena skládka materiálu a silo pro skladování materiálu na maltu. Rovněž zde bude vyhrazen i prostor pro uložení odpadu. Prostor staveniště bude dostatečně osvětlen. Před zahájením stavebních prací budou provedeny všechny potřebné přípojky (voda, elektřina, kanalizace).

Před příjezdem robota musí být skrytá ornice a hotové veškeré výkopové práce. Příjezdová rampa do stavební jámy nesmí mít větší sklon než 15°. Rampa by měla být osazena protiskluznými zářkami pro umožnění vstupu fyzické osoby do jámy. Dále musí být dokončeny základové konstrukce (základové pasy) a pracoviště musí být vyklizeno. V jámě nesmí zůstat žádné překážky (např. přebytečné nářadí), které by mohly přerušit nebo znemožnit práci robota. Tyto požadavky připravenosti budou kontrolovány před převzetím staveniště a před dopravením robotických systémů na stavbu. Pokud nebude splněn jakýkoliv požadavek, bude vyžadována okamžitá náprava.

2.3.2. Skladování materiálu

Skládka materiálu bude provedena z betonových panelů o rozměru 3 m x 1 m, rozměry skládky materiálu jsou 7 m x 9 m. Doprava materiálu na místo stavby bude zajištěna pomocí nákladních automobilů s hydraulickou rukou, aby bylo možné materiál vyložit.

Cihly pro zdění klenby se budou skladovat na paletách na vyhrazené skládce a budou kryty vhodným materiálem, aby byly chráněny před povětrnostními vlivy. Je možné pro potřebu skladování vybudovat krytý sklad. Pro stavbu je potřeba

přibližně 55 000 cihel. Cihly budou vyrovnané na palety v množství potřebném k 1 záběru. Toto bude domluveno s dodavatelem, který cihly v potřebném množství vyrovná již při ukládání na paletu a ulehčí tak pozdější manipulaci na staveništi. Materiál pro přípravu malty pro zdění se bude skladovat v tříkomorovém silu, aby bylo zajištěno vhodné, suché a chráněné skladování sypkých hmot, voda bude přiváděna hadicí. Přibližné množství malty potřebné pro tuto stavbu je 16 m^3 (množství materiálu je vypočítáno pouze přibližně, pro stavbu je potřeba počítat s rezervou, aby bylo možné kompenzovat případné ztráty). Před převzetím materiálu stavbou je potřeba zkontrolovat, zda byl na stavbu dovezen materiál odpovídající objednávkce a zda je odpovídající i kvalita. Provede se vizuální kontrola cihelných bloků, zda při přepravě nedošlo k jejich poškození. Pokud by se během těchto kontrol objevila nějaká vada, není možné materiál převzít a převezme se pouze ta část, která bude odpovídat požadavkům stavby. Povinností dodavatele materiálu je dodání příslušných certifikátů a osvědčení o shodě CE a bezpečnostní listy, které odpovídají normám.

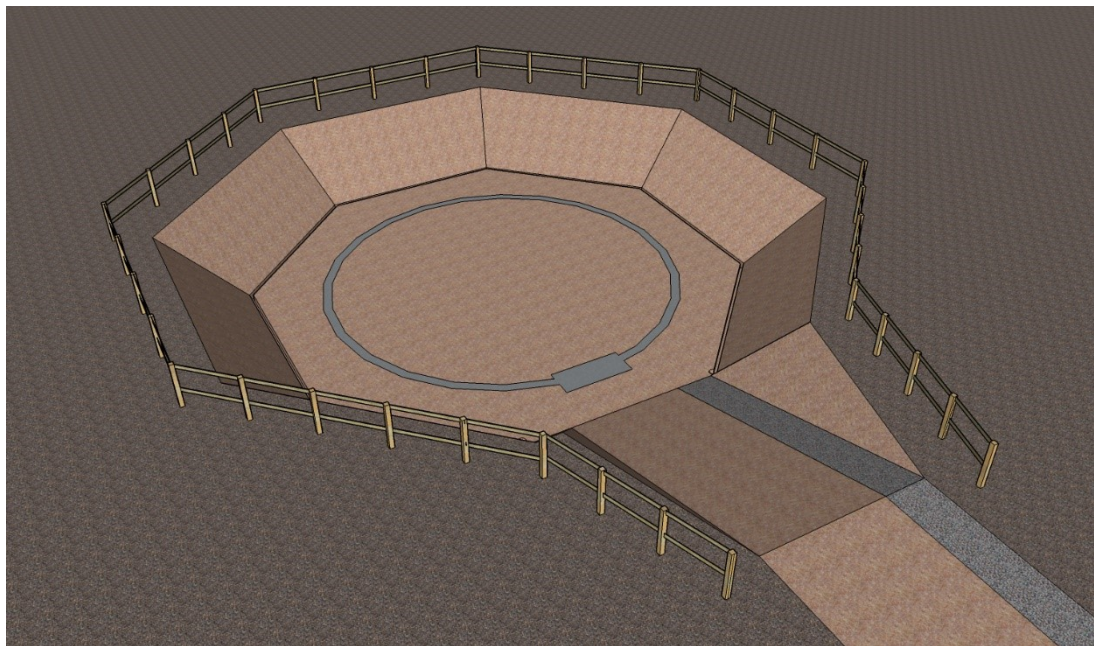
Materiál pro robota bude na místo práce dovážen pomocí modifikovaného vysokozdvizného vozíku. Návrh a popis tohoto vozíku je zpracován v předchozích kapitolách. Dopravníky materiálu pro stavbu jsou plánovány min. 2 ks. Aby nedocházelo k prostojům stavby, je třeba, aby se jeden plný vozík napojil na zdícího robota a druhý se v tomtéž čase plnil materiálem a po dokončení záběru se tyto vozíky prostřídají. V takovém případě nebude docházet k časovým prodlevám z důvodu nutnosti doplnění vozíku. Cihly na paletě musí být srovnány podle správného pořadí, aby zdící robot poznal, jaký dílec odebírá a kam ho má položit. Robot bude provádět kontrolu dílce pomocí laserového snímače. Další možností kontroly uchycení dílce by byla kalibrace pomocí plechové destičky, která je popsána v kapitole „*Modelování robotického zdícího systému*.“ Je nutné mít na stavbě minimálně jeden záložní vozík, aby bylo možné v případě poruchy okamžitě jeden vozík nahradit. Počet vozíků závisí na rychlosti výstavby a na vzdálenosti skladu materiálu od stavby. Vzhledem k tomu, že se ze skládky budou cihly odebírat strojně, je teoreticky možné palety navržit do libovolné výšky, s respektováním pokynů výrobce cihel. S ohledem na dosah zásobovacího vozíku by bylo vhodné udržovat maximálně 2 palety na sobě. U skladu materiálu se bude nacházet dobíjecí stanice pro dopravníky materiálu a náhradní baterie pro robota.

2.3.3. Pracovní postup

Před započítím vlastní stavby je nutné převést informace o stavbě z 3 D modelu do strojového kódu robota, tedy vytvořit kladečský plán pro robota, který určí pohyby, orientaci a příkazy pro pracovní koncovku robotické ruky. Tento převod je možné učinit např. pomocí programu, který vzniká v rámci vývoje robotického zdění na Katedře technologie Fakulty stavební ČVUT v Praze, jenž je popsán v kapitole „Modelování robotického zdícího systému“, nebo vyvinout nový program, který bude pracovat na podobném principu. Po provedení kontroly připravenosti staveniště všechny osoby vyklidí pracovní prostor autonomních robotických zařízení. Pověřený provozní technik zařízení provede kontrolu vyklizení staveniště a kontrolu provedení výkopu, zda je správně provedeno spádování stěn, aby nedošlo k zavalení robota.

Stroje a zařízení pro výstavbu, pracovní pomůcky

- Robot pro zdění
- Autonomní dopravník materiálu
- Míchačka malty



Obrázek 27 - Model připravenosti staveniště

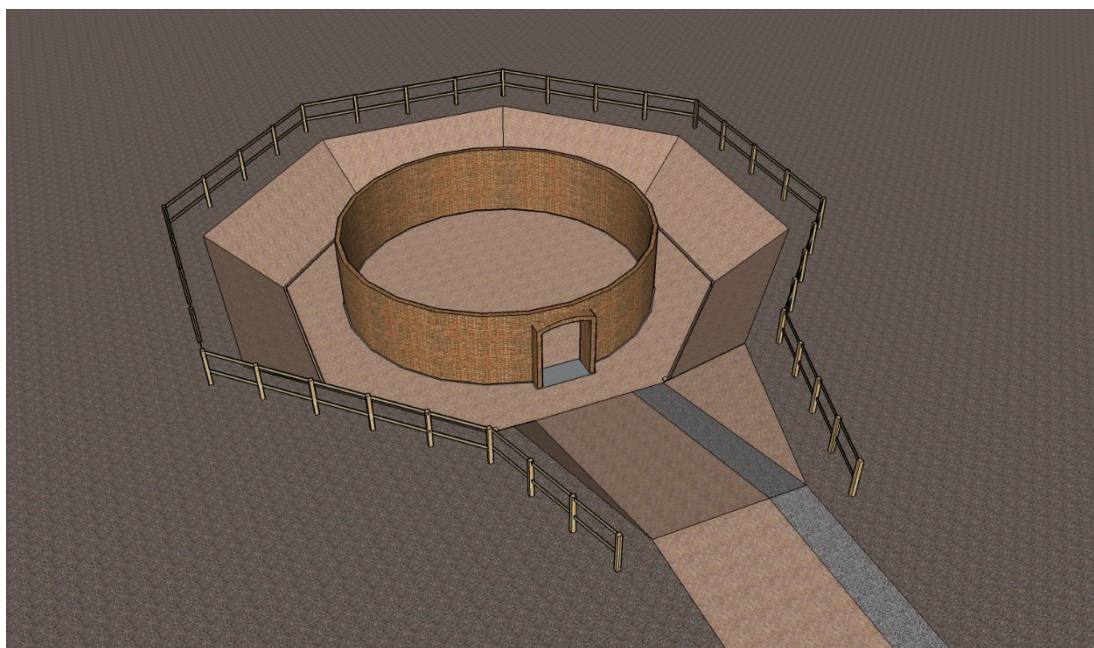
Robot, který je již připraven k provozu se dopraví na místo stavby a připraví se do výchozí pracovní pozice. Provozní technik pomocí trigonometrických informací nebo pomocí polohových senzorů a pomocí zaměřovacích kamer provede kontrolu postavení robota. Z důvodu nutnosti manuální přípravy palety před naložením dopravníkem materiálu, během které určený pracovník odstraní obalové materiály, bude skladiště materiálu odděleno od zbývajících prostoru vyhrazeného pro pohyb robotů pomocí softwarové zábrany. Před vstupem do prostoru skladu materiálu pracovník aktivuje naprogramovanou zábranu a tím řídicí systém zabráni vjezdu dopravníků do tohoto prostoru. Po opuštění prostoru pracovníkem dojde k deaktivaci omezení pohybu autonomních dopravníků a dopravník může naložit připravenou paletu cihel. Teoreticky je možné při odstranění obalového materiálu ještě danou paletu označit RFID čipem pro usnadnění výběru správné palety.

Po připravení palet se začne plnit první dopravník (pro účel práce označen jako dopravník A) materiálem do zásobníků. Ve chvíli, kdy technik zkontroluje výchozí pozici robota a neobjeví žádnou chybu v postavení, dopravník A nabere paletu s cihlami a dopraví se na určenou pozici za robota. Proces míchání malty, který probíhá i během transportu dopravníku, musí být zahájen v dostatečném časovém předstihu, aby v době napojení dopravníku na robota byla malta připravena. Dopravník se na robota napojí pomocí bajonetového uzávěru. Otočením uzávěru se spustí spínač a začne pracovní proces zdění.

Robotická ruka z palety odebere první cihlu, nanese vrstvu malty a položí ji na určené místo. Kalibrace uchopení cihly bude řešena buď pomocí laserového snímače nebo pomocí kalibrační destičky, která je popsána v kapitole „Modelování robotického zdícího systému“. Provedená spára bude mít kónický tvar, aby se vyrovnala geometrie cihel vzhledem ke kruhovému půdorysu. Tento proces se opakuje, dokud se nevyprázdní paleta cihel a zásobník malty, v tu chvíli je hotov první záběr. Bajonetový uzávěr se otočí do pozice pro vypojení, tím se přeruší pracovní proces robotické ruky a ta se zastaví. Dopravník odjede ke skladu staveniště, kde na určeném místě odloží prázdnou paletu a dále pokračuje pro novou nakládku materiálu. Po dokončení prvního záběru se přeruší pracovní proces robota a zásobovacího dopravního prostředku a kontrolní osobou bude zkontrolována kvalita provedení prvního záběru. Pokud bude záběr kvalitně proveden, vyklidí kontrolor pracovní prostor robotů, obnoví pracovní

proces a ten se až do dokončení etapy nebude přerušovat. Robot se posune do pozice druhého záběru, připojí se druhý vozík s materiálem, a opakuje se proces zdění. Kontrolní osoba sleduje proces zdění z bezpečného pracoviště pomocí zaměřovacích kamer, které má robot zabudované. Pokud pracovník zpozoruje chybu ve zdícím procesu, okamžitě přeruší práci robotů a provede vizuální osobní kontrolu ve výkopu. Pokud nebude zjištěn problém, vrátí se na bezpečné pracoviště a spustí znovu robotický proces. Pokud bude detekován problém, např. chyba zdění, je nutné okamžitě zjistit příčinu problému (např. z datových informací vysílaných robotem) a v co nejkratší době ji odstranit.

Tyto procesy se pravidelně opakují až do dokončení svislých stěn. Nastane-li potřeba pùlení cihel, robot tuto akci provede pomocí zabudované kotoučové pily. Po dokončení etapy svislých stěn se přeruší práce autonomních robotických zařízení a provede se kontrola provedení. Pokud se objeví nedostatky, je nutné je odstranit.

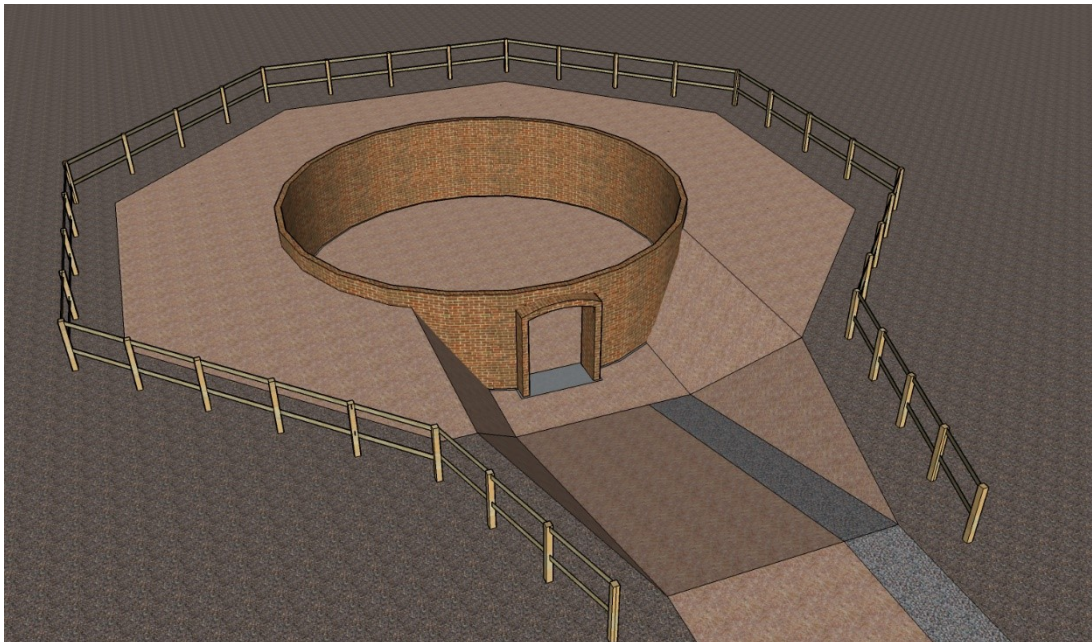


Obrázek 28 - Dokončení svislých konstrukcí

Po případném odstranění nedostatků konstrukce se na svislé stěny provede hydroizolace. Tento proces bude prováděn fyzickými osobami, a není tedy předmětem této práce.

Po dokončení hydroizolačních prací, provedení kontroly a případném odstranění nedostatků bude podzemní část stavby zasypána. Zásyp se provádí proto, aby byly eliminovány účinky vodorovných reakcí v průběhu stavby sférické klenby.

Zásyp bude hutněn po vrstvách. Mohutnost těchto vrstev určí statik na základě složení zeminy a jejího působení na vyzděnou konstrukci. Hutnění musí probíhat symetricky, aby konstrukce nevybočila.



Obrázek 29 - Zасыпání výkopu

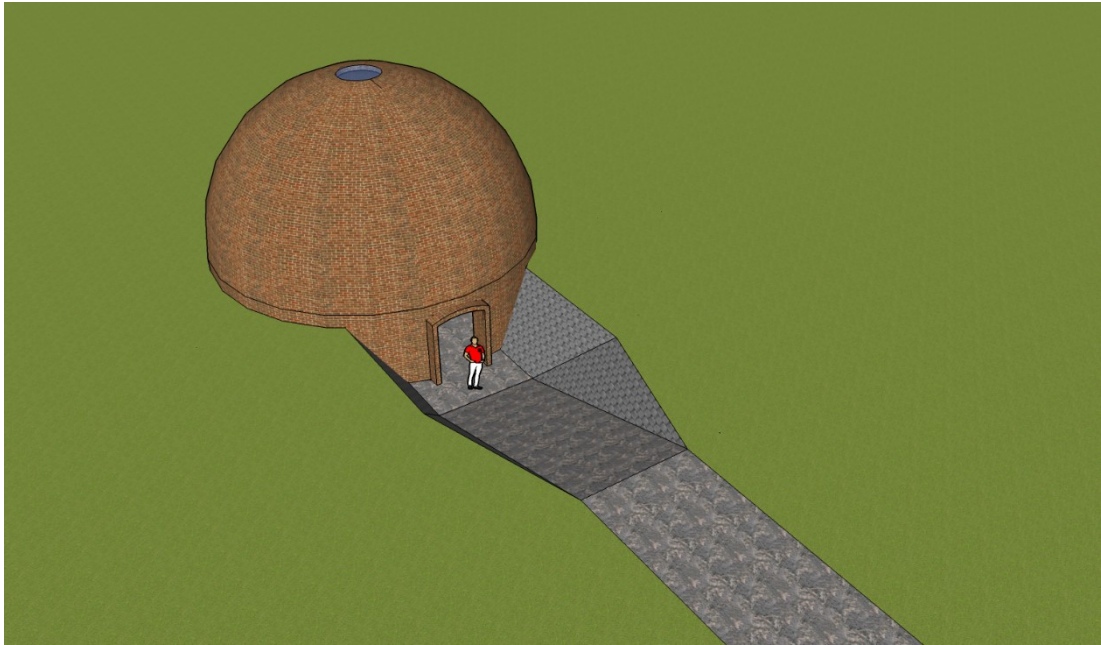
Po provedení zásyvu provede provozní technik kontrolu vyklizení pracovního prostoru robotů. Po provedené kontrole se opět spustí pracovní proces autonomních robotických jednotek. Robotická ruka se za pomoci hydraulických zvedáků zvedne do vyšší pracovní roviny, aby byla schopna pokračovat ve zdění kopule. Zdící proces probíhá opět ve stejných cyklech, jako zdící proces svislých stěn. Robotická ruka z palety odebere první cihlu, nanese vrstvu malty a položí ji na určené místo. Tento proces se opakuje, dokud se nevyprázdní paleta cihel a zásobník malty, v tu chvíli je hotov první záběr. Bajonetový uzávěr se otočí do pozice pro vypojení, tím se přeruší pracovní proces robotické ruky a ta se zastaví. Dopravník odjede ke skladu staveniště, kde na určeném místě odloží prázdnou paletu a dále pokračuje pro novou nakládku materiálu. Robot se posune do pozice druhého záběru, připojí se druhý vozík s materiálem, a opakuje se proces zdění. Kontrolní osoba opět sleduje proces zdění z bezpečného pracoviště pomocí zaměřovacích kamer a pokud zpozoruje chybu ve zdícím procesu, okamžitě přeruší práci robotů a provede vizuální osobní kontrolu ve výkopu, která povede k vyřešení nastalé situace. Po ukončení pracovního procesu se robotická ruka složí do přepravní polohy a robot se transportuje na místo určení u

hranice rozdělení pracovních prostorů fyzických osob a autonomních robotických technologií, kde jej převezme provozní technik. Vzhledem k náročnosti provádění kopulí z plných pálených cihel by bylo vhodné pro tuto stavbu vytvořit speciální zakřivené 3 D tvárnice, které zajistí přesnost zdění kopule.



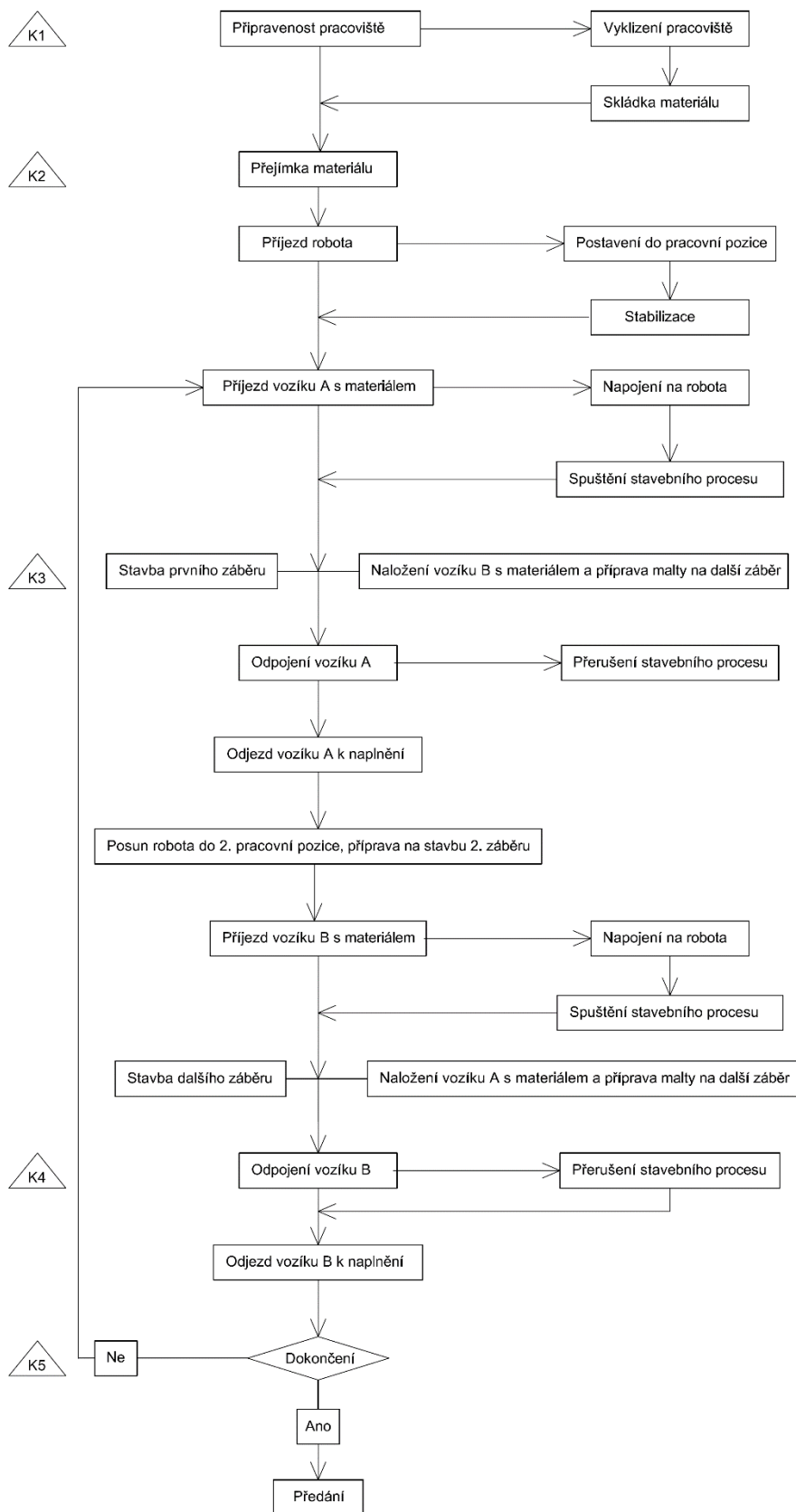
Obrázek 30 - Dokončení stavby kopule

Klenba bude uzavřena prefabrikovaným proskleným dílcem shora, který bude osazen pomocí jeřábu. Tento dílec bude při provozu stavby zajišťovat osvětlení prostoru. Po osazení vrchlíku bude stavba předána dalším zhotovitelům pro provedení Hydroizolace a klempířských prvků pro odvodnění střechy. Tyto práce již nejsou prováděny robotickou technologií, a tedy nejsou součástí této práce.



Obrázek 31 - Výsledná podoba stavby

2.3.4. Diagram pracovního postupu pro zděné konstrukce



Obrázek 32 - Diagram pracovního postupu pro zděné konstrukce

2.3.4.1. Seznam kontrol

K1 – Kontrola připravenosti pracoviště, požadované rovinnosti terénu, vyklizení pracoviště od přebytečných pracovních nástrojů a nečistot

K2 – Kontrola kvality přivezeného materiálu, kontrola šarže jednotlivých materiálů, kontrola množství

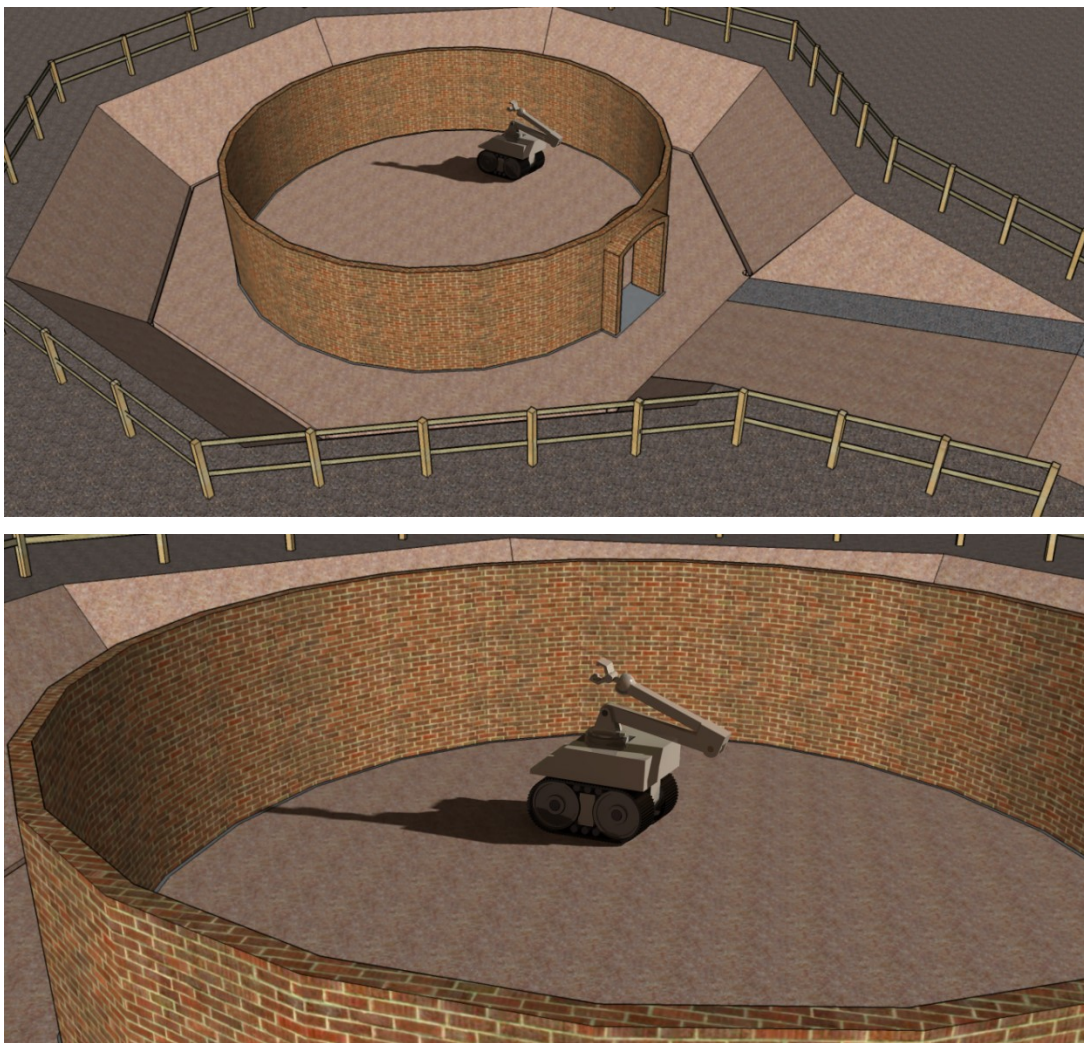
K3 – Kontrola kvality provedení prvního záběru, přesnosti provedení, využití materiálu, funkcí robota

K4 – Kontrola kvality provedení dalšího záběru, přesnosti provedení, využití materiálu, funkcí robota

K5 – Kontrola kvality provedení celé konstrukce, stability, využití materiálu, zjištění konstrukčních vad

Pozn.: Diagram pracovního postupu pro provádění svislých zděných konstrukcí a provádění kopule je stejný. Po dokončení svislých stěn a odstranění nedostatků se stavba předá zhotovitelům hydroizolace a zásypu konstrukcí. Tyto práce nejsou prováděné robotem, a tedy nejsou součástí práce. Po provedení těchto prací se stavba předá zpět zhotoviteli robotického zdění a znovu začne pracovní proces robota. Po dokončení stavby kopule se stavba předá k provedení hydroizolačních a klempířských prací kopule, které opět nejsou součástí této práce.

2.3.5. Model robota při stavbě



Obrázek 33 - Model robota při stavbě vytvořený ve spolupráci s Ing. J. Kubešem

2.3.6. Podmínky realizace

Z důvodů použití metody mokrého zdění, je nutné provádět zdící práce při teplotách 5 °C – 26 °C. Pokud teplota klesne pod 5 °C je možné zvážit speciální přísady a příměsi do malty pro umožnění použití v nižších teplotách. Případně je možné, vzhledem k velikosti stavby, pracovní prostor zakrýt a uměle zvýšit teplotu. Zdění za deště není možné, pokud nebude pracovní prostor zakryt, protože by mohlo dojít k poškození cenných robotických technologií.

2.3.7. Bezpečnost a ochrana zdraví při práci

V kapitole „Bezpečnost a ochrana zdraví při práci“ budou popsány obecné požadavky na BOZP na staveništi, kde budou pracovat robotické technologie. Součástí kapitoly bude porovnání rizikovosti stavby v případě, kdy je prováděna fyzickými osobami a v případě, kdy je prováděna autonomní robotickou jednotkou.

V této kapitole autorka vychází ze zákona č. 309/2006 Sb., nařízení vlády č. 362/2005 Sb. a nařízení vlády č. 591/2006 Sb.

2.3.7.1. Obecné požadavky na bezpečnost a ochranu zdraví

Jak je již zmíněno v kapitole „Připravenost staveniště“, bude staveniště oploceno neprůhledným plotem výšky minimálně 180 cm. Plot bude osazen vjezdovou bránou pro automobily a samostatným vchodem pro pěší fyzické osoby. U tohoto přístupového místa bude vrátnice, kde se bude zdržovat vrátný během pracovní doby a v noci ochranka (hlídané pracoviště je navrženo z důvodu nasazení nákladných strojů). Vjezd i vstup budou opatřeny dopravním značením, které bude informovat o vstupu na staveniště a zákazu vstupu nepovolaným osobám. Automobily a stroje na stavbě musí dodržovat předepsanou maximální rychlost, která je na staveništích komunikacích 20 km/h, mimo komunikace a v místě práce 5 – 10 km/h.

Pracovníci na staveništi musí být prokazatelně proškoleni o právních předpisech i dalších předpisech týkajících se stavby pro zajištění jejich bezpečnosti při práci. O všech školeních se musí vést na stavbě záznamy, aby bylo možné proškolení dokázat. Pokud pracovníci vstupují do oblastí stavby, je nutné, aby byli opatřeni ochrannými osobními pomůckami (helma, pracovní obuv, rukavice, pracovní brýle, reflexní vesta). Tyto prostředky musí procházet pravidelnými revizemi. Pokud se u pracovníků zjistí požití jakéhokoliv množství alkoholu nebo zakázaných návykových látek, bude pracovník okamžitě ze stavby vyloučen.

Staveniště bude rozděleno na 3 oblasti. Jednou oblastí bude oblast bezpečná, kde se bez rizika mohou pohybovat fyzické osoby, druhou oblastí bude část staveniště, kde se mohou pohybovat fyzické osoby, ale musí být striktně opatřeny osobními ochrannými pracovními prostředky (helma, pracovní obuv, výstražná vesta, ochranné brýle). Poslední částí staveniště bude prostor, kde se budou pohybovat autonomní

robotická zařízení. Tyto oblasti musí být výrazně a zřetelně odděleny, aby bylo jasné, kde probíhá jejich hranice. Je zakázáno vstupovat do pracovní oblasti autonomních robotických zařízení v době, kdy jsou tato zařízení v provozu. Zařízení by také měla být opatřena bezpečnostními čidly pro zjištění fyzické osoby, aby mohla samostatně zabránit střetu a zranění fyzické osoby v případě, že bude porušen zákaz vstupu (čidla budou pracovat podobně, jako bezpečnostní čidla pro zabránění srážky s chodcem u moderních osobních automobilů). Pro předepsané kontroly stavby ve stavební jámě, případně opravy pracujících strojů, je vždy nutné přerušit provoz autonomních strojů, další kontroly budou prováděny pomocí kamerového systému. Dálkové vypínače robotických systémů budou pravidelně rozmístěny po staveništi i v oblasti, kde se fyzické osoby nesmí pohybovat pro případ, že by došlo k porušení tohoto zákazu a bylo by potřeba roboty vyřadit z provozu ve chvíli ohrožení života.

Vzhledem k tomu, že se po stavbě pohybují i fyzické osoby, bude nutné zajistit stavební jámu proti pádu osob oplocením výšky minimálně 1,1 m se střední tyčí.

2.3.7.2. Vyhodnocení rizik pro stavbu prováděnou fyzickou osobou

Pokud by stavba byla prováděna fyzickou osobou, vyplývají z ní mnohá rizika, která jsou popsána dále v této kapitole. Rizikovitost této práce se s použitím robota výrazně zmenší. Pro porovnání těchto dvou možností jsou vytvořeny tabulky, ze kterých vyplývá, že použití robota na stavbě je z hlediska ochrany lidského života výhodné.

Při provádění stavby hrozí následující rizika, která se pohybují v hodnotách nízkého, středně vysokého až vysokého rizika. Při pohybu po výkopové rampě hrozí zaměstnanci pád v důsledku uklouznutí nebo zakopnutí. Riziko lze částečně eliminovat používáním správné obuvi s protiskluznou podrážkou, zabudováním protiskluzných zářezek po celé délce rampy a dbáním zvýšené pozornosti při pohybu na rampě.

Při špatné údržbě a úklidu pracoviště je možné přijít k úrazu v důsledku zakopnutí nebo uklouznutí na pracovišti. Z toho důvodu je nutné udržovat na pracovišti pořádek a nenechávat volně položené větší pracovní nástroje nebo větší kusy materiálu, o které by bylo možné zakopnout.

Pro dopravu materiálu do výkopu bude nutné použít autojeřáb, jehož použití přináší mnohá rizika úrazů při manipulaci s břemenem. Břemena smí uvazovat pouze certifikovaný a řádně a prokazatelně vyškolený vazač. Žádný z pracovníků se v žádném případě nesmí pohybovat pod a za břemenem, jelikož hrozí utržení nebo zhrounutí břemene. K uvazování břemene je povoleno používat jen certifikované vázací prostředky, které musí být pravidelně revidovány a při používání nesmí vykazovat žádné poškození.

Pro zdění je nutné použít lešení nebo zvýšeného pracoviště, kde hrozí riziko pádu z výšky nebo pádu materiálu nebo pracovního nástroje z výšky, proto je nutné dbát na správnost provedení zvýšeného pracoviště, opatřit jej okopovou zarážkou, zábradlím o výšce minimálně 1,1 metru a střední zábranou a také je nutné dbát zvýšené opatrnosti při práci s nástroji, aby nehrozil pád nástroje a následné zranění osoby pracující pod zvýšeným pracovištěm.

Osoba pohybující se pod zvýšeným pracovištěm musí mít helmu, aby se snížilo riziko poranění hlavy při pádu předmětu. Použití dalších OOPP je nutné pro eliminaci dalších případných rizik v podobě pořezání částí těla o ostrý okraj cihel nebo poranění očí odštípnutým materiálem nebo maltou, dalším rizikem může být poleptání kůže zasažené maltou.

Zed' právě vyzděná se v žádném případě nesmí zatěžovat, jelikož hrozí ztráta stability stěny, a to může vést k vážným zraněním osob pracujících v okolí této stěny.

Při vyzdívání dochází k jednostranné zátěži organismu, což při nedodržení fyziologických zásad zdvihání předmětů a nedodržení předepsaných přestávek může způsobit úrazy svalového aparátu.

Jelikož se jedná o stavbu částečně podzemní, může dojít k zavalení jámy zeminou a tím způsobení úrazu osobám pracujícím ve výkopu. V případě, že se dodrží technologický postup svahování a osoby pracující ve výkopu budou opatřeny OOPP, potom je možné toto riziko částečně eliminovat.

V následujících tabulkách je provedena analýza rizik, navržená opatření k alespoň částečné eliminaci rizika a požadavky na monitorování zbytkových rizik. V tabulce rizik jsou použity hodnotící parametry závažnost následků poranění a pravděpodobnost vzniku rizika.

Hodnoty parametrů závažnosti následků rizika [26] :

1. Poranění bez pracovní neschopnosti
2. Úraz s pracovní neschopností
3. Úraz vyžadující hospitalizaci
4. Úraz s trvalými následky
5. Smrtelný úraz

Hodnoty parametrů pravděpodobnosti vzniku rizika [26] :

1. Nahodilá
2. Nepravděpodobná
3. Pravděpodobná
4. Velmi pravděpodobná
5. Trvalá

Tabulka 2 - Tabulka hodnocení rizik

Riziko	Závažnost rizika	Pravděpodobnost, že riziko nastane	Počáteční hodnota rizika
Úraz pracovníka v důsledku pádu na výkopové rampě	2	5	Vysoké riziko
Převrácení jeřábu	5	1	Střední riziko
Úraz v důsledku zasažení pracovníka přenášeným břemenem	5	3	Vysoké riziko
Úraz v důsledku pádu přenášeného břemene	5	3	Vysoké riziko
Poškození kůže při zasažení maltou	1	3	Nízké riziko
Poškození očí při zasažení maltou	1	3	Nízké riziko
Úraz z důvodu pádu materiálu při provádění zděných konstrukcí	5	5	Vysoké riziko
Úraz při pádu z výšky	5	4	Vysoké riziko
Ztráta stability zděné stěny	5	2	Vysoké riziko
Pořezání o ostrý okraj cihel	1	4	Střední riziko
Úraz při montáži a demontáži lešení	5	3	Vysoké riziko
Úraz z důvodu pádu materiálu, náradí ze zvýšeného pracoviště	4	4	Vysoké riziko
Poškození svalového aparátu v důsledku jednorázového zatížení organismu	3	4	Vysoké riziko
Úraz v důsledku zakopnutí nebo uklouznutí	2	4	Vysoké riziko
Poranění očí při zasažení drobnými úlomky	2	4	Vysoké riziko
Úraz při zavalení stavební jámy zeminou	5	3	Vysoké riziko
Úraz v důsledku pádu osoby při pohybu po terénu	2	2	Střední riziko

Tabulka 3 - Navržení opatření pro eliminaci rizik

Riziko	Navržená opatření	Eliminace rizika
Úraz pracovníka v důsledku pádu na výkopové rampě	OOPP (protiskluzová obuv), zvýšená opatrnost při chůzi po rampě, protiskluzné zarážky po celé délce rampy	Ne
Převrácení jeřábu	Přeprava břemen podle technického listu, zaškolení obsluhy	Ne
Úraz v důsledku zasažení pracovníka přenášeným břemenem	Zaškolení obsluhy, zákaz pohybu osob pod a za břemenem, použití certifikovaných úvazků, vázání břemen vyškoleným vazáčem	Ne
Úraz v důsledku pádu přenášeného břemene	Dodržení TP uvazování břemen, zaškolení obsluhy, odborná způsobilost obsluhy	Ne
Poškození kůže při zasažení maltou	OOPP, zvýšená opatrnost při práci	Ne
Poškození očí při zasažení maltou	OOPP, zvýšená opatrnost při práci	Ne
Úraz z důvodu pádu materiálu při provádění zděných konstrukcí	Zvýšená opatrnost, správně navržené vyvýšené pracoviště, OOPP, dodržení pracovní kázně	Ne
Úraz při pádu z výšky	Správně zajištěný vyvýšeného pracoviště, OOPP, zajištění okraje proti pádu osoby	Ne
Ztráta stability zděné stěny	Nezatěžovat čerstvě vyzděnou stěnu, OOPP	Ano
Pořezání o ostrý okraj cihel	OOPP	Ne
Úraz při montáži a demontáži lešení	OOPP, dodržení TP, zvýšená opatrnost	Ne
Úraz z důvodu pádu materiálu, náradí ze zvýšeného pracoviště	OOPP, dodržení pracovní kázně, zajištění okopové hrany, zvýšená opatrnost při práci	Ne
Poškození svalového aparátu v důsledku jednorázového zatížení organismu	Dodržení pracovní kázně, dodržení fyziologických postupů, dodržení přestávek, správnost navržení pracoviště	Ne
Úraz v důsledku zakopnutí nebo uklouznutí	OOPP, udržení pořádku na pracovišti, zvýšená pozornost při práci	Ne
Poranění očí při zasažení drobnými úlomky	OOPP	Ne
Úraz při zavalení stavební jámy zeminou	OOPP, dodržení svahování stavební jámy	Ne
Úraz v důsledku pádu osoby při pohybu po terénu	Zvýšená opatrnost při pohybu na terénu	Ne

Tabulka 4 - Tabulka hodnocení zbytkových rizik

Riziko	Závažnost rizika po zavedení opatření	Pravděpodobnost, že riziko nastane po zavedení opatření	Hodnota zbytkového rizika
Úraz pracovníka v důsledku pádu na výkopové rampě	2	1	Nízké riziko
Převrácení jeřábu	5	0	Žádné riziko
Úraz v důsledku zasažení pracovníka přenášeným břemenem	5	1	Střední riziko
Úraz v důsledku pádu přenášeného břemene	5	1	Střední riziko
Poškození kůže při zasažení maltou	1	1	Nízké riziko
Poškození očí při zasažení maltou	1	1	Nízké riziko
Úraz z důvodu pádu materiálu při provádění zděných konstrukcí	3	2	Střední riziko
Úraz při pádu z výšky	5	2	Vysoké riziko
Ztráta stability zděné stěny	3	1	Nízké riziko
Požezání o ostrý okraj cihel	1	1	Nízké riziko
Úraz při montáži a demontáži lešení	5	1	Střední riziko
Úraz z důvodu pádu materiálu, náradí ze zvýšeného pracoviště	4	1	Střední riziko
Poškození svalového aparátu v důsledku jednorázového zatížení organismu	3	2	Střední riziko
Úraz v důsledku zakopnutí nebo uklouznutí	2	1	Nízké riziko
Poranění očí při zasažení drobnými úlomky	2	1	Nízké riziko
Úraz při zavalení stavební jámy zeminou	5	1	Střední riziko
Úraz v důsledku pádu osoby při pohybu po terénu	2	1	Nízké riziko

Tabulka 5 - Požadavky na monitorování zbytkového rizika

Riziko	Požadavky na monitorování zbytkového rizika	Osoba odpovědná za kontrolu rizika
Úraz pracovníka v důsledku pádu na výkopové rampě	Kontrola používání OOPP, kontrola provedení protiskluzových zářezek	Stavbyvedoucí, bezpečnostní technik
Převrácení jeřábu	Kontrola zatížení jeřábu, kontrola rychlosti větru, kontrola zaškolení obsluhy	Stavbyvedoucí
Úraz v důsledku zasažení pracovníka přenášeným břemenem	Kontrola vedoucím pracovníkem, kontrola zaškolení obsluhy	Stavbyvedoucí
Úraz v důsledku pádu přenášeného břemene	Kontrola zaškolení obsluhy, pravidelná kontrola úvazků	Stavbyvedoucí
Poškození kůže při zasažení maltou	Kontrola používání OOPP	Stavbyvedoucí
Poškození očí při zasažení maltou	Kontrola používání OOPP	Stavbyvedoucí
Úraz z důvodu pádu materiálu při provádění zděných konstrukcí	Kontrola používání OOPP, kontrola zvýšeného pracoviště	Stavbyvedoucí
Úraz při pádu z výšky	Kontrola bezpečnosti pracoviště, kontrola používání OOPP, kontrola bezpečnostních prvků	Stavbyvedoucí, bezpečnostní technik
Ztráta stability zděné stěny	Kontrola pevnosti stěny	Stavbyvedoucí
Pořezání o ostrý okraj cihel	Kontrola používání OOPP	Stavbyvedoucí
Úraz při montáži a demontáži lešení	Kontrola mistrem,	Stavbyvedoucí
Úraz z důvodu pádu materiálu, náradí ze zvýšeného pracoviště	Kontrola zajištění okopové hrany, kontrola používání OOPP	Stavbyvedoucí
Poškození svalového aparátu v důsledku jednorázového zatížení organismu	Kontrola způsobu práce, kontrola zařízení pracoviště	Stavbyvedoucí, bezpečnostní technik
Úraz v důsledku zakopnutí nebo uklouznutí	Kontrola OOPP, kontrola pořádku na pracovišti	Stavbyvedoucí
Poranění očí při zasažení drobnými úlomky	Kontrola OOPP	Stavbyvedoucí
Úraz při zavalení stavební jámy zeminou	Kontrola OOPP, kontrola provedení stavební jámy	Stavbyvedoucí
Úraz v důsledku pádu osoby při pohybu po terénu	Bez kontroly	-

2.3.7.3. Vyhodnocení rizik pro stavbu prováděnou robotem

Při použití robota pro zdění konstrukce se většina uvedených rizik eliminuje. U robota nenastane riziko přetížení organismu, z toho vyplývá vyšší rychlost výstavby z důvodu eliminace přestávek. Nevzniknou úrazy poškození očí zasažením úlomkem nebo maltou a ani poleptání kůže maltou. Není použito vyvýšeného pracoviště, a tak není možný pád předmětu z výšky nebo pád pracovníka z vyvýšeného pracoviště. Zůstává riziko pádu materiálů z výšky, ale následkem není zranění osoby, ale možné poškození stroje. Vzhledem k prováděným kontrolám ve výkopu zůstávají rizika spojená s pohybem osoby po rampě, po terénu a ve výkopu. Až na riziko zranění v důsledku zavalení zeminou jsou tato rizika velmi nízká a případné zranění není nijak závažné. Většina závažných rizik se tedy eliminuje při použití robotické autonomní technologie.

Vzhledem k tomu že bude nutné funkci robota kontrolovat a jeho práci monitorovat, budou vznikat rizika nová spojená se spoluprací robota s fyzickou osobou. Robotická technologie by měla být opatřena senzory, které by měly zabránit střetu s fyzickou osobou. Fyzická osoba by se neměla pohybovat v pracovním prostoru autonomních technologií, aby nedošlo ke zranění. Pohyb osob v tomto prostoru je povolen pouze po přerušení provozu autonomních technologií nebo při aktivaci softwarové zábrany pro přístup ke skladišti materiálu. Během kontroly robota fyzickou osobou v pracovním prostoru robotické sestavy může dojít k pádu materiálu nebo části robota na fyzickou osobu. V případě nutnosti vstoupení do pracovního prostoru stroje, který musel přerušit práci během procesu zdění, je nutné nejprve zajistit bezpečí kontrolora odstraněním nezajištěného materiálu a ideálně uvedením robota do výchozí polohy. Pokud nebude možné materiál odstranit a tím pádem vyloučit riziko pádu materiálu na kontrolora, dojde k natažení ochranné záchytné sítě nad prostorem pohybu fyzických osob. Rizika po zavedení robotické technologie jsou uvedena v následující tabulce.

Tabulka 6 - Tabulka hodnocení rizik

Riziko	Závažnost rizika	Pravděpodobnost, že riziko nastane	Počáteční hodnota rizika
Úraz pracovníka v důsledku pádu na výkopové rampě	2	5	Vysoké riziko
Úraz v důsledku zakopnutí nebo uklouznutí	2	4	Vysoké riziko
Poranění očí při zasažení drobnými úlomky	2	4	Vysoké riziko
Úraz při zasažení strojem	5	4	Vysoké riziko
Úraz z důvodu pádu materiálu nebo části robota z výšky	4	3	Vysoké riziko
Úraz při zavalení stavební jámy zeminou	5	3	Vysoké riziko
Úraz v důsledku pádu osoby při pohybu po terénu	2	2	Střední riziko

Tabulka 7 - Tabulka opatření pro eliminaci rizika

Riziko	Navržená opatření	Eliminace rizika
Úraz pracovníka v důsledku pádu na výkopové rampě	OOPP (protiskluzová obuv), zvýšená opatrnost při chůzi po rampě, protiskluzné zarážky po celé délce rampy	Ne
Úraz v důsledku zakopnutí nebo uklouznutí	OOPP, udržení pořádku na pracovišti, zvýšená pozornost při práci	Ne
Poranění očí při zasažení drobnými úlomky	OOPP	Ne
Úraz při zasažení strojem	OOPP, dodržení zákazu vstupu do pracovního prostoru strojů při činnosti robotů, zvýšená opatrnost pohybu v oblasti robotů, viditelné ohraničení oblastí, SW zábrana	Ne
Úraz z důvodu pádu materiálu nebo části robota z výšky	OOPP, zvýšená opatrnost při kontrole, použití ochranné sítě	Ne
Úraz při zavalení stavební jámy zeminou	OOPP, dodržení svahování stavební jámy	Ne
Úraz v důsledku pádu osoby při pohybu po terénu	Zvýšená opatrnost při pohybu na terénu	Ne

Tabulka 8 - Tabulka hodnocení zbytkových rizik

Riziko	Závažnost rizika po zavedení navržených opatření	Pravděpodobnost, že riziko nastane po zavedení navržených opatření	Hodnota zbytkového rizika
Úraz pracovníka v důsledku pádu na výkopové rampě	2	1	Nízké riziko
Úraz v důsledku zakopnutí nebo uklouznutí	2	1	Nízké riziko
Poranění očí při zasažení drobnými úlomky	2	1	Nízké riziko
Úraz při zasažení strojem	5	2	Vysoké riziko
Úraz z důvodu pádu materiálu nebo části robota z výšky	4	1	Střední riziko
Úraz při zavalení stavební jámy zeminou	5	1	Střední riziko
Úraz v důsledku pádu osoby při pohybu po terénu	2	1	Nízké riziko

Tabulka 9 - Požadavky na monitorování zbytkových rizik

Riziko	Požadavky na monitorování zbytkového rizika	Osoba odpovědná za kontrolu rizika
Úraz pracovníka v důsledku pádu na výkopové rampě	Kontrola používání OOPP, kontrola provedení protiskluzových zářezek	Stavbyvedoucí, bezp. technik
Úraz v důsledku zakopnutí nebo uklouznutí	Kontrola OOPP, kontrola pořádku na pracovišti	Stavbyvedoucí
Poranění očí při zasažení drobnými úlomky	Kontrola OOPP	Stavbyvedoucí
Úraz při zasažení strojem	Kontrola OOPP, kontrola dodržování předpisů, zabezpečení robotického systému čidly, kontrola ohraničení oblastí, SW zábrana	Stavbyvedoucí
Úraz z důvodu pádu materiálu nebo části robota z výšky	Kontrola OOPP, kontrola zajištění pracovního prostoru	Stavbyvedoucí, bezp. technik
Úraz při zavalení stavební jámy zeminou	Kontrola OOPP, kontrola provedení stavební jámy	Stavbyvedoucí
Úraz v důsledku pádu osoby při pohybu po terénu	Bez kontroly	-

Tabulka 10 - Porovnání rizikovosti práce

Riziko	Stav rizika při zavedení robotické technologie
Úraz pracovníka v důsledku pádu na výkopové rampě	Zůstává
Převrácení jeřábu	Eliminováno
Úraz v důsledku zasažení pracovníka přenášeným břemenem	Eliminováno
Úraz v důsledku pádu přenášeného břemene	Eliminováno
Poškození kůže při zasažení maltou	Eliminováno
Poškození očí při zasažení maltou	Eliminováno
Úraz z důvodu pádu materiálu při provádění zděných konstrukcí	Eliminováno
Úraz při pádu z výšky	Eliminováno
Ztráta stability zděné stěny	Eliminováno
Porezání o ostrý okraj cihel	Eliminováno
Úraz při montáži a demontáži lešení	Eliminováno
Úraz z důvodu pádu materiálu, náradí ze zvýšeného pracoviště	Eliminováno
Poškození svalového aparátu v důsledku jednorázového zatížení organismu	Eliminováno
Úraz v důsledku zakopnutí nebo uklouznutí	Zůstává
Poranění očí při zasažení drobnými úlomky	Eliminováno
Úraz při zavalení stavební jámy zeminou	Zůstává
Úraz v důsledku pádu osoby při pohybu po terénu	Zůstává
Úraz při zasažení strojem	Nově vzniká
Úraz z důvodu pádu materiálu nebo části robota z výšky	Nově vzniká

2.3.8. Ochrana životního prostředí

Realizace zděné stavby pomocí robotické technologie bude mít minimální nepříznivý dopad na životní prostředí. Pokud se na stavbě objeví neočekávané negativní vlivy, musí se s okamžitostí snížit na minimum podle platných nařízení. Stavba je prováděna z pálených cihel, tedy z recyklovatelného materiálu.

Hlučnost stavby při použití autonomní robotické soustavy nebude nijak převyšovat hlučnost v případě stavby fyzickými osobami. Pro roboty jsou vybrány jako pohon elektromotory, které jsou tiché, takže hluk při pohybu této jednotky vydává pouze valivý odpor podvozků. Dalšími činnostmi, které mohou okolí zatěžovat hlukem i nechtěnými vibracemi, jsou případné pūlení cihel a vibrování navezené zeminy při zpětném zásypu výkopu. Tyto činnosti musí být časově omezeny podle platných územních vyhlášek. Použití robotických technologií nezpůsobí zvýšení prašnosti stavby.

Vzhledem k elektrickému pohonu stavebních jednotek bude stavba pravděpodobně odebírat větší množství elektřiny, než by se odebíralo při stavbě fyzickými osobami.

Prostor stavby a jejího okolí je nezbytné pravidelně čistit od stavebních nečistot a pokud dojde k znečištění veřejné komunikace, pak je nutné tuto komunikaci neprodleně umýt, aby nedocházelo k následnému znečišťování vozidel uživatelů veřejné komunikace.

Při nakládání a hospodaření s odpady, které na stavbě vzniknou, je nutné dodržovat platný právní předpis, tedy zákon 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů.

2.3.9. Obecné požadavky na zařízení staveniště

Komunikace na staveništi musí být široká minimálně 3 m, aby bylo zajištěno vyhýbání dopravníků materiálu a v části, kde se pohybují nákladní auta musí být zhotovena z betonových silničních panelů o šířce 1 m a délce 3 m. Vzhledem k použití silničních panelů pro staveništní komunikaci by nemělo docházet ke znečištění vozidel, která dopravují na stavbu materiál. V případě nutnosti zřizování čistících ramp, se tyto rampy provedou ve vyhrazeném u výjezdu ze staveniště. V místě, kde se pohybují robotické technologie není nutné panely pokládat. Vzdálenost hrany skládky materiálu od hrany hlavní figury výkopu by měla být maximálně 20 m kvůli kapacitě baterie dopravního vozíku. Komunikace pro pěší osoby musí být oddělena od komunikace pro motorová vozidla, z důvodu bezpečnosti fyzických osob na staveništi. Tato komunikace bude provedena rovněž ze silničních panelů. Na staveništi se bude nacházet prostor pro uložení odpadu.

Zemina se bude skladovat přímo na staveništi do výšky maximálně 3 m, pokud to dovolí možnosti staveniště a bude na tuto skládku dostatečný prostor. Na staveništi se bude skladovat pouze zemina pro zasypání výkopu, není nutné skladovat veškerou vykopanou zeminu. Pokud možnosti staveniště nedovolí, aby se přímo zde skladovala vykopaná zemina, je možné zvolit variantu odvozu výkopku na mimostaveništní skládku pomocí nákladních automobilů.

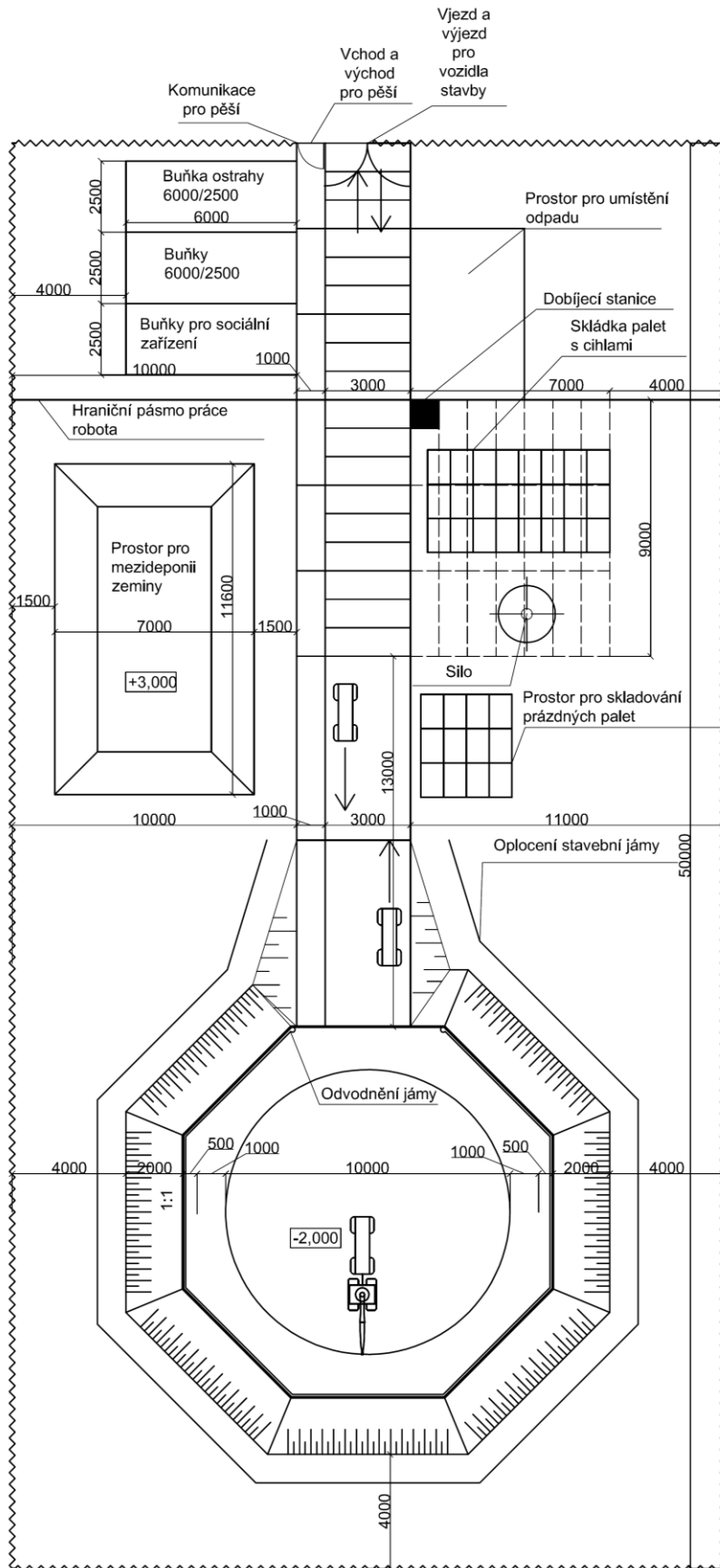
Skládka materiálu může být venkovní, ale je nutné, aby její povrch byl zpevněn. Cihly se budou skladovat na paletách, maximálně 2 palety na sobě, pokud výrobce cihel neurčuje jinak z důvodu maximálního dosahu dopravního vozíku. Silo pro skladování sypkých materiálů pro výrobu malty bude stát na zpevněném povrchu. Cihly musí být zakryty vhodným materiálem, aby nedošlo k poškození vlivem povětrnostních podmínek

Staveniště pro tuto fázi musí být osazeno minimálně 2 buňkami: buňkou kancelářskou pro technika udržujícího robota v chodu a jednou buňkou se sociálním zařízením. U vjezdu a vchodu na staveniště musí být osazena vrátnice, kde bude přes den vrátný a v noci hlídač z důvodu vysoké hodnoty použitých strojů. Parkoviště pro osobní automobily, vzhledem k velikosti stavby, není nutné. Auta se mohou odstavit na hranici pozemku, je-li nezbytné se na stavbu dopravovat vozidlem

Plot staveniště je osazen na okraji pozemku, ideálně 4 m od hran výkopu. Zeminu je možné skladovat až k hranici pozemku. Plot by měl být vysoký 1,8 m a neprůhledný.

Staveniště musí být připojeno na pitnou vodu, kanalizaci a elektřinu. Nabíjecí stanice pro robota a pro dopravníky se bude nacházet na hranici pracovní zóny, aby k ní měl pověřený technik přístup a nebylo nutné zastavovat celou stavbu v případě nutnosti kontroly této stanice.

Pokud budou možnosti staveniště hodně omezené, je možné výkop pro stavbu zapažit a snížit tak prostorovou náročnost stavby.



Obrázek 34 - Schéma zařízení staveniště

Závěr

Cílem této práce bylo zhodnotit a navrhnout specifika robotického autonomního zařízení, které bude schopné zdít klenbové konstrukce takzvaně z ruky, tedy bez použití podpěrného bednění, navrhnout obecné zařízení staveniště pro robotickou výstavbu, na základě staveništních podmínek navrhnout podvozek, který v rámci parametrů staveniště a robotické technologie bude nejlépe vyhovující a posoudit robotickou výstavbu z hlediska legislativy bezpečnosti a ochrany zdraví při práci a ochrany životního prostředí.

Po prozkoumání různých technologií pro zdění kleneb z ruky a moderních robotických technologií pro zdění (převážně svislých stěn) byl navržen koncept robota pro vyzdívání kleneb na základě parametrů robotické ruky a podvozku z pásového rypadla, který byl vybrán na základě vícekritériální analýzy vhodnosti podvozků. Po navržení robota byla zvolena technologie zdění z ruky (kupole) a navržena stavba, která posloužila jako základ pro vytvoření technologického postupu prací a pro návrh zařízení staveniště, ze kterého vzešly obecné parametry pro zařízení staveniště při použití této technologie.

Nakonec byla technologie posouzena z hlediska bezpečnosti a ochrany zdraví při práci a ochrany životního prostředí. Bylo zvoleno posuzování pomocí srovnání rizikovosti stavby fyzickou osobou a stavby robotem. Z tohoto posouzení vyplývá, že při použití robotické technologie zaniká mnoho rizikových faktorů ve výstavbě.

Na začátku této práce byla myšlenka spojení tradiční technologie klenutých konstrukcí s moderním trendem robotizace. Během vypracovávání této práce mě celou dobu provázela otázka, zda je toto spojení vůbec reálné. Po prozkoumání technologií, které jsou na trhu dostupné z hlediska stavebnictví, ale i technologií, které se používají v jiných odvětvích, jsem dospěla k názoru, že nevidím důvod, proč by robotickou výstavbu kleneb nebylo možné s ohledem na současný stav vývoje robotizace v blízké době realizovat.

Další vývoj této myšlenky by měl být ve spolupráci s dalšími specialisty v oblasti stavebnictví, strojírenství a informačních technologií. Cílem vývoje by měla být schopnost výrazně zrychlit technologii výstavby konstrukcí na bázi katalánské klenby, které by potom mohly být zajímavou alternativou železobetonových stropů.

Reference

1. **Vinař, Jan.** *Konstrukce a opravy historických konstrukcí (Báje, mýty a realita)*. místo neznámé : Pracovní verze před vydáním, 2018.
2. **Block, Philippe, Prof. Dr. a Davis, Lara.** *Scaffolding to structure, Construction in thin shell masonry*. Cambridge : BLOCK Teaching, 2010.
3. **Holubec, Dušan, a další, a další.** Klenby. *ELEKTRONICKÁ UČEBNICE*. [Online] Evropský sociální fond ČR, EU, MŠMT, OP Vzdělání pro konkurenceschopnost, Olomoucký kraj, 28. 08 2015. <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2198>.
4. **Lipanská, Eduarda.** *Historické klenby*. Praha : EL Consult, 1998. ISBN 80-902076-1-8.
5. **Witzany, Jiří, a další, a další.** *PDR - Poruchy, degradace, rekonstrukce*. Praha : Česká technika, 2010. ISBN 978-80-01-04488-9.
6. **Chernet, Zegeye a Sewnet, Helawi.** *BUILDING ETIOPIA*. Addis Ababa : EiABC, 2012. ISBN 978-99944-993-7-3.
7. **Starý, Staňa.** *Příručka učňů zednických : k poučení a odbornému vzdělání zednických učňů i pomocníků*. Praha : Společenstvo stavitelů pro obvod Obchodní a živnostenské komory v praze a pro politický okres lounský, 1934.
8. **Werner, Uli, Stohr, Ulrich a Hees, Nicolai.** Biogas Plants in Animal Husbandry. *World Environmental Library*. [Online] 1999. <http://www.nzdl.org/gsdmod?e=d-00000-00---off-0envl--00-0----0-10-0---0---0direct-10---4-----0-11--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0-0-11-1-0utfZz-8-10-0-0-11-1-0utfZz-8-00-00&cl=CL1.1&d=HASH0122ae5fa3c7cc8d6abf5b43.7.3>=1>.
9. **El-Rashidi, Yasmine.** Remembering 'the Master'. *Al-Ahram weekly on-line*. [Online] <http://weekly.ahram.org.eg/Archive/2000/474/feature.htm#top>.
10. **Ponce, Alfonso Ramírez a Meléndez, Rafael Ramírez.** *Curves of Clay: Bóvedas del Bajío*. [<https://www.dtic.upf.edu/~rramirez/Arponce/Nexus04.pdf>] Barcelona : Universitat Pompeu Fabra.

11. **Cooperazione, ARCo Architettura &.** ISTRUZIONI VOLTA NUBIANA HD. *ARCo - Architettura & Cooperazione*. [Online] <http://www.arco.org/gallery/progetti/realizzati/new%20um%20al%20nasser/files/ISTRUZIONI%20VOLTA%20NUBIANA%20HD.pdf>.
12. **López, David López, Rodríguez, Marta Domenech a Fernández, Mariana Palumbo.** "Brick-topia", the thin-tile vaulted pavilion. *Science Direct*. [Online] Elsevier Ltd., 2014. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214399814000125>.
13. *Modeling of industrial robotic brick system.* **Usmanov, Vyacheslav, a další, a další.** místo neznámé : ISARC, 2017. 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Sv. 140.
14. ABB ROBOTIKA. *ABB*. [Online] 2018. [https://new.abb.com/products/robotics/cs?utm_source=google&utm_campaign=SE_Roboty_Brand&utm_medium=cpc&utm_term=Roboty&utm_content=Robotika\(Brand\)&gclid=CjwKCAiA9qHhBRB2EiwA7poaeHoapkDH6Pwd0-fJIWOgGu7OFvT8-w8u4bOmdy0EqzSpKK11PCSRTRoCDzAQA_vD_BwE](https://new.abb.com/products/robotics/cs?utm_source=google&utm_campaign=SE_Roboty_Brand&utm_medium=cpc&utm_term=Roboty&utm_content=Robotika(Brand)&gclid=CjwKCAiA9qHhBRB2EiwA7poaeHoapkDH6Pwd0-fJIWOgGu7OFvT8-w8u4bOmdy0EqzSpKK11PCSRTRoCDzAQA_vD_BwE).
15. O společnosti KUKA. *KUKA*. [Online] 2018. <https://www.kuka.com/cs-cz/o-spole%C4%8Dnosti-kuka>.
16. **Dormehl, Luke.** SAM is a construction robot that can lay bricks 6 times faster than you can. *Digital trends*. [Online] Designtecnica Corporation, 29. Březen 2017. <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/sam-bricklaying-robot-6x-faster-than-you-can/>.
17. SAM100. *Construction robotics*. [Online] Construction robotics, 2007-2018. <https://www.construction-robotics.com/sam100/#>.
18. **Keating, Steven, a další, a další.** Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales. *Research Gate*. [Online] 2017. https://www.researchgate.net/publication/316523158_Toward_site-specific_and_self-sufficient_robotic_fabrication_on_architectural_scales. ISSN 2470-9476.

19. **Šurkala, Milan.** Japonský humanoidní robot HRP-5P pro pomoc na stavbě. *Svět Hardware*. [Online] oXy Online s.r.o., 4. Říjen 2018. <https://www.svethardware.cz/japonsky-humanoidni-robot-hrp-5p-pro-pomoc-na-stavbe/47672>.

20. **Gramazio & Kohler and Raffaello D`Andrea, in cooperation with ETH Zurich.** Flight Assembled Architecture. *Gramazio Kohler Research*. [Online] Gramazio Kohler Research, ETH Zurich, Switzerland, 2016. <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/209.html>.

21. **Zilliacus, Ariana.** Maya Somaiya Sharda Library. *arcspace*. [Online] Danish Architecture Center, 12. Listopad 2018. <https://arcspace.com/feature/maya-somaiya-sharda-library/>.

22. **Sales, KUKA Czech Republic.** KUKA CYBERTECH ARC. *KUKA*. [Online] KUKA. <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/pr%C5%AFmyslov%C3%A9-roboty/kr%C2%A0cybertech%C2%A0arc>.

23. **Fries, Jiří.** *Zemní stroje: učební text : studijní materiály pro studijní obor Zemní, těžební a stavební stroje Fakulty strojní*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2567-0.

24. **Vaněk, Antonín.** *Strojní technika a technologie zemních prací*. Praha : Academia, 2003. ISBN 80-200-1045-9.

25. **Caterpillar.** Stavební stroje Cat. *Zeppelin*. [Online] 2012. <https://zeppelin.cz/blob.php?idProduct=34333863&type=pdf&dbPrefixTable=katalog&lng=cs>.

26. **Neugebauer, Tomáš.** Metody vyhodnocení rizik při práci. *BOZP info.cz*. [Online] 2002-2018. <https://www.bozpinfo.cz/metody-vyhodnoceni-rizik-pri-praci>.

Rejstřík obrázků

<i>Obrázek 1 - Názvosloví klenby [3]</i>	10
<i>Obrázek 2 - Evropská klenba (valená) [6]</i>	13
<i>Obrázek 3 - Schéma stavby kopule [8]</i>	14
<i>Obrázek 4 - Mexická klenba [6]</i>	15
<i>Obrázek 5 - Mexická cihla pro stavbu klenby a standardní mexická cihla [10]</i>	16
<i>Obrázek 6 - Princip stavby mexické klenby metodou leaning brick [11]</i>	17
<i>Obrázek 7 - Mexická klenba zděná z rohů nad čtvercovým půdorysem [6]</i>	17
<i>Obrázek 8 - Katalánská klenba [6]</i>	18
<i>Obrázek 9 - Příklad hledání tvaru klenby pomocí tzv. řetězovky [6]</i>	19
<i>Obrázek 10 - Průběh tlakové čáry – nezatížená kce, zatížení osamělou silou [6]</i>	19
<i>Obrázek 11 - Průběh tlakové čáry u klenby přitížené podlahou – různá zatížení [6]</i>	19
<i>Obrázek 12 - Semi Automated Mason (SAM 100) [17]</i>	21
<i>Obrázek 13 - Digital Construction Platform [18]</i>	22
<i>Obrázek 14 - Robotická ruka KUKA použitá pro výzkum na ČVUT v Praze [13]</i>	23
<i>Obrázek 15 - Humanoidní robot HRP - 5P [19]</i>	24
<i>Obrázek 16 - Zdění pomocí létajících dronů [20]</i>	25
<i>Obrázek 17 - Vizualizace výsledné stavby – výzkum ETH Zurich [20]</i>	25
<i>Obrázek 18 - Cíl dalšího vývoje [21]</i>	26
<i>Obrázek 19 - Robotická ruka KUKA CYERTECH ARC [22]</i>	27
<i>Obrázek 20 - Schéma vyjadřující působení sil na robota</i>	33
<i>Obrázek 21 - Parametry zvoleného rypadla z technického listu [25]</i>	36
<i>Obrázek 22 - Schematický půdorys robota</i>	37
<i>Obrázek 23 - Schematický boční pohled na robota</i>	37
<i>Obrázek 24 - Vizualizace robota vytvořená na základě náčrtů Ing. J. Kubešem</i>	38
<i>Obrázek 25 - Původní návrh stavby</i>	40
<i>Obrázek 26 - Model stavby</i>	41
<i>Obrázek 27 - Model připravenosti staveniště</i>	44
<i>Obrázek 28 - Dokončení svislých konstrukcí</i>	46
<i>Obrázek 29 - Zасыпání výkopu</i>	47
<i>Obrázek 30 - Dokončení stavby kopule</i>	48
<i>Obrázek 31 - Výsledná podoba stavby</i>	49
<i>Obrázek 32 - Diagram pracovního postupu pro zděné konstrukce</i>	50

<i>Obrázek 33 - Model robota při stavbě vytvořený ve spolupráci s Ing. J. Kubešem ..</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 34 - Schéma zařízení staveniště</i>	<i>68</i>

Rejstřík tabulek

<i>Tabulka 1 - Vícekriteriální analýza pro výběr vhodného typu podvozku.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 2 - Tabulka hodnocení rizik</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 3 - Navržení opatření pro eliminaci rizik.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 4 - Tabulka hodnocení zbytkových rizik.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 5 - Požadavky na monitorování zbytkového rizika.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 6 - Tabulka hodnocení rizik</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 7 - Tabulka opatření pro eliminaci rizika</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 8 - Tabulka hodnocení zbytkových rizik.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 9 - Požadavky na monitorování zbytkových rizik.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 10 - Porovnání rizikovosti práce.....</i>	<i>64</i>