VYSOKÁ ŠKOLA EKONOMICKÁ V PRAZE

FAKULTA INFORMATIKY A STATISTIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015 Vít Černý

VYSOKÁ ŠKOLA EKONOMICKÁ V PRAZE

FAKULTA INFORMATIKY A STATISTIKY



Název diplomové práce:

Simulační modely a optimalizace při projektovém řízení

Autor: **Vít Černý**

Katedra: **Katedra ekonometrie**

Obor: **Ekonometrie a operační výzkum**

Vedoucí práce: **Ing. Martina Kuncová, Ph.D.**

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Simulační modely a optimalizace při projektovém řízení“ zpracoval samostatně. Veškerou použitou literaturu a další podkladové materiály uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne 26. června 2015 .....

Vít Černý

Poděkování:

Rád bych na tomto místě poděkoval Ing. Martině Kuncové, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a za podnětné návrhy, které ji obohatily. Rovněž děkuji společnosti Omega-Teplotechna Praha a.s. za poskytnutí dat.

Abstrakt

Název práce: Simulační modely a optimalizace při projektovém řízení
Autor: Vít Černý
Katedra: Katedra ekonometrie
Vedoucí práce: Ing. Martina Kuncová, Ph.D.

Řízení projektů je v posledních letech velmi populárním nástrojem řízení firem a podnikových procesů a tento systém je uplatňován ve firmách prakticky všech zaměření. V této diplomové práci jsou principy projektového řízení aplikovány na reálný stavební projekt, což je jedno z nejobvyklejších využití. Během přípravy projektu jsou na rizikové oblasti připravované zakázky aplikovány další dvě disciplíny operačního výzkumu, simulační modely a optimalizace pomocí matematického programování. Simulační modely umožňují analytikovi předvídat chování modelovaného reálného systému, aniž by musel vynakládat čas či peníze jeho pozorováním. V této práci je simulován systém vertikální dopravy během realizace zakázky. Optimalizací je myšleno nastavení takových parametrů libovolného modelu, aby sledovaná kritéria dosáhla optimálních hodnot. V této práci je optimalizován celkový rozpočet projektu, aby náklady této zakázky byly minimální.

Klíčová slova: řízení projektů, simulace, optimalizace, model, operační výzkum

Abstract

Title: Simulation modelling and optimization in project management
Author: Vít Černý
Department: Department of Econometrics
Supervisor: Ing. Martina Kuncová, Ph.D.

In recent years, the project management is very popular tool for management of companies and their processes, and this system is utilized in companies of practically any specialisation. In this diploma paper the principles of the project management are applied on a real construction project, which is one of the most common applications. During project preparation, another two disciplines of the operations research are applied on the precarious parts of the project; namely simulation modelling, and optimization via mathematical programming. Simulation modelling allows the analyst to predict behaviour of the modelled real system without the need for any time or costs to be spent on its observation. In this paper the simulation covers the system of vertical transport during execution of the project. Optimization is meant to set such parameters of any model in order for the watched criteria to reach optimal values. In this paper, the optimization is applied on total budget of the project to minimize the total costs.

Keywords: project management, simulation, optimization, model, operations research

Obsah

ÚVOD **1**

1 TEORIE UŽITÁ V PRÁCI **3**

1.1 ŘÍZENÍ PROJEKTŮ 3

1.1.1 Základní pojmy projektového řízení 3

1.1.2 Využití projektového řízení 4

1.1.3 Teorie grafů – síťový graf 5

1.1.4 Síťový graf a řízení projektů 7

1.2 OPTIMALIZACE 9

1.2.1 Matematické programování 11

1.2.2 Řešení úloh matematického programování 12

1.3 SIMULAČNÍ MODELY 14

1.3.1 Pravděpodobnostní rozdělení 15

2 PROJEKT VÝSTAVBY PRŮMYSLOVÉHO KOMÍNA **18**

2.1 TÉMA A CÍLE PRÁCE 18

2.1.1 Vstupní data 18

2.2 VÝSTAVBA KOMÍNA M200 V EGYPTĚ 19

3 VYPRACOVÁNÍ PROJEKTU **22**

3.1 FÁZE 23

3.2 ČINNOSTI 23

3.3 ZDROJE 25

3.4 KALENDÁŘE 26

3.5 ANALÝZA PROJEKTU 26

4 VYPRACOVÁNÍ SIMULAČNÍHO MODELU **29**

4.1 IDENTIFIKACE PROBLÉMU 29

4.1.1 Stručné objasnění problematiky 30

4.1.2 Situace v reálném projektu 31

4.2 NASTAVENÍ SIMULAČNÍHO MODELU 33

4.2.1 Celková podoba modelu 34

4.2.2 Nastavení parametrů modelu 36

4.3 SIMULACE A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ 40

4.3.1 Nastavení simulace 40

4.3.2 Výsledky simulace fungování systému 42

4.3.3 Alternativní simulační model – popis úpravy 45

4.3.4 Alternativní simulační model – výsledky 46

4.3.5 Volba vyhovujícího systému 49
5 VYPRACOVÁNÍ MATEMATICKÉHO MODELU 51
5.1 NÁKLADOVÉ POLOŽKY 52
5.1.1 Pracovní síla 52
5.1.2 Logistika a ubytování 53
5.1.3 Materiál 54
5.1.4 Technologie 55
5.1.5 Finanční náklady 55
5.2 EKONOMICKÝ MODEL 56
5.3 MATEMATICKÝ MODEL 60
5.4 ŘEŠENÍ ÚLOHY V MPL FOR WINDOWS 65
6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A IMPLEMENTACE 70
6.1.1 Přínos do praxe 73
ZÁVĚR 75
LITERATURA 76
PŘÍLOHY 77

Úvod

Volba tématu mé diplomové práce je silně ovlivněna mým zaměstnáním ve stavební firmě. Ve společnosti pracuji po celou dobu navazujícího magisterského studia na VŠE a během této doby jsem se vždy snažil nalézt způsoby a příležitosti, jak propojit studovaný obor Ekonometrie a operační výzkum s oborem profesním, kterým je stavebnictví v oblasti vysokých průmyslových komínů a železobetonových konstrukcí.

Dosud se mi nedařilo najít procesy, na které by mohly být aplikovány metody operačního výzkumu, aby přitom měla taková aplikace reálný a zároveň dostatečně významný přínos pro firmu. Proto je pro mne tvorba diplomové práce ideálním způsobem, jak se pokusit takovou vhodnou aplikaci nalézt a využít tak metody operačního výzkumu pro vylepšení procesů ve firmě. Zároveň mi téma Simulační modely a optimalizace při projektovém řízení umožnilo aplikovat hned tři různé obory operačního výzkumu na různé procesy jedné konkrétní zakázky. Hlavním motivem této práce tak je nalézt možnosti aplikace nabytých teoretických znalostí v profesní praxi. Diplomová práce je proto silně zaměřena na praktickou část, která je také smyslem tvorby této práce.

Přesto je však samozřejmě třeba uvést alespoň teoretické základy, na kterých jsou aplikace metod operačního výzkumu postaveny. Úvodní kapitola se tedy zabývá právě těmito teoretickými základy. V první části této kapitoly je představeno projektové řízení, v jehož prostoru se celá práce pohybuje. Dále je popsána teorie grafů jako jedna z disciplín operačního výzkumu a zároveň jako základ právě pro řízení projektů. Druhá část úvodní kapitoly se zabývá nejprve teorií operačního výzkumu obecně, a poté jednou z jeho disciplín, matematickým programováním. Právě matematické programování je totiž využito pro optimalizaci v praktické části práce. V části teoretické je tedy popsán proces tvorby matematického modelu a následně jeho řešení. První kapitola a tak i teoretická část je zakončena stručnou teorií simulačního modelování a popisu pravděpodobnostních rozdělení, která jsou v simulačním modelu v praktické části práce využity.

Smyslem druhé kapitoly je již uvést praktickou část práce. Kapitola tak představuje téma a cíle práce, problematiku prostředí, základní parametry zkoumané zakázky a zdroj vstupních dat.

Praktická část práce následně pokračuje třemi kapitolami, které popisují proces tvorby a vyhodnocení jednotlivých modelů. Třetí kapitola se věnuje tvorbě projektu, popisu jednotlivých jeho částí a vyhodnocení výsledku. Důležitou částí této kapitoly jsou její přílohy 3-1 a 3-2 uvedené v sekci Přílohy na konci této diplomové práce. Nejdelší kapitolou je kapitola čtvrtá. Ta se věnuje simulačnímu modelu jedné z kritických částí projektu. Nejprve je tedy specifikován problém, poté vytvořen a popsán simulační model a po získání výsledků jsou tyto podrobně popsány, aby mohly být vyvozeny závěry. Poslední části kapitoly se

věnují alternativním modelům a úvahám nad zobecněním modelu pro jiné projekty. Optimalizace jako poslední část trojice aplikovaných disciplín je obsažena v kapitole 5. Matematické programování je zde využito k optimalizaci celkových nákladů projektu v závislosti na rozhodnutích učiněných zhotovitelem. Zahnuty jsou do optimalizace pouze ty náklady, které mohou být změněny, či alespoň mohou mít vliv na optimální řešení. Nejprve jsou podrobně popsány nákladové položky, které budou do modelu zahrnuty, s jejich pomocí je poté sestaven ekonomický model. Matematický model je vytvořen ve třetí části této kapitoly a jeho řešení a popis zvolené strategie ve čtvrté.

Poslední kapitola diplomové práce shrnuje všechny dosažené výsledky všech modelů a zabývá se jejich implementací do zkoumaného reálného projektu. Jsou zde popsány konkrétní překážky zavedení modelů, ale také reálné přínosy, kterých bylo dosaženo. Dříve definované cíle práce jsou vyhodnoceny.

1 Teorie užitá v práci

Řešení praktického příkladu v této diplomové práci vyžaduje užití tří různých oblastí operačního výzkumu. První oblastí je řízení projektů, které umožňuje získat komplexní představu o projektu, jeho době trvání, potřebných zdrojích a tzv. kritických činnostech. Druhou oblastí operačního výzkumu využitou v této práci jsou tzv. simulační modely. Pomocí vytvořeného simulačního modelu je řešitel schopen pozorovat simulaci realizace části projektu a tím fungování navrženého systému vertikální dopravy v průběhu výstavby. Jedná se tak o velice užitečný nástroj pro určení optimálního počtu výtahů a vyloučení rizika zpoždění realizace či zbytečně vysokých nákladů. Poslední využitou oblastí operačního výzkumu je matematické programování. Díky matematickému programování může řešitel určit optimální strategii pro minimalizaci celkových nákladů a tak maximalizaci hospodářského výsledku z realizace projektu.

Všechny tři použité oblasti jsou v této kapitole stručně představeny.

1.1 Řízení projektů

Řízení projektů je jedním ze zásadních nástrojů moderního podnikání. Systém projektového řízení je stále více uplatňován ve firmách v podstatě všech zaměření. Lze se s ním setkat nejčastěji ve firmách výrobních, stavebních, marketingových, mediálních, v různých agenturách, ale prakticky také v jakýchkoli dalších společnostech.

V teoretické rovině se jedná o jeden z typů aplikace teorie grafů[1]. Řízení projektů totiž vychází ze souboru činností a jejich vzájemných návazností, kdy mohou být jak činnostem, tak vztahům mezi nimi přiřazovány různé vlastnosti. Cílem řízení projektů je získat co nejdokonalejší přehled o časovém plánu projektu, získat informaci o optimální alokaci dostupných zdrojů, umět správně reagovat v případě neočekávaných událostí, případně dokázat se na nečekané změny co nejlépe připravit.

1.1.1 Základní pojmy projektového řízení

Skutečně základním pojmem projektového řízení je projekt. Obecně se samozřejmě jedná o pojem nesmírně široký, v kontextu projektového řízení jej však lze vnímat jako plán, návrh, řešení či model určitého systému, přičemž lze tímto pojmem označit nejen statický výsledek, ale také samotný proces plánování a řízení činností a ostatních prvků daného systému.

[1] Jak uvádí [5], kde jsou dostupné také další informace o teorii grafů.

Nezbytnou součástí projektu však musí být některé základní stavební prvky, jako jsou definované činnosti a začátek a konec projektu. Kromě těchto prvků projekt často obsahuje také charakteristické znaky, kterými mohou být dostupné zdroje, různé pracovní či provozní doby, bližší informace o době trvání jednotlivých činností, náklady, očekávané přínosy z realizace projektu apod.

Důležitými charakteristikami projektu je jeho dočasnost a jedinečnost. Každý projekt existuje pouze v určitém časovém období a nikdy se nemůže opakovat. I velmi podobné projekty budou vždy alespoň částečně odlišné, ať již proto, že na projektu pracuje jiný tým lidí, či proto, že je projekt realizován v jiném prostředí, v jinou dobu či s jinými zdroji. Z tohoto důvodu nelze za projekt označit opakované činnosti či procesy v podniku.

Pojem řízení projektů pak shrnuje jednotlivé fáze tvorby a zpracování projektu a to od plánování a přípravy, přes analýzu a vyhodnocení až ke kontrole, případné optimalizaci jednotlivých částí projektu, jako jsou činnosti a zdroje, a závěrečnému vyhodnocení projektu. Podrobnější popis obsahové náplně těchto fází projektu je možné nalézt v [3].

1.1.2 Využití projektového řízení

Jak bylo zmíněno již v úvodu této podkapitoly, řízení projektů je možné využít ve společnostech prakticky libovolného zaměření. Kromě korporátního uplatnění je však projektové řízení v menší míře využíváno také v soukromé sféře při plánování významnějších událostí, jako může být rekonstrukce či stavba rodinného domu svépomocí, stěhování, velká svatba a podobně.

Pravděpodobně nejčastějším využitím řízení projektů je oblast stavebnictví. Lze s jistotou prohlásit, že žádná větší stavba se v dnešní době bez projektového řízení neobejde a zároveň je kvalitní projektové řízení často rozhodujícím faktorem pro úspěch celé stavby. Tato diplomová práce je zaměřena právě na oblast stavebnictví a význam řízení projektů je názorně popsán v hlavní praktické části práce.

Typickými aplikacemi projektového řízení napříč všemi oblastmi jsou například:

- Stavební projekty všech zaměření, tj. výstavby, rekonstrukce, opravy, demolice apod. Komplexní projekty či projekty dílčích fází jako je příprava, realizace, financování, kolaudace atd.
- Modernizace, inovace, expanze, restrukturalizace společností, zařízení nebo areálů bez přerušení stávajícího provozu.
- Vědecké projekty s konkrétním zaměřením a vymezeným časovým plánem, například testy a zkoušky, vesmírné projekty, jedinečný lékařský zákrok apod.
- Vývoj, výroba a distribuce nových produktů; více dílčích projektů pro všechny fáze vč. uvedení na trh a marketingových plánů a reklamních kampaní.
- Organizace konferencí, veletrhů, vícedenních společenských či jiných akcí.

- Marketingové a jiné průzkumy, sběr dat, kampaně.

Nejčastěji využívaným softwarovým nástrojem pro práci s projekty je program Microsoft Project. Jedná se o program, který umožňuje tvorbu a správu projektů, sledování plnění plánu, využití zdrojů, nabíhání nákladů atd., tedy komplexní řízení projektů. Výhodou tohoto programu je jakási univerzálnost, kdy je možné připravit pouze rychlý časový plán stejně jako komplexní projekt s ohromnými možnostmi. Projekt zkoumaný v této diplomové práci je vytvořen právě v tomto programu, který může být součástí kancelářského balíku Microsoft Office. Více informací je možné nalézt na [12], nebo v rámci kurzu Manažerská informatika 2 vyučovaného na Fakultě mezinárodních vztahů Vysoké školy ekonomické v Praze.

1.1.3 Teorie grafů – síťový graf

Harmonogramy projektů se často znázorňují jako grafy tvořené uzly a hranami. Uzly jsou často zobrazeny jako kolečka, do kterých lze vepsat název uzlu, jeho označení, či různé další údaje. Hrana je pak spojnicí dvou uzlů a také k ní mohou být přiřazeny různé údaje.

Pokud lze hranu interpretovat jako cestu mezi dvojicí uzlů, může být tato cesta obousměrná či pouze jednosměrná. V případě, že hrana neumožňuje cestu oběma směry, jedná o tzv. orientovanou hranu a směr orientace je graficky znázorněn šipkou. Hrana umožňující cestu oběma směry je pak nazvána neorientovanou a značí se pouze úsečkou.

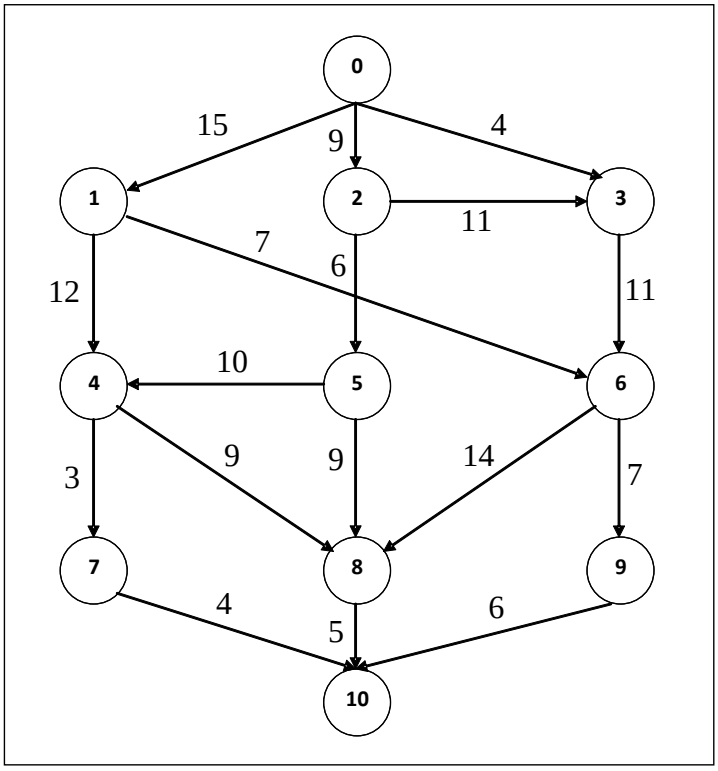
Prakticky všechny netriviální grafy sestávají z více než dvou uzlů. V těchto grafech lze nalézt cestu i mezi takovými dvěma uzly, které nejsou spojeny přímou hranou. Pak je třeba z jednoho bodu do druhého cestovat přes další uzly. Cesta mezi takovými dvěma uzly je pak dána posloupností navazujících hran. V případě, že tyto hrany jsou orientované a cesta jejich orientaci respektuje, pak se tato nazývá orientovanou cestou v grafu. Pokud cesta tuto orientaci nerespektuje, případně pokud hrany orientované nejsou, pak je nazvána neorientovanou. Jestliže mezi každými dvěma uzly v grafu existuje alespoň neorientovaná cesta, pak je tento graf tzv. souvislý, jak definuje např. [5].

Uzly i hrany mohou nést různé informace, jak bylo naznačeno v úvodu této části. Tyto informace samozřejmě závisí na tom, co graf představuje, často ale reprezentují vzdálenosti, kapacity, čas, náklady apod. Pokud jsou tyto informace přiřazeny hranám, označuje se graf jako hranově ohodnocený. V uzlově ohodnoceném grafu jsou naopak údaje přiřazeny uzlům.

Grafy mohou mít také koncové uzly nazvané vstup a výstup. Vstup je takový uzel, do kterého nevstupuje žádná hrana (všechny hrany spojené s tímto uzlem jsou orientovány směrem z uzlu), výstup je uzel, ze kterého naopak žádná hrana nevystupuje.

Graf, který je orientovaný, souvislý, nezáporně ohodnocený a má vstup i výstup se nazývá síť neboli síťový graf. Právě síťové grafy jsou častým grafickým znázorněním projektů. Následující obrázek 1-1 je příkladem jednoduchého síťového grafu:

Obrázek 1-1 Příklad hranově ohodnoceného síťového grafu (vlastní zpracování)



V prostředí řízení projektů by uvedený graf představoval projekt o 17 činnostech. Každá hrana představuje jednu činnost, její hodnota by mohla být doba trvání činnosti a každý uzel pak lze interpretovat jako začátek či konec jedné nebo více činností. Stejný projekt lze také znázornit jako bodově ohodnocený graf se 17 uzly, nicméně takové zobrazení se v řízení projektů prakticky nevyužívá.

V oblasti teorie grafů existuje několik základních typů úloh[2], které mohou být řešeny právě na takovém grafu, jaký je zobrazen na diagramu 1-1. Jednou z nejobvyklejších úloh je hledání nejkratší cesty v grafu. Tato úloha se zabývá, jak název napovídá, nalezením nejkratší cesty mezi dvěma uzly, tedy například mezi vstupem a výstupem. Velmi častou praktickou úlohou tohoto typu je například rozvoz zboží od dodavatele (vstupní uzel) k odběrateli (výstupní uzel), kdy není třeba projít všemi hranami, ale stačí nalézt nejkratší posloupnost navazujících hran mezi oběma uzly. Ohodnocení hran v takovém případě může znamenat vzdálenost mezi uzly, čas potřebný pro přejezd mezi nimi, či transportní náklady.

[2] Teorie grafů není tématem této diplomové práce, jednotlivé základní typy úloh jsou proto pouze stručně představeny. Více informací vč. modelových příkladů a popsaných algoritmů k řešení jednotlivých úloh lze nalézt např. v [5].

Další obvyklou úlohou teorie grafů je nalezení optimálního spojení míst neboli minimální (příp. maximální) kostry grafu. Cílem této úlohy je vybrat z původního grafu pouze takové hrany, aby byla zachována právě jedna cesta mezi jakýmikoli dvěma uzly původního grafu a zároveň součet hodnot těchto hran byl minimální (resp. maximální). Praktickým příkladem této úlohy může být např. instalace plynového potrubí, kdy je třeba, aby potrubí vedlo do všech míst (uzlů), ale instalace je drahá a je tak žádoucí minimalizovat hodnoty hran, které mohou představovat náklady či vzdálenosti.

Posledním ze základních typů úloh jsou optimální toky v grafu. Nejobvyklejším představitelem této skupiny úloh je hledání maximálního toku sítě. V takové úloze označuje ohodnocení každé hrany její propustnost či kapacitu a představuje tak maximální počet jednotek, který lze této hraně přiřadit. Vstupní a výstupní uzel hrají v této úloze důležitou roli jako zdroj jednotek (vstup) a cílové místo jednotek (výstup). Řešením této úlohy je nalezení maximálního počtu jednotek, které lze ze zdroje do cílového místa poslat, aniž by byla překročena kapacita byť jediné hrany. V praktických příkladech může síť představovat vodovod, ropovod, kanalizaci apod.

1.1.4 Síťový graf a řízení projektů

Kromě uvedených standardních úloh teorie grafů lze síťový graf v prostředí řízení projektů dále analyzovat. V zásadě existují dvě základní metody síťové analýzy, které se liší zejména přístupem k projektu z pohledu určení dob trvání činností.

První metoda, která předpokládá pevně dané a neměnné doby trvání všech činností, se nazývá CPM, z anglického Critical Path Method, tedy Metoda kritické cesty[3]. Jedná se o deterministický matematický model, který analyzuje celkové trvání projektu. Hlavním účelem této analýzy je zjištění časových rezerv jednotlivých činností a tím i celého projektu.

Algoritmus metody CPM vychází z určení 4 dodatečných charakteristik pro každou činnost. Tyto 4 charakteristiky jsou

1. Termín nejdříve možného začátku činnosti (t_i^0),
2. Termín nejdříve možného konce činnosti (t_j^0),
3. Termín nejpozději přípustného začátku činnosti (t_i^1),
4. Termín nejpozději přípustného konce činnosti (t_j^1).

První fází výpočtu pomocí metody CPM je určení hodnot t_i^0 a t_j^0, které vychází z předpokladu, že každá činnost bude prováděna okamžitě, jakmile budou dokončeny všechny činnosti, které jí předcházejí. Hodnota těchto charakteristik vypočítaná ve výstupním uzlu představuje nejkratší možný termín dokončení celého projektu a značí se *T*.

Druhou fází je výpočet hodnot t_i^1 a t_j^1. Tyto hodnoty jsou počítány v opačném pořadí, tedy směrem z výstupu do vstupu. Nejprve se určí nejdelší přípustná doba provádění celého

[3] Podrobný popis a vzorový příklad lze nalézt v [5].

projektu, která je značena T_{pl}, a kterou lze stanovit jako větší nebo rovnu hodnotě *T*. Nejprve se tedy vypočítají nejpozději přípustné konce činností, aby nebyla překročena stanovená doba, a z nich se odvodí nejpozději přípustné začátky.

Po dokončení 2. fáze tak jsou určeny všechny 4 dodatečné charakteristiky činností. Vzhledem k tomu, že známe u každé činnosti nejdříve možný začátek, nejpozději přípustný konec a také dobu trvání, je možné ve 3. fázi metody CPM vypočítat časovou rezervu pro každou z činností.

Dle výsledných časových rezerv lze určit kritické činnosti, tedy takové činnosti, jejichž i drobné prodloužení či zdržení by mělo za následek přímé prodloužení celkové doby realizace projektu. Jedná se o činnosti s časovou rezervou rovnou $(T_{pl}-T)$. Posloupnost kritických činností se nazývá kritická cesta a jde o nejdelší cestu v síti. Zároveň je délka kritické cesty totožná s nejkratší možnou délkou realizace celého projektu.

Poslední fází metody CPM je rozbor výsledků a vyvození závěrů. Díky určení kritické cesty a kritických činností ví projektový manažer, na které činnosti je třeba se zaměřit pečlivě, aby nemohlo dojít k žádnému zpoždění. To může být vhodné, například pokud má vedoucí projektu k disposici pracovníky s různou produktivitou práce, elitní pracovníky pověří kritickými činnostmi, zatímco ostatní mohou vykonávat činnosti, které mají časové rezervy. Zároveň má po provedené analýze lepší představu o návaznosti činností a v případě, že je možné například ušetřit část nákladů za cenu prodloužení některé z nekritických činností, může to být velice vhodný nástroj jak náklady snížit.

Druhou základní metodou síťové analýzy je metoda PERT (Program Evaluation and Review Technique). Jedná se o pravděpodobnostní rozšíření metody CPM s použitím pro řízení projektů se stochastickým časovým ohodnocením. Doby trvání činností jsou spojité náhodné veličiny s neznámým pravděpodobnostním rozdělením. Vzhledem k charakteru metody a typickým praktickým úlohám, které tato metoda zkoumá, lze neznámé rozdělení aproximovat β-rozdělením. Výhodami tohoto rozdělení je unimodálnost (jeden vrchol – modus), konečné variační rozpětí a absence nutnosti symetrie hustoty pravděpodobnosti[4].

Doba trvání každé činnosti je totiž definována na intervalu $\langle a_{ij}; b_{ij} \rangle$, kde a_{ij} je nejkratší předpokládaná doba trvání činnosti *(i,j)*, neboli optimistický odhad, a b_{ij} je naopak nejdelší uvažovanou dobou trvání této činnosti, tedy pesimistický odhad. Zásadní hodnotou pro každou činnost je dále tzv. modální odhad, značený m_{ij}, neboli nejpravděpodobnější doba trvání činnosti *(i,j)*.

Postup metody PERT je zahájen konstrukcí základních charakteristik β-rozdělení, tedy střední hodnoty μ_{ij} a směrodatné odchylky σ_{ij} pro každou činnosti zvlášť. Tyto charakteristiky vychází z odhadů dob trvání a jsou konstruovány dle následujících vzorců:

[4] Obecně je teorie pravděpodobnostních rozdělení stručně popsána v části 1.3.1 této diplomové práce. Bližší informace o teorii pravděpodobnosti, stejně jako podrobnější popis β-rozdělení lze nalézt např. v [7].

$$\mu_{ij} = \frac{a_{ij} + 4m_{ij} + b_{ij}}{6},$$

$$\sigma_{ij} = \frac{b_{ij} - a_{ij}}{6}.$$

Další postup je stejný jako v případě metody CPM, kde namísto doby trvání činnosti je dosazena hodnota μ_{ij}. Kritická cesta, v tomto případě značená *M*, vyjadřuje střední (tedy nejpravděpodobnější) dobu trvání celého projektu. Tato doba trvání je totiž také spojitou náhodnou veličinou, kterou lze ve většině případů popsat normálním pravděpodobnostním rozdělením. Součtem rozptylů jednotlivých činností lze získat rozptyl této náhodné veličiny. Výsledkem je tedy popsaná spojitá náhodná veličina doby trvání celého projektu, která má normální rozdělení se známými charakteristikami a lze tedy dopočítat pravděpodobnosti dokončení projektu během zadané doby či naopak dobu dokončení při určené pravděpodobnosti.

1.2 Optimalizace

Je-li zkoumán libovolný systém, pak jeho optimalizací je myšleno nastavení takových parametrů, či zvolení takové strategie, aby výsledné fungování systému bylo optimální z pohledu sledovaných charakteristik. Tato diplomová práce se zabývá právě takovým systémem, jehož podstatou je projekt výstavby vysokého průmyslového komína a optimální fungování systému je v tomto případě minimální výše nákladů na tuto výstavbu.

Samotná optimalizace v této diplomové práci je reprezentována matematickým programováním. Tento obor patří do disciplíny nazvané operační výzkum, do které spadá také řízení projektů či simulační modelování a široká škála dalších oborů.

Základním nástrojem této disciplíny, jak uvádí např. [5], je matematické modelování. Jak již napovídá samotný pojem, matematické modelování využívá matematické postupy při práci s modelem. Model je pak v tomto případě obrazem zkoumaného systému, vytvořeným tak, aby bylo možné s ním dále pracovat potřebným způsobem. Jedním z nejdůležitějších a zároveň nejsložitějších úkolů matematického modelování je tak vytvoření modelu dostatečně přesného, aby jeho chování plně odpovídalo zkoumanému systému, ale zároveň dostatečně zjednodušeného, aby vůbec bylo možné systém podrobit optimalizaci pomocí matematického modelování.

Právě správná konstrukce modelu je hlavní částí celého řešení rozhodovacího problému. Tento proces řešení je obvykle rozdělen do pěti fází. První fází je rozpoznání a definice problému. V reálném příkladu se tedy jedná hlavně o to, umět nalézt problém (či příležitost k optimalizaci) a všechny faktory, které s ním souvisí, případně i jeho příčiny.

Druhou fází je konstrukce ekonomického modelu. Jedná se o slovní popis zkoumaného systému se zaměřením se na problém. Je třeba definovat celý problém, neboť vynechání

některých souvisejících problémů či omezení může způsobit, že celý model včetně jeho řešení bude zcela nepoužitelný pro zkoumaný systém.

Konstrukce samotného matematického modelu je třetí fází rozhodovacího procesu. V této fázi již jsou slovní zadání a definice transformovány do matematických výrazů, rovnic a nerovnic, případně do grafů či diagramů. Také v této fázi je možné opomenout některé faktory, které mohou mít vliv na optimalizaci systému, neboť konstrukce matematického modelu, ačkoli má pevně daná pravidla, obsahuje také velkou dávku subjektivní kreativity a je možné stejný problém řešit různými přístupy a tak různými matematickými modely. Toto se většinou netýká celkového pojetí problému, jako spíše některých jeho částí, kdy dva řešitelé mohou k problému přistoupit různě a přesto získat stejné, tedy optimální, výsledky.

Čtvrtou a předposlední fází rozhodovacího procesu je řešení úlohy. Matematická teorie přinesla mnoho různých algoritmů pro řešení specifických i obecných matematických modelů, nicméně je pravdou, že v současnosti samotné řešení modelu probíhá spíše na počítači za pomoci specializovaných softwarů. Pro řešitele tedy tato fáze z velké části spočívá v dobré znalosti jednotlivých programů a správném převedení matematického modelu do jejich prostředí. Přesto stále existují skupiny úloh, které nelze řešit ani za použití nejmodernějších technologií a software. Mezi tyto úlohy mohou patřit například složité celočíselné úlohy[5]. V případě, že není možné nalézt optimální řešení, lze využít heuristické algoritmy pro dosažení alespoň dostatečně dobrého výsledku. Tyto heuristické metody jsou často nejvhodnějším řešením složitých problémů (např. problém obchodního cestujícího[6]).

Poslední a opět velice složitou fází je interpretace výsledků a jejich verifikace. Jedná se v podstatě o opačný proces než v prvních třech fázích, kdy je třeba z číselných a grafických výsledků převést informace na závěry podané slovy a to tak, aby byly jasné i zadavateli, tedy osobě, která samotné matematické modelování vůbec nemusí znát. Během tohoto převodu je však kromě přímých odpovědí na prvotně zadané otázky také nutné provést případné analýzy a vyhodnocení ostatních ukazatelů modelu, které mohou napovědět dodatečné informace o fungování systému a vzájemných vlivech jeho dílčích částí.

Verifikací modelu se rozumí ověření všech výsledků analýzy z pohledu správnosti i reálnosti. Je tedy třeba se přesvědčit, že výsledky nejen nabývají přibližně správných hodnot, ale také že dávají smysl (tedy například nezápornost či celočíselnost, hodnoty přibližně odpovídající zkušenostem či odhadům apod.). Vzhledem k charakteru tohoto oboru může být malá a na první pohled zcela nepatrná chyba pro celý model zcela zničující. Pokud tedy mají být výsledky z modelu implementovány do praxe, musí si být analytik stoprocentně jist jejich správností.

[5] Více informací o diskrétních modelech je možné nalézt v [11].
[6] Jako okružní dopravní problém popsáno např. v [5].

1.2.1 Matematické programování

V této diplomové práci je využito nebo alespoň krátce popsáno několik samostatných disciplín operačního výzkumu. V předchozích částech byla přiblížena teorie grafů a řízení projektů. V částech následujících budou popsány simulační modely. Cílem této práce však není popis jednotlivých oblastí operačního výzkumu, proto se ostatním disciplínám jako je teorie her ([2]), vícekriteriální rozhodování ([4]), teorie zásob ([8]), teorie hromadné obsluhy ([8]), modely obnovy ([8]) a markovské rozhodovací procesy ([5], [8]) věnovat dále nebude.

Naopak je třeba alespoň vysvětlit základní principy disciplíny, která se nazývá matematické programování a dá se se dále klasifikovat na lineární a nelineární programování. Lineární programování bývá v některých publikacích (např. [3]) označováno za základ operačního výzkumu. Principem této disciplíny je hledání optimálního řešení úlohy jako extrému kriteriální funkce *n* proměnných na konečné či nekonečné množině variantních řešení, která je definována pomocí soustavy zadaných omezujících podmínek. Tyto omezující podmínky jsou zadány ve formě rovnic či nerovnic. V případě, že jsou všechny funkce úlohy lineární, pak se jedná o úlohu lineárního programování, v opačném případě je úloha nelineární a nalezení optimálního řešení může být mnohem složitější, nebo dokonce nemožné. Cílem je tedy optimalizovat (tj. minimalizovat či maximalizovat) hodnotu zadané účelové funkce pomocí nastavení všech proměnných tak, aby byly splněny všechny omezující podmínky.

Podoba matematického modelu obecné úlohy matematického programování může mít následující podobu:

$$
\begin{aligned}
&\text{Optimalizovat}^{7} && f(x_1, x_2, \dots, x_n)\,, \\
&\text{za podmínek} && g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0\,, \\
& && g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0\,, \\
& && \dots \\
& && g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0\,, \\
& && x_j \geq 0\,; \qquad j = 1, 2, \dots n\,.
\end{aligned}
$$

V uvedeném modelu představuje *n* celkový počet proměnných x_j, *m* celkový počet omezujících podmínek (s výjimkou tzv. podmínek nezápornosti, případně celočíselnosti[8],

[7] V závislosti na vytyčeném cíli analýzy lze hodnotu účelové funkce maximalizovat, či minimalizovat. Pokud například funkce ***f(x)*** představuje celkové náklady, bude s největší pravděpodobností žádoucí účelovou funkci minimalizovat (a minimalizovat tak celkové náklady), pokud se naopak bude jednat o zisk, funkce bude nejspíš maximalizační (neboť bude snaha zisk maximalizovat).

[8] Celočíselné lineární programování je velmi důležitou oblastí lineární optimalizace, tyto úlohy se totiž v praxi vyskytují velmi často, a to buď ve formě úloh s obecnými podmínkami celočíselnosti, nebo jako bivalentní úlohy. Bivalentní programování pracuje na ještě menším prostoru než programování celočíselné. Proměnné v matematickém modelu, vyjadřující procesy v reálném problému, totiž mohou nabývat pouze dvou hodnot – 0 nebo 1. Jedná se tedy o zpřísnění podmínek celočíselnosti, kdy hodnota proměnné neuvádí počet realizací daného procesu, ale pouze to, zda je proces realizován či nikoli. Největším problémem celočíselných úloh je jejich výpočetní náročnost. Jakmile přidáme k nějaké neceločíselné úloze podmínky celočíselnosti, obtížnost nalezení řešení se tím několikanásobně zvýší. S výpočetní náročností však roste také náročnost časová, proto i se současnými technickými prostředky může řešení obsáhlé celočíselné úlohy trvat několik dnů či týdnů,

které jsou uvedeny na posledním řádku modelu) a funkce $f(\boldsymbol{x})$ a $g_i(\boldsymbol{x})$ (kde $i=1, 2, ..., m$) jsou obecné funkce proměnných modelu; $f(\boldsymbol{x})$ jako účelová neboli kriteriální funkce a $g_i(\boldsymbol{x})$ jako funkce představující omezující podmínky.

Jednou z výhod lineárního programování je jeho velká flexibilita, kdy lze pomocí rovnic a nerovnic vytvořit mnoho různých zvláštních podmínek, které reálný problém vyžaduje. Existuje několik typických kategorií[9] lineárního programování, které se liší právě těmito zvláštními podmínkami či přístupem k řešení úlohy.

První kategorií jsou úlohy výrobního plánování, které se většinou zaměřují na optimalizaci procesu výroby s ohledem na maximální zisk či minimální náklady. Optimalizaci v kapitole 5 této diplomové práce lze přiřadit právě do této kategorie.

Další kategorií jsou úlohy finančního plánování, které se zabývají optimalizací portfolia. Dále plánování reklamy, které většinou maximalizuje různé marketingové ukazatele pomocí reklam v různých médiích a četnostech. Další často využívanou kategorií je tzv. nutriční problém, který řeší poskládání výživy tak, aby splňovala minimální i maximální nutriční hodnoty. Směšovací problém je další kategorií, která se zabývá optimálním poskládáním surovin tak, aby výsledek odpovídal požadavkům. Úloha o dělení materiálu je velmi odlišná pojetím problému a tvorbou ekonomického i matematického modelu, kdy proměnné jsou reprezentací všech možných způsobů dělení materiálu a cílem je stanovit optimální četnosti těchto způsobů; jedná se tak o úlohu celočíselného programování. Další významnou kategorií je rozvrhování pracovníků na směny či úkoly, kde se dá očekávat větší počet proměnných a omezujících podmínek; tato úloha je také celočíselná, často bývá bivalentní. Poslední a zároveň jednou z nejvýznamnějších kategorií lineárního programování jsou distribuční úlohy, které sice vychází ze stejných principů lineárního programování, ale způsob tvorby matematického modelu je velmi odlišný a přístup k řešení je proto také specifický, mimo jiné také proto, že distribuční úlohy lze dělit na další podkategorie.

1.2.2 Řešení úloh matematického programování

K řešení úloh lineárního programování byly vyvinuty různé algoritmy. Nejrozšířenějším je zcela jistě simplexová metoda. Jedná se o metodu iterační, která systematicky prohledává množinu základních přípustných řešení úlohy tak, že v každé iteraci je schopna nalézt lepší řešení než v té předchozí (pokud takové existuje). Jakmile již nelze nalézt lepší řešení, lze vyvodit závěr, tedy buď bylo nalezeno jedno či více optimálních řešení, nebo takové řešení neexistuje.

pokud se řešení vůbec podaří nalézt. A to i u úloh, které by se bez podmínek celočíselnosti podařilo vyřešit během několika sekund. Více informací o celočíselných modelech je možné nalézt například v [11].

[9] Jak uvádí [5]. Pro účely této práce není třeba věnovat se jednotlivým kategoriím zvlášť, následuje tedy pouze jejich výčet.

Simplexová metoda umožňuje analytikovi ruční výpočet stejně jako využití počítačových programů, které podle tohoto algoritmu také postupují. Zároveň její výsledky podávají dodatečné informace o optimálním nastavení systému, což umožňuje provádět post optimalizační analýzu a odvodit chování systému v případě, že některé ze základních parametrů budou změněny, nebo přímo tyto změny provádět bez nutnosti opakování postupu hledání optimálního řešení.

Je důležité zmínit, že algoritmus simplexové metody řeší pouze neceločíselné úlohy. V případě, že je úloha celočíselná, je nutné optimální řešení dodatečně hledat jinou metodou, např. Gomoryho metodou, či metodou větví a mezí. Obě metody stejně jako další podrobnější informace k celočíselnému programování je možné nalézt v [10] a [11].

Reálné úlohy lineárního programování jsou prakticky výhradně řešeny pomocí počítačových programů, neboť i pro úlohy relativně malého rozsahu by se ruční výpočet bez počítače stal velmi zdlouhavým. K řešení těchto úloh lze využít celou řadu softwarových produktů. Velmi dobrý výběr spolu s instrukcemi pro použití a praktickými příklady uvádí například [6].

V souladu s uvedenou publikací a s výukou vedenou na VŠE lze doporučit zejména 4 produkty. Prvním je MS Excel a jeho stahovatelný doplněk Solver (v některých verzích česky jako Řešitel). Jedná se o nejdostupnější a nejjednodušší nástroj v případě, že analytik nemá k disposici specializovaný software, zároveň je však velice univerzální a je možné jej využít jak pro celočíselné programování tak dokonce programování nelineární. Program je také schopen vypracovat výsledkovou, citlivostní a limitní zprávu, což umožní provádět post optimalizační analýzu a dále s daty pracovat.

Dalším nástrojem, který je již více specializovaný na jednotlivé typy problémů, je výukový systém LPPro vyvíjený na VŠE. Jedná se o aplikaci pro MS Access, která je schopna řešit následující problémy:

- Simplexová metoda
- Dopravní problém
- Úlohy s dolními a horními mezemi proměnných
- Parametrické programování
- Celočíselné programování (využívá Gomoryho metodu)
- Vícekriteriální optimalizace

Dalším doporučeným programem je již profesionální software LINGO. Tento software má vlastní modelovací jazyk a podporuje import dat z externích souborů (např. z MS Excel). Obsahuje tři vlastní řešitele, z nichž je vždy použit ten nejvhodnější pro daný typ úlohy, tedy buď lineární optimalizace, nelineární optimalizace, nebo celočíselné úlohy. Více informací o tomto software a možnostech jeho získání je možno nalézt na [14].

Posledním doporučeným nástrojem a zároveň nástrojem, který je využit pro optimalizaci v této diplomové práci, je MPL for Windows. MPL for Windows je

optimalizační software, který umožňuje řešení úloh (nejen) matematického modelování. Systém obsahuje vlastní modelovací jazyk, takže uživatel může vytvořit obecný model a všechna konkrétní data načíst z externího souboru. To je velká výhoda zejména díky snadnému spojení s MS Excel. Tento nástroj nemá vlastního řešitele, ale využívá moduly jiných společností. Ve skutečnosti se nejedná o nevýhodu, neboť řešitelé, které program využívá, patří k nejlepším existujícím řešitelům. Konkrétně se jedná například o CPLEX, Gurobi nebo Lindo, které využívá také software Lingo. Informace o tomto systému a také možnost ho získat může čtenář nalézt na webové stránce [15].

1.3 Simulační modely

Simulace je pojem, který má mnoho různých významů a použití, které závisí na kontextu, v jakém je tento pojem užit. V zásadě se však vždy jedná o uměle vytvořený stav, který má za cíl zobrazit či nahradit stav jiný, kterého není možné či žádoucí dosáhnout.

V prostředí operačního výzkumu je tímto umělým stavem tzv. simulační model a simulace představuje způsob, jak sledovat fungování vybraných parametrů reálného systému, který, jako vše v reálném světě, podléhá náhodným vlivům. V [1] je simulace definována jako „numerická metoda studia složitých pravděpodobnostních dynamických systémů pomocí experimentování s počítačovým modelem“.

Příklady náhodných vlivů v reálném systému mohou být nepravidelné příchody zákazníků do obchodu, náhodná chybovost vyráběných dílů, nepravidelné výpadky některých částí systému, odchylky v časech cest či přesunů a nespočet jiných možných dílčích prvků systému. V reálném světě je však nemožné přesně předpovědět hodnoty a výsledky těchto náhodných vlivů. Nelze tak s jistotou určit, jak má být nastaven systém, aby fungoval co nejlépe, a aby nedocházelo k nežádoucím jevům. V takovém případě je ideálním přístupem simulace.

Díky simulačnímu modelu může řešitel pozorovat chování systému i jeho dílčích prvků a to během libovolného množství nezávislých pokusů, v nichž je systém ovlivněn různými pseudonáhodnými čísly[10]. Zkoumaný systém je namodelován na počítači a poté opakovaně simulován s použitím pseudonáhodných čísel. Po proběhnutí dostatečného množství simulací lze určit zkoumané statistické ukazatele a různé pravděpodobnosti, a tak předvídat chování reálného systému.

[10] Pseudonáhodná čísla jsou taková čísla, která jsou zdánlivě náhodná, přesto však vychází z určitého vzorce či algoritmu. Jsou využívána zejména v počítačových aplikacích, jako jsou například právě simulace, kde nahrazují náhodná čísla. Žádný počítač totiž nedokáže vytvořit skutečně náhodné číslo, neboť principem počítače je řízení se určeným postupem, což absolutní náhodu vylučuje. K determinaci pseudonáhodných čísel tedy slouží různé algoritmy, založené například na dříve uvedených hodnotách pseudonáhodných čísel, na aktuálním času, či jiných zaznamenaných stavech. Pseudonáhodná čísla tedy tvoří sekvence čísel, a jako taková se proto po určité době opakují. V případě kvalitního generátoru pseudonáhodných čísel (tj. metody pro determinaci čísel) obsahuje takový cyklus obrovské množství pseudonáhodných čísel a pro účely počítačových aplikací tak zcela dostatečně nahrazuje dokonale náhodná čísla.

Tím, jak se posouvají možnosti počítačových technologií, zdokonalují se také počítačové programy pro práci se simulačními modely. V současnosti je simulačních programů a modelovacích nástrojů hned několik a pouze simulační analytik, který s daným software bude pracovat, se může rozhodnout, zda bude raději využívat bohatší možnosti vlastního programování, či rychlejší a plynulejší práci, nebo například přívětivější rozhraní a s tím související snazší a působivější prezentaci výsledků objednateli.

Simulační model v této diplomové práci je vypracován v programu Simul8 na studentské licenci patřící VŠE. Jedná se o software, který umožňuje vytvářet kompletní simulační modely přehledně a pohodlně. Je to vhodný nástroj pro plánování, navrhování či optimalizaci reálných procesů a výrobních, logistických či jiných systémů. Více informací je možné nalézt na [13].

1.3.1 Pravděpodobnostní rozdělení

Tématem této diplomové práce není teorie pravděpodobnosti, nicméně pro vytvoření simulačního modelu a nastavení jeho parametrů je třeba znát alespoň základy této teorie. Podrobnější informace o teorii pravděpodobnostních rozdělení lze nalézt v [7]. Některé prvky simulačního modelu totiž podléhají náhodě, jedná se tedy o náhodné veličiny a těmto veličinám je třeba nastavit správná pravděpodobností rozdělení na základě jejich reálných charakteristik.

Pravděpodobnostní rozdělení slouží k popsání vlastností náhodných veličin tak, aby bylo možné s těmito veličinami dále pracovat. Náhodná veličina s určitým pravděpodobnostním rozdělením totiž může být modelována a simuluje tak náhodné jevy v reálném systému. Je proto důležité, aby bylo rozdělení vybráno tak, aby co nejlépe popisovalo skutečnost. Konkrétní náhodné veličiny mohou být například doby intervalu mezi příchody jednotek do systému, doby trvání obsluhy či nastavení hodnoty štítku přiřazeného entitě.

V simulačním modelu, který je součástí této práce, je nastaveno několik vlastních diskrétních rozdělení s jasně definovanými četnostmi. Kromě toho se v modelu vyskytují celkem 3 různá spojitá pravděpodobnostní rozdělení, konkrétně se jedná o normální rozdělení, rovnoměrné rozdělení a exponenciální rozdělení.

Normální rozdělení, někdy nazývané Gaussovo, bývá označováno jako rozdělení chyb, neboť se právě pro popis výskytu náhodných chyb používá. V simulačním modelu této práce je normální rozdělení využito pro generování intervalů mezi příchody jedné z entit. V takovém případě samozřejmě nesmí docházet k výběru záporných hodnot, což je však v modelu splněno, neboť střední hodnota tohoto rozdělení je dostatečně vysoká a směrodatná odchylka dostatečně nízká. Parametry normálního rozdělení jsou tedy střední hodnota $E(x) = \mu$ a rozptyl $D(x) = \sigma^2$.

Hustota pravděpodobnosti, jinak zvaná Gaussova křivka, je:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} .$$

Rovnoměrné rozdělení je charakteristické jednoduchou funkcí hustoty, která nabývá pouze dvou hodnot. Díky tomu je toto rozdělení velice vhodné pro obecné generování náhodných čísel, což lze následně využít i pro generování čísel jiných pravděpodobnostních rozdělení. Rovnoměrné rozdělení má dva parametry, které tvoří hranice hodnot, kterých může veličina nabývat. Tyto parametry jsou spodní hranice (minimální hodnota) a a horní hranice (maximální hodnota) b.

Hustota pravděpodobnosti rovnoměrného rozdělení je:

$$f(x) = \frac{1}{(b-a)} \; ; \quad x \in \langle a, b \rangle ,$$
$$f(x) = 0 \qquad ; \quad jinak .$$

Distribuční funkce rovnoměrného rozdělení je dána předpisem:

$$F(x) = 0 \; ; \quad x \leq a ,$$
$$F(x) = \frac{(x-a)}{(b-a)} \; ; \quad x \in \langle a, b \rangle ,$$
$$F(x) = 1 \; ; \quad x \geq b .$$

Střední hodnota je aritmetickým průměrem obou parametrů, tedy $E(x) = (a+b)/2$, rozptyl $D(x) = (b-a)^2/12$.

Poslední popsané rozdělení, exponenciální, má velký význam jak z historického hlediska, tak z pohledu simulačního modelování. Bylo a dosud je tímto rozdělením popisováno mnoho náhodných veličin, jako je například doba životnosti strojů či délka telefonního hovoru (podobné příklady lze nalézt v [7]). Je však třeba říci, že toto rozdělení takzvaně „nemá paměť“, což znamená, že pravděpodobnost, že nastane zkoumaný jev v určitém čase, nezávisí na tom, jak dlouho předtím již tento jev nenastal. Toto rozdělení je tak vhodné pouze pro některé náhodné veličiny. Zároveň se jedná o jedno z nejčastěji používaných rozdělení v simulačních modelech, neboť je velmi vhodné právě pro generování intervalů mezi příchody nových jednotek. Parametr tohoto rozdělení je λ a představuje intenzitu příchodů, tedy počet příchodů za jednotku času. Z hlediska intervalů mezi dvěma po sobě následujícími příchody je tedy zajímavější inverze tohoto parametru na tvar $1/\lambda$.

Hustota pravděpodobnosti je:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}\ ;\quad x > 0, \lambda > 0\ ,$$
$$f(x) = 0\qquad ;\quad jinak\ .$$

Distribuční funkce exponenciálního rozdělení je:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}\ ;\quad x > 0\ ,$$
$$F(x) = 0\qquad ;\quad jinak\ .$$

Střední hodnota je tedy průměrný interval mezi příchody $E(x) = 1/\lambda$, rozptyl je potom $D(x) = 1/\lambda^2$.

2 Projekt výstavby průmyslového komína

Touto kapitolou začíná praktická část diplomové práce. Jejím předmětem je reálný projekt výstavby železobetonového průmyslového komína výšky 200 m v elektrárně v Egyptě z pohledu zhotovitele této zakázky. Tím je česká stavební společnost střední velikosti, která o realizaci tohoto projektu soutěží. Autor této diplomové práce je zaměstnancem společnosti na pozici vedoucího zahraničního obchodu.

Cílem této kapitoly je nejprve představit téma a cíle práce, dále použitá vstupní data včetně informací o zhotoviteli, a nakonec konkrétní informace o samotné zakázce a její specifikace.

2.1 Téma a cíle práce

Hlavním tématem této práce je implementace simulačních modelů a optimalizace do řízení reálného projektu. Jedná se tedy o tři samostatné disciplíny operačního výzkumu aplikované na reálnou situaci, kde slouží k analýze a případné optimalizaci dílčích částí projektu.

Hlavním motivem této práce je snaha o propojení teoretických znalostí nabytých při studiu na vysoké škole s praxí v zaměstnání. Základním cílem je tedy vytvoření funkčních modelů reálného projektu, které poskytnou komplexní informace pro přípravu zakázky. Uvedené disciplíny operačního výzkumu umožňují zdokonalit přípravu zakázky z pohledu hlavních tří aspektů stavby – projektové řízení jako technická příprava zakázky, simulační modelování v rámci výrobní přípravy a optimalizace jako součást obchodní přípravy.

V rámci těchto modelů jsou dílčími cíli práce stanovení optimální realizační ceny a její srovnání s cenou dosud uvažovanou, dále nastavení optimálních výrobních i cenových podmínek ještě před zahájením realizace projektu a zajištění potřebných technologií pro systém vertikální dopravy osob a materiálu.

Z těchto důvodů je práce silně zaměřena zejména na praktickou část, neboť jejím cílem není vysvětlit danou problematiku teorií operačního výzkumu, ale právě praktická aplikace těchto disciplín na reálný problém v prostředí skutečné firmy, a tak naplnění konečného smyslu těchto teorií.

2.1.1 Vstupní data

Zhotovitelem projektu je společnost Omega-Teplotechna Praha a.s., komínářská a žárotechnická společnost. Společnost provádí komplexní stavební a technické práce v oboru

vysokých průmyslových komínů, železobetonových konstrukcí a žáruvzdorných vyzdívek pecí. V této oblasti provádí výstavby, opravy, rekonstrukce, sanace, projektování, revize a diagnostiky objektů a v oboru průmyslových komínů se jedná o největšího českého exportéra těchto prací. Více informací o společnosti Omega-Teplotechna Praha a.s. lze nalézt na jejích webových stránkách [16].

Hlavními stavbami, které společnost realizuje, jsou komíny elektráren a tepláren, ale i dalších továren či výroben, dále železobetonové nádrže a sila v cementárnách, čističkách odpadních vod a dalších areálech, a v neposlední řadě výškové železobetonové konstrukce jako jsou například schodišťové a výtahové věže, mostní pilíře a podobně.

Firma působí na tuzemském trhu i trzích zahraničních, kdy podíl zahraničních zakázek v posledních letech významně roste. Z pohledu přípravy zakázky je třeba u zahraničních projektů mnohem pečlivějšího přístupu a podrobnější analýzy po obchodní, technické i výrobní stránce.

Autor této diplomové práce je zaměstnancem společnosti a je zodpovědný za přípravu modelované zakázky. Veškerá vstupní data, která jsou poskytnuta společností Omega-Teplotechna Praha a.s., připravil, modifikoval a zpracoval za účelem této diplomové práce autor sám, v některých případech po konzultaci s výrobním či technickým oddělením firmy (například požadované počty pracovníků a jejich produktivita). Autor této práce je zároveň autorem počítačového zpracování veškerých dat, včetně plánu v MS Projectu. Pro představu o využitých vstupních datech lze uvést oblasti, do kterých tato data spadají. Jedná se o:

- Činnosti při realizaci,
- Profese a produktivitu pracovníků,
- Specifikace technologií,
- Možnosti zajištění logistiky a ubytování,
- Možnosti zajištění materiálů,
- Finanční a bankovní podmínky.

2.2 Výstavba komína M200 v Egyptě

Projekt, jehož analýzou se tato práce zabývá, je dodávka na klíč nového železobetonového komína s keramickým pouzdrem do elektrárny v Káhiře. Zhotovitel je zároveň zpracovatelem projektové dokumentace, není tedy třeba řešit některé obvyklé technické nejasnosti. Zároveň je však třeba respektovat základní rozměry komína specifikované investorem a jeho konzultantem. Vnější monolitický železobetonový dřík má výšku 200 m, konstantní vnitřní průměr 13 m a konstantní tloušťku stěny 500 mm. Vnitřní keramické ochranné pouzdro bude tvořeno segmenty výšky 20 m, které budou uchyceny pomocí nosných roštů na dřík komína, a vyzděno z tvarových žáruvzdorných cihel a

kyselinovzdorného dvousložkového zdicího tmelu v souladu s platnými normami[11]. Výška vnitřního ochranného pouzdra je 200 m a jeho konstantní vnitřní průměr 9 m. Dilatační spáry mezi segmenty pouzdra budou zaceleny pomocí kompenzátorů[12]. Součástí výstroje komína budou ocelové žebříky, stožárový výtah, vnitřní lávky a vnější ochozy, nerezová komínová hlava, elektroinstalace, denní a noční překážkové značení a hromosvod.

Zda bude realizace úspěšná, závisí na přípravě projektu. Kvalitní příprava je hlavní nosný pilíř výrobního i ekonomického úspěchu. Toto pravidlo platí ještě silněji v případě zahraničních zakázek, neboť zanedbání jakékoli části přípravy pak během realizace v zahraničí prakticky nelze napravit bez negativních následků.

Příprava zakázky probíhá ve třech rovinách – technické, výrobní a ekonomické. Každé z těchto oddělení společnosti odpovídá vedoucímu projektu za svou část přípravy. Mnoho přípravných činností však samozřejmě probíhá ve spolupráci všech oddělení, jako např. stanovení technologického postupu prací, tvorba rozpočtu, kalkulace množství použitých materiálů, zajištění subdodavatelů apod.

Technická příprava má na starosti celkovou podobu realizace zakázky, kdy je třeba zajistit, že vše bude v souladu se specifikacemi objednatele, ať po stránce harmonogramu nebo například použitých materiálů či postupů. Zároveň je třeba projekt technicky posoudit, neboť je povinností zhotovitele jakožto odborné firmy odhalit jakékoli nejasnosti či nepřesnosti návrhu stavby. V rámci technické přípravy jsou často přímo s objednatelem diskutována možná alternativní řešení dílčích částí projektu s ohledem na úsporu času či nákladů. V této práci je technická příprava reprezentována vytvořením projektu a určením kritických činností.

Obsahem výrobní přípravy je zajištění všech kapacit pro realizaci díla, tedy možných subdodavatelů, hmotných dodávek, dostatečného počtu kvalifikovaných pracovníků apod. Zároveň je na zodpovědnosti výrobní přípravy vytvořit taková výrobní řešení a postupy, aby bylo možné splnit podmínky zadavatele v rámci jeho specifikací. Příprava vertikální dopravy, tedy jedné z nejkritičtějších stránek realizace, je v této práci analyzována pomocí simulačního modelu.

Hlavní činnost obchodního oddělení probíhá před započetím podrobné přípravy, neboť účelem tohoto oddělení je zakázku zajistit a obchodně vyjednat až do podpisu smlouvy. Přesto je i po uzavření kontraktu třeba na přípravě zakázky spolupracovat. Obchodní příprava má na starosti minimalizaci realizačních nákladů v rámci limitů, které jsou stanoveny technickým a výrobním oddělením. V této práci je v prostředí již stanovených podmínek

[11] V Egyptské arabské republice se stavby tohoto typu řídí americkými normami označovanými ASTM. V případě cihel a tmelu se jedná o normy ASTM C 397, ASTM C 466 a ASTM C 980.

[12] Kompenzátory jsou využívány pro spojování jednotlivých segmentů vnitřního ochranného pouzdra. Jedná se o speciální tkaninové výrobky, které vyrovnávají pohyby jednotlivých částí pouzdra i kouřovodu, aniž by byla ohrožena jejich nepropustnost. Kompenzátory jsou vždy objednány a vyrobeny na míru a mohou dosahovat různých teplotních odolností a mechanických vlastností. Ačkoli je kompenzátor malý výrobek, je z důvodu relativní nenahraditelnosti významnou nákladovou položkou.

provedena optimalizace nákladů pomocí matematického programování. Prováděná optimalizace má vliv také na celkový počet pracovníků a zvolené materiály, tedy na výrobní i technickou část přípravy.

3 Vypracování projektu

Zásadním prvkem pro přípravu uvedeného projektu je jeho podrobné naplánování a předběžná analýza. Pro takové plánování byl zvolen software Microsoft Project 2010.

Nejzákladnějším cílem předběžného naplánování projektu je zjištění co nejpřesnější doby trvání. V případě stavebních prací v areálu elektrárny je přesný odhad doby trvání potřeba zejména z důvodu omezení běžného provozu elektrárny. Práce se často musí realizovat pouze během naplánované odstávky elektrárny, nebo je alespoň nutné optimalizovat provoz elektrárny a přizpůsobit jej omezení během provádění prací.

Neméně důležitým cílem plánování projektu je určení milníků. Tyto milníky slouží nejen jako kontrolní body při realizaci, ale mohou být výslovně vyjmenovány přímo ve smlouvě o dílo a z jejich nedodržení mohou plynout smluvní sankce.

Dalšími informacemi získanými naplánováním projektu jsou údaje o potřebných zdrojích. Zatímco množství betonu a výztuže se dá vypočítat z rozměrů komína, případně je určí projektová dokumentace, počet a rozložení pracovních sil může být různé a v závislosti na těchto pracovních zdrojích se pak liší náklady a doba výstavby. Naplánování projektu předem může pomoci určit optimální strategii.

Náklady na realizaci projektu jsou v praxi často spočítány za použití odhadů dle zkušeností. To je dáno zejména časovým presem při tvorbě nabídek, kdy získat přesnou realizační cenu je příliš časově, a proto i finančně náročné. Jakmile je však jisté, že zhotovitel bude vybrán pro realizaci, vyplatí se již přesně propočítat náklady, aby bylo jisté, zda se uvažované technické řešení vyplatí, či zda bude nutné v některých položkách náklady ušetřit.

Během realizace je dobré porovnávat skutečný průběh s plánem a kontrolovat tak dosažené náklady a termíny. Zejména pro správné dodržování milníků je průběžná kontrola zásadní.

Základní seznam činností a jejich doby trvání poskytla společnost Omega-Teplotechna Praha a.s. v podobě prostého seznamu. Autor této diplomové práce tento seznam částečně upravil a rozšířil za účelem větší přesnosti harmonogramu a dále doplnil veškeré vazby mezi činnostmi.

Informace o zdrojích v projektu pochází také od společnosti zhotovitele, tyto byly naopak pro účely vypracování projektu zjednodušeny. Použité sazby jsou reálné, nicméně nezahrnují některé související nepřímé náklady (např. ubytování a přepravu pracovníků či součinnost s dodavatelem posuvného bednění).

Po zpracování a případné úpravě veškerých obdržených podkladů naplánoval autor této diplomové práce projekt v aplikaci MS Project. Hlavní prvky a výsledky tohoto projektu jsou popsány v následujících částech této kapitoly. Pro lepší orientaci je v přílohách této

diplomové práce jako obrázek 3-1 zobrazen seznam fází a činností, obrázek 3-2 pak zobrazuje grafickou část Ganttova diagramu.

3.1 Fáze

Činnosti při výstavbě komína a jejich posloupnost vychází z použitého stavebně-technického řešení a z následného technologického postupu výstavby. Ten bývá předběžně popsán již v rámci nabídkového řízení a základní body jsou schváleny před uzavřením samotné smlouvy o dílo.

Před samotným definováním činností je vhodné rozdělit projekt do několika hlavních fází. Projekt bude mít celkem 3 fáze.

První fází je vypracování projektové dokumentace výstavby komína. Na základě této realizační projektové dokumentace bude určeno několik hlavních specifikací výrobní přípravy projektu, jako je množství, druh a kvalita použitých materiálů (zejm. beton, ocel), řešení výstroje a technologie komína (žebříky, výtahy, letecké značení,…) apod. Teprve po vypracování projektové dokumentace tedy může zhotovitel projektu závazně objednat všechny dílčí subdodávky.

Druhou fází je pak zhotovení železobetonových konstrukcí, tj. vnějšího dříku komína a vnitřních betonových konzolí, které budou nést segmenty ochranného keramického pouzdra. V této fázi je velice důležité, aby nedošlo ke zpoždění, neboť bez úplného dokončení většiny obsažených činností nelze pokračovat další fází.

Třetí fází jsou zejména dodávky a montáže ocelové výstroje komína, instalace žebříků, elektroinstalace, provedení leteckého značení komína, demontáže technologií, dokončující práce a demobilizace. Z hlediska doby trvání se jedná o nejdelší fázi, nicméně hlavní a nejdůležitější části komína jsou již dokončeny, proto již na tyto práce zpravidla není kladen takový tlak.

Na některé činnosti jsou vázány platby za provedení díla a také smluvní pokuty za nedodržení termínů. Proto jsou tyto činnosti zvlášť důležité jako milníky realizace díla. Mezi tyto milníky patří vždy konce fází a také některé dílčí činnosti.

3.2 Činnosti

Kompletní projekt sestává z 45 úkolů a milníků rozdělených do uvedených 3 skupin. Těmito skupinami jsou Vypracování projektové dokumentace, Betonové konstrukce a Vybavení komína.

Projekt je zahájen podpisem smlouvy o dílo s klientem. Tato událost je reprezentována milníkem v čase pondělí 10.8.2015 8:00. Spolu s tímto milníkem začíná také první fáze projektu.

Hlavní roli ve fázi Vypracování projektové dokumentace hraje zdroj Projektant. Ten musí dle svého rozvrhu provést všechny 4 úkoly a milníky této fáze, tj. vypracování Basic Designu[13], jeho schválení projektovým manažerem, následné vypracování Final Designu a závěrečné schválení. Všechny čtyři úkoly na sebe navazují, oba milníky počítají s časovou rezervou na prostudování před schválením. Doba trvání první fáze je přibližně 70 kalendářních dní a končí tak v úterý 19.10.2015 v 17:00.

Druhou fází jsou Betonové konstrukce. Tato nejnákladnější fáze představuje hlavní náplň díla, ačkoli časově není nejdelší. Sestává ze 13 úkolů a 8 milníků, trvá 88 kalendářních dní a během této fáze je postaven celý železobetonový dřík komína. Kromě samotných betonových konstrukcí patří do této fáze také přípravné práce a doprava technologií, mechanismů a osob na stavbu. V této fázi je také využita vazba FF[14], neboť je třeba sladit termíny dodání technologií či bednění s příjezdem pracovníků na stavbu. Úkoly v této fázi se řídí buď kalendářem Betonáž pro samotné tažení dříku, nebo Stavebním kalendářem pro všechny ostatní úkoly. Dokončení konstrukce dříku a tak i konec druhé fáze projektu je naplánován na 5.1.2016 v 9:00.

Poslední fáze, nazvaná Vybavení komína, začíná ještě v průběhu fáze předchozí, neboť dodací lhůta ocelových ochozů je 60 dnů, proto aby mohly být vyrobeny a včas dodány na stavbu, je třeba je objednat již v sobotu 14.11.2015, resp. nejbližší dřívější pracovní den, tedy v pátek 13.11.2015. Díky tomu je doba trvání této fáze přibližně 203 kalendářních dnů, když končí v pátek 3.6.2016 ve 14:00. Fáze Vybavení komína je tvořena 11 úkoly a 3 milníky, z nichž všechny úkoly se řídí kalendářem Stavební. Obsahem této fáze je instalace vnitřního ochranného cihelného pouzdra a provedení vnějšího i vnitřního vybavení komína od ochozů přes elektroinstalaci včetně nočního leteckého značení až po montáž a instalaci výtahu. V této fázi je kromě vazby FF využita také vazba SS, kdy například příprava pro montáž ochozů musí začít právě 4 dny po zahájení částečné demontáže bednění, aby mohly být umístěny kotvy a byl dostatek místa pro přípravné práce.

[13] Pojmy Basic Design a Final Design v této práci představují základní (Basic), resp. prováděcí (Final) projektovou dokumentaci. Anglické termíny jsou uváděny z důvodu odlišné specifikace jednotlivých typů a úrovní projektové dokumentace v Egyptě a v České republice, kdy v Egyptě jsou rozlišovány pouze uvedené dva typy projektu, které neodpovídají svou specifikací a rozsahem typům projektové dokumentace v ČR a nemají tedy přesný ekvivalent v českém jazyce.

[14] V plánování projektů lze definovat čtyři základní typy vazeb mezi činnostmi ([9]). Tyto typy jsou obvykle označovány zkratkami FS (Finish-Start), FF (Finish-Finish), SF (Start-Finish), SS (Start-Start). Vazba FS je asi nejobvyklejším typem vazby, kdy po skončení první činnosti může být zahájena druhá činnost. Druhým typem je vazba FF, která umožní dokončení druhé činnosti teprve po skončení činnosti první. Vazba SF zajišťuje, že druhá činnosti nebude ukončena dříve, než je zahájena činnost první a vazba SS podmiňuje již zahájení druhé činnosti zahájením té první.

Po dokončení poslední fáze následuje milník značící dokončení všech prací a úkol Demobilizace a odvoz mechanismů a vybavení. Doba trvání tohoto úkolu je odhadnuta na 7 kalendářních dní.

3.3 Zdroje

Projekt využívá celkem 9 různých zdrojů – 6 pracovních a 3 materiálové. Mezi pracovní zdroje patří Projektant, Projektový manažer, Elektrikář, Betonáři, Železáři a Zedníci. Materiálové zdroje jsou pak beton, výztuž a posuvné bednění.

Projektant je právnická osoba, která na obdobných projektech spolupracuje se zhotovitelem jako externí pracovník, a tak se řídí svým vlastním kalendářem, kdy pracuje také o víkendech. Má také nejvyšší hodinovou sazbu.

Projektový manažer je vedoucím celého projektu, a proto musí zajišťovat téměř všechny úkoly. Neexistuje pro něj pevná pracovní doba, neboť je nutné, aby byl přítomen na stavbě v různé doby i různé dny v týdnu tak, jak vyžaduje situace.

Elektrikář je pracovník, který musí být dle bezpečnostních standardů přítomen instalacím a revizím elektrozařízení na staveništi. Tento pracovník je placen hodinově za svůj dozor a není tedy nutné, aby byl přítomen u jiných činností. Z ekonomických důvodů je najat místní elektrikář, který za hodinovou sazbu provádí supervizi při realizaci vybraných úkolů. Úkoly, na kterých se elektrikář podílí, jsou označeny indikátorem rozsvícené žárovky.

Dělníci na tomto projektu se dělí do tří skupin – Betonáři, Železáři a Zedníci. Betonáři jsou méně kvalifikovaní dělníci a obecně provádí také jakékoli práce, které jsou na staveništi potřeba. Železáři jsou kvalifikovanější, mají na starosti veškerou práci s železem a s ocelovými prvky, ale také provádí pomocné a montážní práce na staveništi. Zedníci jsou nejvíce specializovanou skupinou pracovníků a jako takoví jsou využiti pouze pro instalaci vnitřního pouzdra a kompenzátorů. Zedníci mají nejvyšší mzdovou sazbu, Železáři mají sazbu o něco vyšší než betonáři, všechny skupiny jsou tvořeny 6 dělníky.

Beton a železo je materiál, z něhož je postaven dřík komína. Předběžné množství těchto zdrojů je vypočítáno ze zadávací dokumentace, dále je množství stanoveno projektem. Ke stanovenému množství je třeba připočíst cca 8 % jako rezervu pro realizaci. Cena betonu je 1 500 Kč/m^3 a cena železa 18,50 Kč/kg.

Posuvné bednění je unikátní technologie, kterou vyrábí a pronajímá subdodavatelská zahraniční společnost. Náklady na tento zdroj jsou 18 000 Kč/den pronájmu. Znamená to tedy, že pokud se stavba zpozdí ve fázi, kdy je bednění na staveništi, celkové náklady každý den rostou.

3.4 Kalendáře

Kalendářem projektu je kalendář Standardní s pracovní dobou od 8:00 do 17:00 s hodinovou přestávkou na oběd. Do tohoto kalendáře jsou zapracovány všechny státní svátky od 1. 1. 2015 do 1. 1. 2017 jako mimopracovní dny.

Dalším významným kalendářem je základní kalendář 24 hodin, který umožňuje práci 24 hodin denně, 7 dní v týdnu. Tento kalendář používají téměř všechny pracovní zdroje, aby nedocházelo ke konfliktům, neboť většina úkolů má vlastní kalendář, který potlačuje kalendáře zdrojů.

Jediným pracovním zdrojem, který kalendář 24 hodin nepoužívá, je zdroj Projektant, který má kalendář vlastní. Jeho pracovní doba je ve všední dny od 10:00 do 18:00 hodin s přestávkou na oběd a v sobotu od 10:00 do 16:00 s přestávkou. Všechny státní svátky však dodržuje jako mimopracovní dny.

Jak již bylo naznačeno, většina úkolů se řídí vlastními kalendáři, které ignorují kalendáře zdrojů. Prvním z těchto kalendářů je kalendář Stavební, který je použit pro veškeré stavební práce, s výjimkou samotné betonáže. Pracovní doba tohoto kalendáře je od 7:00 do 19:00 s přestávkou na oběd, včetně soboty. Všechny státní svátky a neděle jsou mimopracovní.

Druhým kalendářem přiřazeným úkolům je kalendář Betonáž. Tento kalendář reprezentuje dvousměnný provoz po celý den se čtyřmi hodinovými přestávkami na jídlo či na výměnu směny. Práce probíhají každý den v týdnu, jedinými mimopracovními výjimkami jsou Vánoční svátky, během kterých se dle zvyklostí nepracuje, aby mohli být pracovníci doma s rodinou.

3.5 Analýza projektu

Jedním ze zásadních bodů technické přípravy každé podobné stavební zakázky je sestavení přesného harmonogramu prací a stanovení termínů milníků. To je také základním a hlavním úkolem vytvořeného projektu. Tento harmonogram je podrobně popsán v částech 3.1 a 3.2 této práce a přílohách 3-1 a 3-2.

Důležitou informací, kterou lze z vytvořeného projektu zjistit, jsou kritické činnosti. Vzhledem k tomu, že jsou v projektu využívány různé zdroje a různé kalendáře, nemusí nutně existovat nepřerušená kritická cesta. I v případě, že bude nekritická činnost jedinou spojnicí mezi dvěma činnostmi kritickými, může mít časovou rezervu, neboť ji lze provádět v jiný čas než ostatní činnosti. Taková činnost si tedy může dovolit zpoždění v rámci přípustné rezervy, aniž by byla prodloužena doba trvání projektu.

V reálném projektu výstavby komína tedy nehovoříme o kritické cestě, přesto je velmi důležité sepsat výčet kritických činností, na které je třeba se velmi pečlivě zaměřit, aby nemohlo dojít ke zpoždění. Tyto kritické činnosti a milníky jsou:

- vypracování Basic Design,
- vypracování Final Design,
- schválení Final Design,
- mobilizace pracovníků,
- dodání bednění,
- předání zařízení staveniště, elektro, rozvody,
- dodávka cihel a tmelu,
- montáž kompenzátorů,
- dodávka elektromateriálů a osvětlení,
- elektroinstalace osvětlení,
- dodávka výtahu,
- montáž výtahu,
- demobilizace a odvoz mechanismů a vybavení.

Vzhledem k charakteru projektu však takový výčet kritických úkolů nestačí. Mnoho činností a milníků, které nejsou uvedeny jako kritické, může mít časovou rezervu například v řádech desítek minut. Takové úkoly správně nejsou označeny jako kritické, nicméně z pohledu realizace projektu je malá časová rezerva nedostatečná a nelze ji tak vůbec uvažovat. To lze ilustrovat například na úkolu montáž bednění na základ, který má celkovou časovou rezervu 1 hodinu. Pohledem čistě teoretickým je pravda, že zde existuje časová rezerva a nejedná se tedy o kritickou činnost. Přesto je však naprosto nezbytné na tento úkol jako na kritický nahlížet. Zjednodušeně řečeno na stavbě tohoto typu je 1 hodina zpoždění zcela pod rozlišovací schopnosti zúčastněných osob a pro účely stanovení úkolů, které se nesmí zpozdit či prodloužit je třeba tuto činnost i ostatní činnosti s malou rezervou označit jako „bez rezervy“. Lze určit, že jako „bez rezervy“ musí být označeny všechny činnosti, jejichž teoretická rezerva je kratší než 5 hodin.

V projektu tak bylo vytvořeno vlastní pole s názvem *Dostatečná rezerva*, které takové činnosti označí. Vzhledem k tomu, že činností, které lze označit jako „bez rezervy“, je výrazně více než činností s rezervou, označení zeleným symbolem zaškrtnutí je přiřazeno pouze právě těm úkolům, které mají dostatečnou (tedy delší než 5 hodin) rezervu. Tyto úkoly jsou:

- doprava technologií na stavbu,
- schválení finální receptury betonu,
- dodávky materiálů během betonáže (více milníků),
- instalace cihelného pouzdra,
- instalace pororoštů na ochozy,
- instalace nočního leteckého značení,

- milník konec prací.

Všechny ostatní činnosti a milníky se nesmí zpozdit či prodloužit, aby nebyl ohrožen termín dokončení projektu. Tuto podmínku lze také interpretovat tak, že realizace činností označených symbolem dostatečné rezervy nemohou být zrychleny za účelem dohnání zpoždění z ostatních částí projektu.

4 Vypracování simulačního modelu

Při stavbě takového rozsahu, jakým je výstavba vysokého průmyslového komínu, existuje mnoho situací, na které se musí zhotovitel řádně připravit a přesto se ani při dokonale provedené technické i výrobní přípravě nevyhne problémům během samotné realizace. Mezi know-how stavebních společností zaměřených na tento druh staveb patří pravidlo, které říká, že třemi nejdůležitějšími faktory pro efektivní a nezpožděnou realizaci jsou dodávky betonu, montáž výztuže a systém vertikální dopravy.

Dodávky betonové směsi musí být kontinuální, nezpožděné a musí splňovat požadované parametry a vyhovovat testům stanoveným v projektu a v Plánu kontrol a zkoušek. Častým řešením pro zajištění těchto podmínek je vystavění vlastní dočasné betonárky v areálu stavby. Tento požadavek tak může být vyřešen bez využití simulačního modelu.

Požadavek na rychlou a přesnou montáž výztuže je velice důležitý s ohledem na použitou technologii posuvného bednění pro výstavbu železobetonového dříku komína. Výztuž totiž musí být namontována dostatečně rychle, aby mohla být udržována rychlost tzv. tažení, tedy betonáže pomocí bednění, které se kontinuálně posouvá nahoru. Ve chvíli, kdy se plechy bednění posouvají výše, musí být v takovém místě již kompletně namontována výztuž a pracovníci musí být připraveni na lití betonu.

Z toho se také odvíjí třetí faktor úspěšné realizace, a to efektivní systém vertikální dopravy. Vodorovná doprava materiálu a osob je řešena mobilními míchačkami na beton, nákladními i osobními auty, vysokozdvižnými vozíky nebo například kolejnicemi s vozíky pro beton. Systém vodorovné dopravy je možné pružně a hlavně jednoduše upravit pro aktuální potřeby stavby a není tedy třeba očekávat výraznější problémy, které by nebylo možné velice rychle vyřešit. Naopak jakýkoli problém, který se vyskytne v systému vertikální dopravy, znamená okamžité zpomalení realizace a je nutné jej ihned vyřešit. Vertikální doprava proto musí být navržena tak, aby jak osoby, tak beton a výztuž mohly být přesouvány dostatečně rychle a spolehlivě. Z těchto důvodů je problém efektivnosti systému vertikální dopravy vhodné řešit pomocí simulačního modelu.

4.1 Identifikace problému

V rámci vysvětlení problematiky vertikální dopravy budou nejprve nastíněna obecná pravidla a zásady. Dále bude následovat popis skutečného systému navrženého pro reálný projekt se základními specifikacemi.

4.1.1 Stručné objasnění problematiky

Pro zajištění efektivní a nezpožděné realizace je tedy zásadní zaměřit se na přípravu výše uvedených částí projektu. Kontinuální dodávky betonu budou řešeny dočasnou betonárkou v místě stavby. Montáž výztuže bude zajištěna dostatečným počtem zkušených zámečníků a železářů, kteří jsou již dlouhou dobu zaměstnanci společnosti a vědí tak velmi dobře, jak je třeba tyto práce provádět. Správná funkčnost systému vertikální dopravy bude zajištěna, pokud budou připraveny správné technologie s dostatečnou kapacitou pro celou dobu výstavby. Díky zkušenostem výrobního oddělení společnosti lze obvykle nastavení tohoto systému odhadnout a v případě potřeby jej doplnit nebo naopak nějakou část systému odebrat a využít tak uvolněné technologie na jiné stavbě. Avšak vzhledem k tomu, že výstavba komína bude probíhat v zahraničí, není efektivní a v podstatě ani možné přizpůsobit systém vertikální dopravy aktuálním potřebám. Simulační modelování je tedy velice vhodným přístupem, jak vyzkoušet navržený systém pro reálnou situaci.

Nejprve je třeba definovat jednotky, které bude systém přepravovat. Jedná se o 3 hlavní zdroje – pracovníky, beton a železo. Dodávky betonu musí být pravidelné a nezpožděné a jejich četnost a množství dodávaného betonu jsou určeny technologickým postupem. Beton je dopravován na horní pracovní plošinu pomocí zvláštních nádob na beton, tzv. bádií. Ty lze obvykle přepravovat jeřábem nebo vrátkem s nosností alespoň 3 tuny.

Pruty výztuže lze přepravovat pomocí velkého vrátku, jeřábu a v případě potřeby i stožárovým výtahem. Aby však mohla být výztuž přepravována stožárovým výtahem, je třeba používat upravenou kabinu výtahu, a tedy takovouto úpravu objednat u výrobce výtahu. Jinými slovy, zhotovitel nemůže přepravovat výztuž stožárovým výtahem, pokud na to není připraven již několik měsíců před započetím prací. Z tohoto důvodu je toto řešení málo obvyklé a k přepravování výztuže se používá většinou velký vrátek či jeřáb. Samotná doprava výztuže většinou nepůsobí problémy, neboť je možné přepravovat ji ve větším množství, a proto také v delších intervalech. Mnohem důležitější je montáž výztuže, kdy na tuto práci musí být na horní pracovní plošině minimálně 5 pracovníků na směnu.

Přeprava osob musí fungovat vždy a bez jakýchkoli přerušení, není možné, aby tato nefungovala byť na jedinou hodinu, neboť v případě jakékoli komplikace musí být pracovníkům umožněno opustit horní pracovní plošinu do několika minut. V teorii je možné přepravovat osoby jakoukoli technologií vertikální dopravy, tedy vrátky s různými kapacitami, stožárovým výtahem i jeřábem. Rozdíl oproti přepravování materiálu je však ten, že pro každý typ přepravy musí být připravena také vhodná certifikovaná přepravní nádoba, tedy koše, kabiny apod. Jakékoli doplnění (nákup či pronájem) takové nádoby během realizace by bylo neúměrné nákladné a hlavně časově náročné (v řádech týdnů až měsíců), je proto nutné vertikální dopravu osob naplánovat a zajistit již v přípravné fázi.

4.1.2 Situace v reálném projektu

Součástí výstroje komína je dle specifikací projektu stožárový výtah pro permanentní používání. Je tedy vhodné využít tento výtah pro vertikální přepravu během výstavby komína. Vzhledem k tomu, že investor požaduje, aby byl výtah po dokončení projektu zcela nový, je nutné kromě permanentní kabiny, která bude namontována po dokončení výstavby, pronajmout také dočasnou, pracovní kabinu. Vzhledem k tomu, že se předpokládá nadměrné vytížení vertikální dopravy zejména z důvodu velkého množství betonu použitého při výstavbě, je vhodné doplnit kapacitu přepravování materiálu pronájmem kabiny se zvýšeným stropem. To umožní přepravovat stožárovým výtahem kromě pracovníků také výztuž a bude tak možné soustředit malý vrátek a jeřáb primárně na přepravu betonu.

Systém vertikální dopravy navržený pro tento projekt tak v základu sestává z jednoho jeřábu, permanentního stožárového výtahu a velkého vrátku. Z důvodu obav o plynulost výstavby bylo doporučeno, aby byl tento systém doplněn ještě malým vrátkem s nosností do 500 tun pro přepravu osob. Toto by však vyžadovalo investici do nové technologie. Po vytvoření simulačního modelu bude zkoumáno, zda může být systém efektivní i bez využití malého vrátku.

Přepravu betonu bude zajišťovat jeřáb a velký vrátek. Žádná zvláštní příprava není třeba, pouze je nutné mít na stavbě dostatečný počet bádií, tedy alespoň 3.

Výztuž bude přepravována velkým vrátkem, jeřábem a stožárovým výtahem. Také pro výztuž platí, že není třeba zajišťovat, vyjma upravené kabiny výtahu, žádné další přepravní nádoby.

Přeprava osob bude zajištěna stožárovým výtahem. Tento výtah dokáže najednou přepravit až 6 osob. V případě, že bude na stavbě použit malý vrátek, budou pracovníci k přepravě využívat i tuto technologii. Pro přepravu pomocí malého vrátku je použita klec, která pojme až 4 osoby, nelze v ní ovšem přepravovat žádný materiál.

Každá z použitých technologií přepravy má jinou přepravní rychlost, která je udávána v metrech za minutu[15]. Velký vrátek je schopen přepravovat materiál rychlostí 22 metrů za minutu. Jeřáb je nejrychlejším způsobem přepravy, když dosahuje rychlosti 45 metrů za minutu. Stožár výtahu s dočasnou pracovní kabinou je v průběhu výstavby kotven do již ztuhlých částí právě stavěného betonového dříku. Z bezpečnostních a statických důvodů tak není možné dosáhnout plné rychlosti výtahu tak, jak bude jezdit s permanentní kabinou po kompletním dokončení díla. Ze zkušenosti byla rychlost pracovního stožárového výtahu odhadnuta na cca 29 metrů za sekundu. Malý vrátek pro přepravu osob umožňuje pracovníkům přesun rychlostí až 25 metrů výšky za minutu.

Je důležité si uvědomit, že vzdálenost, kterou musí jednotlivé technologie urazit, se během výstavby prodlužuje s tím, jak roste betonový dřík komína. Dle garantované rychlosti

[15] Veškeré zde uvedené rychlosti byly poskytnuty výrobním oddělením společnosti zhotovitele. Údaje vychází buď z výrobcem uvedené specifikace technologie, nebo z kalkulace na základě zkušeností.

výstavby pomocí technologie posuvného bednění byl sestaven harmonogram, který uvažuje konstantní rychlost výstavby, při které bude 200 metrový dřík postaven za 54 dní. Rychlost výstavby je tak cca 3,7 m výšky za 1 den, při dvousměnném provozu tedy 1,85 m za směnu.

K době přepravy z úrovně terénu na horní pracovní plošinu je nutné připočítat také fixní čas, který představuje zejména připojení přepravovaného materiálu k technologii na zemi a jeho odpojení na horním pracovišti, pomalejší rychlost při rozjíždění a zastavování technologie, v případě jeřábu posun vozíčku se zvedacím zařízením (tzv. kočka) apod. Tyto fixní doby jsou odhadnuté dle mnohaletých zkušeností a nejsou ovlivněny aktuálním postupem realizace.

Pro lepší přehled uvádí následující tabulka 4-1 seznam použité technologie vertikální dopravy a její rychlost, fixní dobu a celkové časy přepravy pro několik zvolených milníků. Pro jednotlivé druhy přepravy byly zvoleny zkratky – W_L pro velký vrátek pro přepravu materiálu, W_S pro malý vrátek pro přepravu osob, H pro stožárový výtah a C pro jeřáb.

Tabulka 4-1 Seznam technologie vertikální dopravy (údaje poskytnuté zhotovitelem)

Technologie [zkratka]	Rychlost [m / min]	Fixní doba [min]	20 m / 5,4 d [min]	50 m / 13,5 d [min]	100 m / 27 d [min]	150 m / 40,5 d [min]	200 m / 54 d [min]
W_L	22	1	1,9	3,3	5,5	7,8	10,1
W_S	25	1	1,8	3	5	7	9
H	29	1	1,7	2,7	4,4	6,2	7,9
C	45	3	3,4	4,1	5,2	6,3	7,4

Dále je třeba si uvědomit, že zatímco beton i výztuž budou vždy přepravovány ze země nahoru na pracovní plošinu, osoby mohou cestovat i opačným směrem. To má samozřejmě také vliv na dobu přepravy, neboť v některých případech tak výtah či vrátek musí nejprve přijet jedním směrem prázdný. V těchto případech pak bude čas přepravy dvojnásobný.

Jeřáb a velký vrátek se naopak vždy musí vrátit do výchozího bodu. Pro velký vrátek to znamená, že ten bude připraven k naložení na úrovni terénu. Naproti tomu jeřáb bude připraven v pohotovostní poloze tak, aby nemohl překážet pracovníkům na úrovni terénu ani na horní pracovní plošině. Z toho také plyne delší fixní doba pro přepravu jeřábem, která je uvedená v tabulce 4-1.

Stožárový výtah a malý vrátek mají dvě stanice, ve kterých mohou čekat. Tyto stanice jsou samozřejmě úroveň terénu a horní pracovní plošina. Výtah i vrátek tak vždy čekají v té stanici, na které vystoupili poslední cestující.

Pracovníci se přesouvají mezi horní a spodní stanicí nepravidelně. Není možné znát přesné intervaly mezi jednotlivými přesuny, ani jejich rozložení mezi dvěma variantami – cestou nahoru a cestou dolů. Lze však dle zkušeností a základních úvah tyto intervaly alespoň odhadnout. Do těchto úvah je třeba zahrnout počet pracovníků na horní pracovní plošině, jejich potřebu opustit pracoviště kvůli návštěvě toalety, střídání směn dvakrát denně, náhodné kontroly inspektorů BOZP, kvality, technického dozoru investora apod. Výsledkem tohoto odhadu je průměr 1 cesta za 15 minut náhodným směrem, vyjma dvou hodin denně, kdy se střídají směny.

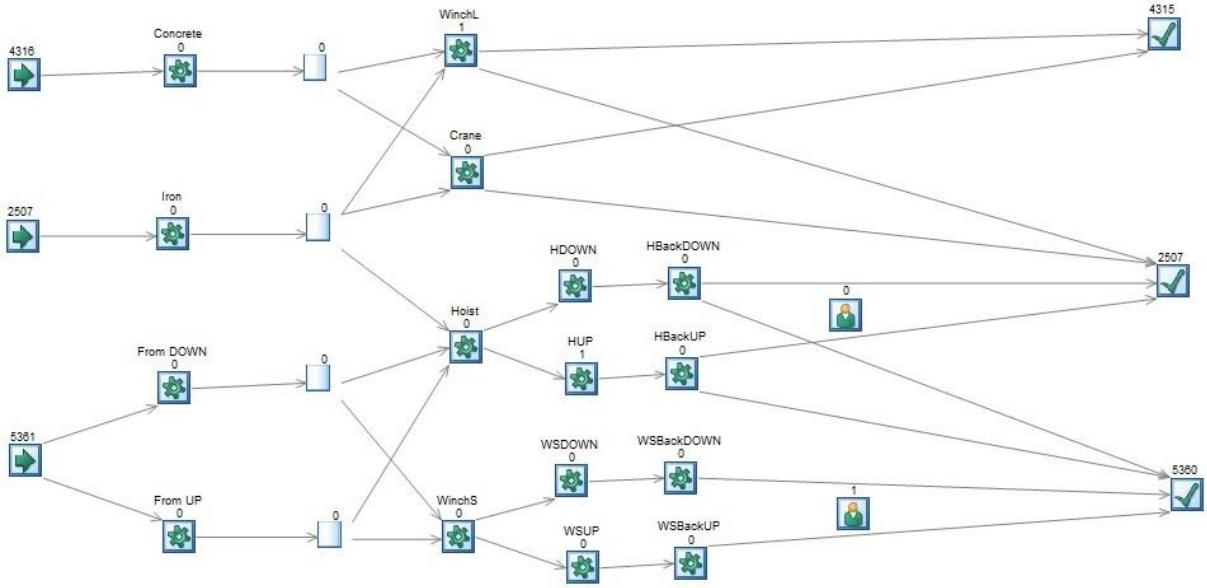
Naproti tomu dodávka betonové směsi na pracoviště probíhá v pravidelných intervalech specifikovaných podrobným technologickým a výrobním postupem a vychází ze spotřeby betonu při výstavbě. Vzhledem k tomu, že připravovaný komín výšky 200 m je cylindrického tvaru s konstantním vnitřním průměrem 13 m i tloušťkou stěny 500 mm, lze jednoduše spočítat, že na jeho výstavbu bude konstantní spotřeba betonu cca 21,2 m^3 na 1 běžný metr výšky. Vzhledem k tomu, že celková doba výstavby železobetonového dříku je při konstantní rychlosti betonáže 54 dní, bude výstavba 1 m komína trvat 388,8 minut. Aby mohla být tato rychlost dosažena, je tedy třeba přepravit na horní pracovní plošinu 1 m^3 betonové směsi každých 18 minut.

Spotřeba výztuže je v teorii také pravidelná. Nicméně při výstavbě jsou třeba různé tvary a délky prutů, které se ohýbají a řezají na montážní plošině v úrovni terénu a nejde tak pouze o svislou a vertikální výztuž, ale také o různé prostupy, otvory, přípravu pro betonové konzole či nosníky, nosné rošty a jiné prvky dle projektové dokumentace, které vyžadují velmi nepravidelné menší dodávky výztuže. Je tak třeba vycházet z celkového naprojektovaného množství výztuže a opět zejména z předchozích zkušeností, díky kterým lze odhadnout, že na 1 běžný metr komína proběhne přeprava výztuže na pracoviště asi třináctkrát včetně neočekávaných nepravidelných dodávek. Lze tak předpokládat střední hodnotu intervalu dodávek výztuže jako 30 minut.

4.2 Nastavení simulačního modelu

Při vypracování simulačního modelu je třeba zohlednit veškeré informace uvedené výše v této části, a to jak pro vytvoření celkové podoby modelu, tak pro samotné nastavení všech parametrů modelu. Pro lepší představu je celková podoba modelu vložena jako obrázek 4-2 na následující straně.

Obrázek 4-2 Celková podoba simulačního modelu



4.2.1 Celková podoba modelu

Výchozím bodem simulačního modelu jsou vstupy. Model systému vertikální přepravy tak jak je popsán výše, tedy bude obsahovat tři různé vstupy (Work Entry/Start Point) pro tři různé entity (Work Item) – beton (název entity je *Beton*), železo (název je *Zelezo*) a pracovníky (nazvané *Lidi*). Každé entitě je hned na vstupu přiřazen štítek (Label) *Units*, který po celou dobu strávenou v systému charakterizuje, o jakou entitu se jedná. Pro beton je štítek Units nastaven na hodnotu 1, pro železo je 2 a pro pracovníky 3.

Pracovníkům a železu je na vstupu přiřazen ještě další štítek a to *Work Type*, který bude dále sloužit k určení toho, zda pracovník cestuje z úrovně terénu na horní pracovní plošinu či opačným směrem. Železo je přepravováno vždy směrem nahoru. Výchozí hodnota je zde nastavena na 1.

Dalším stavebním prvkem po vstupu je aktivita (Work Center/Activity). Aktivity na této úrovni jsou celkem čtyři – 1 pro beton, 1 pro železo a 2 pro pracovníky. Jedna z aktivit pro pracovníky slouží k tomu, aby zvýšila hodnotu štítku Work Type na 2, což značí, že pracovník cestuje z horní pracovní plošiny dolů. Cesta ze vstupu pracovníků se rozděluje náhodně se stejnou pravděpodobností cesty do jedné i do druhé aktivity, neboť to, zda do systému zrovna přijde osoba, která chce vyjet nahoru, nebo naopak pracovník z horní plošiny potřebuje přepravit dolů, je skutečně náhodně rozděleno a také z logiky věci vyplývá, že celkový počet cest jedním směrem by měl být velmi blízko počtu cest směrem opačným. Všechny 4 činnosti na této úrovni jsou fiktivní s fixní dobou trvání 0 minut a slouží spíše pro zjednodušení podoby modelu.

Z každé aktivity se entity přesouvají do front (Storage Bin/Queue), kdy každé aktivitě na této úrovni náleží právě jedna fronta. Fronty jsou tedy také čtyři – 1 pro beton, 1 pro železo, 1 pro osoby cestující zdola nahoru a 1 pro osoby, které míří opačným směrem.

Z každé fronty vede několik cest k dalším aktivitám, představujícím samotné technologie vertikální dopravy. Z fronty pro beton je tak možné cestovat k aktivitě představující přepravu velkým vrátkem (*WinchL*), nebo k jeřábu (*Crane*). Fronta pro beton má tři možné cíle cesty a to velký vrátek, jeřáb a stožárový výtah (*Hoist*). Z dalších dvou front, které představují osoby cestující jedním, případně druhým směrem, je možné cestovat jak ke stožárovému výtahu tak také k malému vrátku (*WinchS*).

Velký vrátek i jeřáb budou přepravovat vždy ten materiál, který čeká nejdéle. Toto nastavení vychází z předpokladu, že ve chvíli, kdy je vyžádán materiál na pracoviště, je třeba jej co nejrychleji přepravit nahoru a čím déle je materiál nedostupný, tím větší škody toto zdržení způsobí. Je proto lepší čekat kratší čas na beton a následně kratší čas na výztuž, než například mít všechnu výztuž připravenu, ale o to déle čekat na dodání betonové směsi.

Vzhledem k tomu, že malý vrátek i stožárový výtah mohou stát v horní i spodní stanici, v reálné situaci na stavbě se budou pracovníci vždy snažit využít ten druh výtahu, který bude v dané chvíli ve stejné stanici, ze které se přepravují. V modelu je toto simulováno nastavením cirkulace příchodů z front tak, aby se aktivita snažila pravidelně střídat fronty, ze kterých přijme entitu. Model tak bude pro výtah i malý vrátek preferovat střídání cestujících z obou stanic.

Z aktivit WinchL a Crane vedou cesty již pouze k výstupům (Work Exit Point/End). Každá entita má vlastní výstup, proto i z obou aktivit vedou cesty do dvou výstupních bodů, kdy určení, která z cest bude použita, závisí na štítku Units. Aktivity WinchL a Crane mají nastavenu dobu obsluhy na hodnotu, která je určena aktuální dobou přepravy.

Aktivity Hoist a WinchS musí být řešeny jinak, neboť při příchodu entity do jedné z těchto aktivit mohou nastat dvě varianty – buď bude entita obsloužena ihned, nebo musí čekat na příjezd výtahu do stanice, ze které přišla. Jestliže výchozí stanice entity byla určena štítkem Work Type, je nyní nutné vytvořit takové řešení, které umožní modelu sledovat, v jaké stanici se výtah právě nachází. Pak bude možné stanovit skutečnou přepravní dobu včetně doby nutné k čekání na příjezd výtahu.

Zvolené řešení využívá další 4 aktivity a 1 zdroj (Resource), který simuluje kabinu výtahu. Z aktivity Hoist vedou dvě cesty rozdělené podle výchozí stanice entity, tedy podle štítku Work Type. V případě, že je entitou pracovník, který cestuje z úrovně terénu, či železo, přejde entita k aktivitě *HDOWN*, která představuje spodní stanici. Pokud je entitou pracovník směřující z horní pracovní plošiny, přejde k aktivitě *HUP*, tedy k horní stanici. V jedné z těchto aktivit je přiřazen zdroj *HRes*. Cesta z HDOWN vede do další aktivity *HBackDOWN*, zdroj HRes se přesouvá také. Analogicky vede cesta z HUP do *HBackUP*. Z obou těchto aktivit již vede cesta k výstupu, kdy je opět pomocí štítku Units určeno ke kterému. Zdroj

HRes však zůstává v poslední navštívené aktivitě, tedy buď v HBackDOWN, nebo v HBackUP.

V tomto neuvolnění zdroje spočívá princip zvoleného řešení, neboť zdroj HRes má nastaveny cestovní časy mezi jednotlivými aktivitami. Cestovní časy jsou ve všech případech nastaveny na hodnotu 0 s výjimkou přesunu z aktivity HBackDOWN do HDOWN a z aktivity HBackUP do HUP, kde je cestovní čas nastaven na aktuální hodnotu přepravní doby výtahu. Tak bude zajištěno, že v případě, že poslední cesta výtahu vedla ze stejné stanice, z jaké pojede nově příchozí entita, bude připočítán čas přesunu zdroje jako cesta prázdné kabiny zpět do stanice, ale tento čas nebude připočítán v případě, že nově příchozí entita pojede ze stanice jiné, než z které vedla poslední cesta. Zároveň toto řešení zaručí, že v jedné chvíli bude výtah využíván vždy maximálně jednou entitou, a to i v případě, že tato entita pouze čeká na jeho příjezd.

Analogicky je toto řešení nastaveno pro malý vrátek a aktivity *WSDOWN, WSUP, WSBackDOWN, WSBackUP* a zdroj *WSRes*.

Kromě uvedeného cestovního času zdrojů, tedy prázdných kabin, bude připočítána i doba samotného přesunu a to hned v aktivitě Hoist, resp. WinchS.

4.2.2 Nastavení parametrů modelu

Základními časovými jednotkami simulačního modelu jsou minuty. Pro lepší přesnost lze model jednoduše připravit i v prostředí sekund, nicméně pro účely určení efektivity systému vertikální dopravy je časová jednotka 1 minuta dostačující.

Vzhledem k tomu, že se jedná o dvousměnný nepřetržitý provoz, je pracovní doba nastavena na 24 hodin denně, 7 dní v týdnu, právě tak, jak realizace ve skutečnosti probíhá.

V modelu lze nastavit tzv. „zahřívací dobu“, která obvykle slouží k tomu, aby se model dostal do provozního režimu dlouhodobého fungování. Tato funkce je však vhodná pro modely, které představují nepřetržitě fungující systém, nebo systém, jehož chování závisí na předchozích stavech. Model vertikální dopravy ale v tomto případě vychází z nulového bodu stejně jako reálná stavba, a proto není třeba tuto zahřívací dobu nastavovat.

Celková doba výstavby betonového pláště komína je 54 dnů, znamená to tedy, že i celková doba běhu modelu bude nastavena na 54 dnů, tj. celkem 77 760 minut. Aktuální čas simulace, který je v programu Simul8 označován funkcí *Simulation Time*, bude počítán v minutách. Tento aktuální čas je zároveň měřítkem postupu výstavby a vzhledem ke konstantní rychlosti výstavby na něj lze nahlížet jako na měřítko aktuální výšky rozestavěného komína. Tento simulační čas je proto v modelu využíván pro výpočet doby přepravy pro každou z použitých technologií, neboť doba přepravy závisí právě na aktuální výšce komína. Dále v této části práce a v uvedených vzorcích je čas simulace značen T_S.

Parametry jednotlivých stavebních prvků modelu byly nastaveny dle skutečných údajů tak, jak jsou popsány v části 4.1 této práce. Prvními nastavenými parametry jsou intervaly mezi příchody jednotek, jejichž hodnoty byly odvozeny na konci části 4.1.2.

Intervaly mezi příchody pracovníků podléhají náhodným vlivům, a proto byla odvozena pouze střední hodnota těchto intervalů jako 15 minut. Vzhledem k charakteristice této náhodné veličiny lze pravděpodobnostní rozdělení stanovit jako normální se střední hodnotou 15 minut a směrodatnou odchylkou 5 minut. Dvakrát denně, vždy od 6:00 do 7:00 a od 18:00 do 19:00, však probíhá střídání směn. Během této doby pracovníci cestují vždy po deseti minutách vzhledem k omezeným kapacitám přepravních kabin a také proto, že každý pracovník musí vždy dokončit svou část práce předtím, než opustí pracoviště. V uvedených časech jsou tedy intervaly mezi příchody nastaveny jako fixní s hodnotou 10 minut.

Jedna jednotka pracovníka (tj. jedna entita Lidi) představuje jednoho, ale i více pracovníků najednou. Při vstupu jednotky do systému je entitě přiřazen číselný label *Skupina,* který může nabývat hodnot 1 až 4 dle vlastního diskrétního pravděpodobnostního rozdělení. Hodnota štítku reprezentuje počet členů skupiny, tedy entity. Entita tak může představovat jednoho pracovníka, ale také skupinu čtyř lidí. Vlastní pravděpodobností rozdělení vychází z odhadu a nastaví hodnotu štítku dle následujících pravděpodobností:

- Hodnota 1 - 30 % ,
- Hodnota 2 - 35 % ,
- Hodnota 3 - 20 % ,
- Hodnota 4 - 15 % .

Jedna entita Beton představuje vždy právě jednu bádii o kapacitě 1 m^3. Intervaly mezi dodávkami betonu jsou vždy konstantní a jejich hodnota je 18 minut.

Odvození intervalů mezi požadavky na dodání výztuže vychází z předem známé spotřeby výztuže a také z uvažování nepravidelných dodávek výztuže na 1 metr výšky komína. Vzhledem k tomu, že je znám počet dodávek v určitém časovém intervalu, lze hovořit o tom, že pravděpodobnost výskytu požadavku na dodávku výztuže se řídí Poissonovým rozdělením. Rozdělení délky intervalu mezi jednotlivými požadavky proto bude vyjádřeno rozdělením Exponenciálním. Střední hodnota tohoto rozdělení bude 30 minut.

Podobně jako jednotkám pracovníků také entitě Zelezo bude na vstupu přiřazen štítek Skupina. Hodnota tohoto štítku bude mezi 1 až 4. V případě železa neznačí štítek počet skutečných kusů železa, ale spíše jeho váhu. Stožárový výtah má totiž omezenou nosnost, a protože dodávky železa mají různou hmotnost, nemusí se do výtahu více jednotek vejít právě z důvodu váhové kapacity. Hodnotu štítku na vstupu opět určuje vlastní diskrétní pravděpodobnostní rozdělení, tentokrát s následující strukturou:

- Hodnota 1 - 40 % ,
- Hodnota 2 - 10 % ,
- Hodnota 3 - 25 % ,

- Hodnota 4 - 25 % .

Všechny ostatní štítky jednotlivých entit tak, jak bylo uvedeno v předchozí části práce, jsou nastaveny ve vstupních bodech modelu.

V pořadí následující 4 aktivity *Concrete, Iron, From DOWN* a *From UP* mají nastavenu nulovou dobu obsluhy. Jediný další nastavený parametr je tak pouze v aktivitě From UP, a to nastavení štítku Work Type na hodnotu 2, která značí, že pracovník bude nastupovat na horní pracovní plošině.

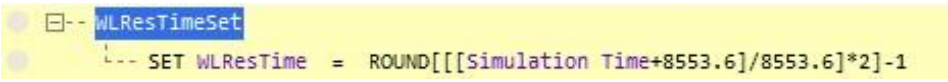
U žádné z front nejsou nastaveny žádné speciální parametry, nicméně z každé fronty vede několik cest do následných čtyř aktivit.

Aktivita WinchL má nastavena pravidla cesty do a z aktivity tak, jak uvádí část 4.2.1. Kromě toho je zde také nastavena doba obsluhy, která simuluje dobu přepravy materiálu velkým vrátkem. Jak vyplývá z tabulky 4-1 výše, doba přepravy závisí na aktuální výšce rozestavěného komína. K nastavení doby obsluhy, zde pojmenované *WLResTime*, tak byla využita funkce Visual Logic programu Simul8. Aktuální doba obsluhy dle parametrů popsaných v tabulce 4-1 je vypočtena pomocí vzorce

$$WLResTime = \{[(T_s + 8553{,}6)/8553{,}6] \times 2\} - 1.$$

Tento vzorec, stejně jako tři vzorce následující, byl vytvořen právě na základě hodnot z uvedené tabulky 4-1. Vychází z úvahy, kdy je nejprve vypočtena doba samotné přepravy na celou výšku komína (tj. 200 m) v minutách. To je čas přepravy (bez fixní doby) v poslední moment výstavby, tj. v čase $T_s = 77760$. Tímto výsledkem je poté dělen uvedený celkový čas simulace a výsledná hodnota představuje čas potřebný k tomu, aby byla samotná přeprava o 1 minutu prodloužena, jinými slovy počet minut, za který vzroste komín o daný počet metrů (v případě velkého vrátku se jedná o 22 metrů za 8553,6 minut). Zbývající části vzorců jsou pak úpravy kvůli zahrnutí fixních nákladů.

Takto získaná hodnota představuje čas v minutách potřebný k přepravě materiálu nahoru a návrat velkého vrátku na úroveň terénu. Jak lze ze vzorce odvodit, fixní doba 1 minuta je zde započítána pouze jednou, přestože se jedná o cestu oběma směry. Je to tak z toho důvodu, že v případě velkého vrátku představuje tato fixní doba zejména čas potřebný pro připojení a odpojení materiálu a není tedy třeba ji počítat i pro cestu zpět na úroveň terénu. Ve Visual Logic byla hodnota zaokrouhlena na celé minuty a vzorec tak má následující podobu:



Obr. 4-3 Nastavení doby obsluhy velkého vrátku

Aktivita Crane má podobné nastavení jako velký vrátek, ale vzorec pro výpočet doby obsluhy, zde označený *CResTime*, má podobu

$$CResTime = \{[(T_s)/17496] + 3\} * 2.$$

Hodnota vypočítaná pomocí tohoto vzorce udává opět cestu včetně návratu do výchozí pozice. V případě jeřábu je však fixní čas započítán dvakrát, neboť tato doba představuje zejména přesun ramena jeřábu, vertikální posun vozíčku se zvedacím zařízením a pomalou a opatrnou manipulaci s lanem v okolí pracoviště. Tyto činnosti musí být provedeny při přepravování materiálu nahoru, ale také při návratu jeřábu na úroveň terénu či do neutrální polohy. V simulačním modelu je hodnota opět zaokrouhlena na celé minuty a vzorec má následující podobu:

```
CResTimeSet
    SET CResTime  =  ROUND[[[[Simulation Time]/17496]+3]*2]
```

Obr. 4-4 Nastavení doby obsluhy jeřábu

U aktivity Hoist bude doba přepravy počítána pouze jednou, neboť se jedná pouze o přejezd mezi stanicemi bez návratu do výchozí stanice, jak bylo popsáno v části 4.2.1 této práce. Doba tohoto přejezdu *HResTime* bude vypočítána vzorcem

$$HResTime = (T_s + 11275)/11275.$$

Opět je třeba zaokrouhlit hodnotu na celé minuty. Příkaz ve Visual Logic vypadá následovně:

```
HResTimeSet
    SET HResTime  =  ROUND[[Simulation Time+11275]/11275]
```

Obr. 4-5 Nastavení doby obsluhy výtahu

Poslední aktivitou na této úrovni je WinchS, kterou lze popsat podobně jako aktivitu Hoist. Doba přejezdu je označena *WSResTime* a k jejímu výpočtu slouží vzorec:

$$WSResTime = (T_s + 9720)/9720.$$

Po zaokrouhlení bude mít vzorec v modelu následující podobu:

```
WSResTimeSet
    SET WSResTime  =  ROUND[[Simulation Time+9720]/9720]
```

Obr. 4-6 Nastavení doby obsluhy malého vrátku

Dalšími aktivitami v pořadí jsou dolní a horní stanice stožárového výtahu, resp. malého vrátku pojmenované HDOWN, HUP, WSDOWN, WSUP. Všechny tyto aktivity mají nastavenu nulovou dobu obsluhy, nicméně jsou to první stanice, které vyžadují obsluhu pomocí zdroje, tedy HRes, resp. WSRes.

Každý z těchto zdrojů se v modelu vyskytuje právě jednou, neboť se jedná o simulaci přepravní kabiny. Tyto zdroje jsou zároveň jediné stavební prvky v modelu, ke kterým se váže cestovní čas tak, jak s ním pracuje software Simul8. Jak bylo uvedeno v předcházející části, tento cestovní čas je nastaven pouze pro cesty z aktivity HBackDown do HDOWN, z HBackUP do HUP, z WSBackDOWN do WSDOWN a z WSBackUP do WSUP a jeho hodnota je rovna době přejezdu HResTime, resp. WSResTime.

Čtyři „návratové/back“ aktivity na další úrovni mají tedy také nastaveny nulové doby obsluhy. Každá z těchto aktivit má zakázáno uvolňování zdroje po dokončení obsluhy.

Všechny aktivity spojené se stožárovým výtahem a s malým vrátkem mají povoleno slučování entit, tzv. batching. Tato funkce umožňuje obsluhovat více entit najednou, pokud k aktivitě přijdou najednou, a to až do zvoleného limitu počtu entit či součtu hodnot vybraných štítků. Batching ve vytvořeném modelu vyhodnocuje celkový součet hodnot štítku Skupina. Stožárový výtah umožní přepravit najednou entity Lidi i Zelezo, pokud součet hodnot jejich štítků Skupina nepřesáhne 6. Ačkoli malý vrátek není připraven pro převoz železa, má také povolen batching, a to pro sloučení pracovníků. Jejich počet ovšem nesmí přesáhnout 4 lidi. Samozřejmě obě použité technologie mohou slučovat pouze entity, které jedou stejným směrem.

Konečné body nemají nastaveny žádné zvláštní parametry.

4.3 Simulace a vyhodnocení výsledků

Před samotným spuštěním simulace musí řešitel nastavit, které výsledky bude program sledovat a vyhodnocovat. Aby však mohl tato měřítka určit, musí si nejprve uvědomit, co je simulací sledováno a jaká jsou možná úskalí systému. Jak již bylo popsáno v úvodních částech této kapitoly, efektivní vertikální doprava je jednou ze tří základních podmínek úspěšné realizace. V reálném systému vertikální dopravy je proto nejdůležitějším parametrem časová efektivita.

4.3.1 Nastavení simulace

Teoreticky lze za časově zcela efektivní označit takový systém, ve kterém každá jednotka stráví co nejméně času. Vzhledem k tomu, že rychlost přepravy pomocí jednotlivých prostředků je limitována technologickými možnostmi a řídí se tak údaji uvedenými v tabulce 4-1 této práce, jediným vhodným způsobem jak ovlivnit čas jednotek strávený v systému, je zkrátit doby čekání ve frontách.

V případě, že by systém zcela nevyhovoval potřebám stavby, bylo by samozřejmě možné doplnit jej dalším vrátkem či jeřábem, nicméně takové řešení je velmi nákladné a v některých případech dokonce kontraproduktivní, neboť by tak pracoviště bylo zaplněno

dalším velkým strojem, což by vedlo ke snížení produktivity práce. Je proto nutné zjistit, zda systém vertikální dopravy tak, jak je navržen, dokáže být dostatečně efektivní na to, aby čekací doby neměly negativní vliv na probíhající realizaci.

Sledovány tedy budou výsledky ze všech čtyř front. Pro lepší představu o průběhu simulací budou do sledování zahrnuta pro každou z front následující kritéria:

- Maximální délka fronty
- Maximální doba čekání ve frontě
- Celkový počet čekajících jednotek za celý průběh simulace
- Průměrná doba čekání ve frontě (pouze nenulové časy)
- Průměrná doba čekání ve frontě
- Celkový počet jednotek za celý průběh simulace
- Měřený hraniční čas
- Poměr jednotek, které musely čekat déle než nastavený hraniční čas

Kromě údajů z front bude v koncových bodech sledován čas v systému pro každou z jednotek, a to průměrný i maximální.

Je stanoveno hned několik podmínek, které musí být splněny, aby mohl být systém vertikální dopravy prohlášen za vyhovující. První a nejjednodušší podmínkou je to, že během celé realizace nesmí v jeden moment čekat na přesun více než jedna bádie s betonem. Jedním z důvodů je omezený počet bádií, které jsou na stavbě 3. Pokud by tedy byly ve frontě dvě bádie, třetí by musela být pouze na čtyřech místech: buď naplňována, přepravována nahoru, používána na horní pracovní plošině, nebo přepravována dolů. V každém případě by to však znamenalo, že vzhledem k použitým tvrdidlům betonu, které musí být součástí betonové směsi při betonáži posuvným bedněním, beton v nejdéle čekající bádii již tuhne a bude nepoužitelný. Ještě větším problémem však je to, že pokud nastane taková situace, je jisté, že betonáž musela být na nějakou dobu přerušena, což není dobré z časového ani technologického hlediska.

Důležitou a zároveň dobře měřitelnou podmínkou je maximální doba betonu strávená v systému. Od vlití betonové směsi do bádie by totiž nemělo trvat déle než 30 minut, než se začne beton zpracovávat, tedy než se dostane na horní pracovní plošinu.

Další podmínkou je hranice maximální doby čekání. Vzhledem k tomu, že samotnou dobu přepravy nelze ovlivnit, je nutné stanovit maximální dobu, po kterou budou jednotky čekat na příjezd přepravního prostředku. V případě betonu tato hranice nebude uvažována, neboť je zde hlavní prioritou, aby se nevytvořila více než jednočlenná fronta, dá se tedy říci, že limit je 18 minut. Přesto bude alespoň nastaven parametr, který změří, jaká část všech dodávek čekala kratší dobu než 9 minut, tedy polovinu tohoto limitu.

Hranice maximální doby čekání v případě výztuže bude 10 minut, překročení této hranice by již ohrožovalo hladký průběh prací. Sledování počtu jednotek čekajících kratší dobu než nastavený limit bude vycházet z maximální povolené doby čekání. Tento limit tedy

bude nastaven na 10 minut. Hodnota ve výsledku proto musí být 100 %, aby nedocházelo k problémům.

U pracovníků je sledování doby čekání ještě důležitější než u materiálů. Zatímco delší čekání materiálů způsobí problémy s realizací spojené s vyššími náklady či zpožděním výstavby, nepřiměřeně dlouhé čekání pracovníků může působit kromě výrobních problémů také problémy personální, zdravotní, bezpečnostní i další. Proto bude u pracovníků v modelu sledována nejprve průměrná doba čekání ve frontě. Je nutné si uvědomit, že vzhledem ke konstrukci modelu se zde nejedná o čekání na příjezd kabiny výtahu, neboť tato doba, pokud je relevantní, je započítána v cestovním času zdroje. Jedná se tedy pouze o čekání do chvíle, než pracovník může buď přivolat výtah, nebo do něj rovnou nastoupit. Tato doba čekání by v reálu neměla být delší než cca 1,5 minuty, což bude tedy nastavený limit pro sledování počtu jednotek čekajících delší dobu. Výjimečně samozřejmě může dojít k delšímu čekání, nikdy by však tato doba neměla přesáhnout 5 minut.

4.3.2 Výsledky simulace fungování systému

Po nastavení všech parametrů uvedených v předchozích částech této práce může řešitel přistoupit ke spuštění simulace. Pro větší přesnost výsledků byl spuštěn trial, který simuloval 100 nezávislých běhů modelu. Exportované výsledky jsou zobrazeny v tabulce 4-7 v sekci příloh této diplomové práce, kde tvoří přehledný seznam. Následující odstavce popisují jednotlivé výsledky právě z této tabulky.

Fronta betonu během provedených sto simulací nikdy nebyla delší než 1 čekající jednotka. První důležitá podmínka pro určení vhodnosti systému vertikální dopravy tak byla splněna.

Nejdelší čas strávený čekáním v této frontě se s 95 % pravděpodobností bude nacházet v intervalu mezi 13,01 až 13,39, což je sice poměrně hodně, nicméně pokud se bude jednat o ojedinělé případy a nebude tím způsobeno prodloužení fronty, na realizaci to nebude mít vliv. Z tohoto hlediska je důležitý výsledek, který zobrazuje, jaká část všech dodávek čekala kratší dobu než 9 minut. V průměru z celkových 4 316 jednotek betonu čekalo méně než 9 minut celých 99,73 %, to znamená pouze 11 až 12 dodávek. Je proto jisté, že delší doby čekání jsou skutečně ojedinělé. S pravděpodobností 95 % bude po celou dobu realizace čekat beton na uvolnění technologie pouze ve 105 až 110 případech (asi 2,5 % celkového množství), tedy v průměru přibližně dvakrát za den, ačkoli častěji nastane toto čekání v pozdějších fázích výstavby. Čekací doba bude v těchto případech průměrně 3,97 minut.

Pokud by žádná jednotka betonu nikdy nečekala ve frontě, a tedy přeprava betonové směsi probíhala naprosto plynule, lze vypočítat, jakou průměrnou dobu stráví jedna jednotka v systému. Vzhledem k tomu, že rychlost betonáže, a tedy také prodlužování časů přepravy, je konstantní, je možné vypočítat průměrnou rychlost přepravy za celou dobu realizace v naznačeném hypotetickém zcela plynulém systému. Jednotky betonu mohou být

přepravovány buď jeřábem, nebo velkým vrátkem. První část výstavby je rychlejším prostředkem velký vrátek z důvodu nižších fixních časů, v druhé části se naopak vyplatí využít k přepravě stožárový jeřáb. Při porovnání vzorců pro výpočet doby přepravy pro obě uvedené technologie lze říci, že prvních 29 dnů výstavby je rychlejší velký vrátek, zbývajících 25 dnů vítězí jeřáb. Průměrná doba přepravy vrátkem, vypočítaná prostým aritmetickým průměrem vzhledem ke konstantnímu růstu této doby, je pro prvních 29 dnů výstavby cca 5,8 minut. Průměrná doba přepravy stožárovým jeřábem pro zbývající část realizace je pak cca 12,9 minut. Následně lze využít vážený aritmetický průměr a díky tomu stanovit, že v hypotetickém případě, kdy nejsou přepravovány žádné jiné materiály než beton, by průměrná doba strávená v systému byla 9,11 minuty.

V případě, že by v takovém zcela plynulém systému fungovala na stejné technologii také přeprava železa či jiných materiálů, a pro jednoduchost by bylo uvažováno, že každá z dostupných technologií přepravy bude využívána stejnou měrou, byl by průměr doby strávené v systému pro beton 10,22 minuty jako průměr z aritmetických průměrů obou prostředků.

Ve vytvořeném simulačním modelu vychází průměrná doba, kterou jednotka strávila v systému, na 10,36 minuty, tedy velice blízko hypotetickému zcela plynulému modelu. Toto je velmi důležitá informace zejména proto, že je díky ní zřejmé, že i kdyby byl systém doplněn další novou technologií pro vertikální přepravu betonu, která bude přibližně stejně rychlá či pomalejší než stávající použité technologie, průměrná doba, kterou jednotky betonu stráví v systému, se nemůže významně snížit, aniž by to nemělo negativní vliv na přepravu výztuže. Rozdíl těchto hodnot pro aktuálně modelovaný systém a systém ideální je tedy přibližně 0,14 minut. Vzhledem k tomu, že průměrná doba čekání všech jednotek betonu včetně započítání nulových časů vychází na 0,10 minuty, zbývajících přibližně 0,04 minuty je rozdíl mezi skutečnou průměrnou dobou přepravy a dobou přepravy v hypotetickém systému, kde jsou oba druhy přepravy využity stejně často.

Maximální doba, kterou jednotka betonu stráví v systému, bude s pravděpodobností 95 % v intervalu mezi 29,35 a 29,96 minutami. Tato nejdéle zpracovávaná jednotka tedy sice těsně, ale přece vyhoví stanovené podmínce pro dodání betonu na pracoviště do 30 minut. Ve skutečné realizaci navíc bude tato doba v systému kratší, neboť po odpojení bádie z jeřábu či vrátku již začne být beton používán, zatímco technologie se bude vracet do výchozí polohy. Z uvedeného maximálního času lze tedy pro skutečnou výstavbu uvažovat čas o několik minut kratší. Rozdíl mezi průměrnou nejdelší dobou strávenou v systému a průměrným nejdelším čekáním ve frontě je přibližně 16,5 minuty, dá se tedy předpokládat, že tento čas je střední hodnotou doby samotné přepravy těchto nejdéle čekajících jednotek.

Nejdelší fronta železa se pohybuje mezi 2 a 3 jednotkami čekajícími v jeden moment. Díky využití batchingu je pravděpodobné, že tyto společně čekající jednotky budou přepraveny dohromady. Ovšem v případě, pokud by jejich váha byla větší než kapacita

výtahu, nebo by již na převoz čekali pracovníci, musely by být tyto jednotky transportovány zvlášť.

Nejdelší doba čekání nepřekročí 10 minut, což lze tvrdit nejen s 99 % spolehlivostí, ale také s komfortní rezervou, neboť maximální naměřená doba čekání v průběhu 100 simulací byla v průměru 7,74 minut, se spolehlivostí 95 % se pak bude pohybovat v intervalu 7,51 až 7,97 minut. Počet jednotek výztuže, které jsou nuceny alespoň chvíli čekat, je prakticky totožný jako v případě betonu, tedy mezi 105 a 110 jednotkami. Celkový počet jednotek železa však bude přibližně 60 % počtu jednotek betonu, proto poměrná část čekajících je asi 4,16 % všech jednotek železa. Naopak tyto jednotky budou mít kratší dobu čekání než jednotky betonu, jedná se průměrně o 2,32 minut. Jak bylo uvedeno v podmínkách pro vhodnost systému vertikální dopravy, 100 % jednotek čekalo kratší dobu než 10 minut, ačkoli dle spodní hranice 95 % i 99 % intervalu spolehlivosti během 100 simulací pravděpodobně čekání delší než 10 minut nastalo.

Průměrná doba jednotek železa strávená v systému je 9,25 minut. Pomocí metodiky, která je uvedena výše pro jednotky betonu, lze vypočítat průměrnou dobu strávenou v hypotetickém zcela plynulém, a tedy ideálním, systému. Průměrná doba v plynulém systému, kde platí stejná pravděpodobnost, že stožárový výtah čeká v dolní či v horní stanici, bude přibližně 9,1 minuty. Rozdíl mezi oběma průměrnými dobami je tedy dostatečně malý.

Maximální doba, kterou jednotky železa strávily v systému je v průměru 23,84 minuty. Při porovnání s nejdelším čekáním ve frontě vyplyne rozdíl 16,1 minuty, který představuje střední hodnotu přepravy nejdéle čekajících jednotek železa.

Další dvě fronty by teoreticky měly uvádět přibližně stejné údaje, neboť rozdělení pracovníků do skupin jedoucích nahoru či dolů probíhá náhodně se stejnou pravděpodobností pro obě varianty. Z naměřených výsledků, ač částečně rozdílných, skutečně vychází pro obě stanice prakticky stejné závěry. Maximální délka front je v průměru 1,02, resp. 1,04, což značí, že ze 100 měření byla fronta dvakrát, respektive čtyřikrát dlouhá maximálně 2 jednotky. V ostatních případech se fronta netvořila. To je velice uspokojivý výsledek. Maximální doba čekání ve frontě je pro cestu nahoru průměrně 3,37 minuty, pro cestu dolů pak 3,12 minuty. Takové hodnoty jsou sice poměrně vysoké, nicméně maximální povolená doba čekání pro ojedinělé případy je uvažována až 5 minut. Během celé realizace se v každém směru stane pouze pětkrát až šestkrát, že pracovník musí čekat ve frontě, jinak je provoz zcela plynulý. Pokud pracovník musí čekat, než přijde na řadu, průměrná doba tohoto čekání je okolo 1,5 minuty. Doba 1,5 minuty byla také nastavena jako hranice sledování počtu jednotek čekajících delší dobu než nastavený limit. Ze všech příchozích jednotek čekalo déle pouze 0,08 % resp. 0,07 % při cestě dolů, v průměru tedy oběma směry pouze 2 lidé za celou dobu realizace.

Z uvedených údajů lze také vypočítat celkový počet člověkohodin, které pracovníci stráví čekáním ve frontě. Tak může společnost vyjádřit také čistý finanční dopad těchto prostojů. Bude-li uvažováno s 95 % intervalem spolehlivosti, pak při cestě z úrovně terénu na

horní pracovní plošinu za celou dobu výstavby stráví pracovníci čekáním ve frontě celkem 6,97 až 9,57 minut. Opačným směrem je tento interval 6,35 až 8,74 minut. Lze předpokládat, že jedna jednotka pracovníka v modelu odpovídá průměrně 2,2 osobám, proto na 95 % intervalu spolehlivosti budou celkové člověkohodiny strávené čekáním ve frontě v intervalu od 29,3 do 40,3 minut. Při nákladech 500 Kč na 1 člověkohodinu tak celkové náklady společnosti vynaložené na toto čekání budou v intervalu přibližně mezi 244 až 336 Kč, což je zcela zanedbatelná částka.

Průměrná doba pracovníků strávená v systému je 7,13 minut. Opět lze uvažovat hypotetický plynulý model, podobně jako pro srovnání v případě betonu a železa. Průměrná doba strávená v takovém ideálním systému je přibližně 7,11 minut. V případě pracovníků nemá doba čekání na průměrnou dobu strávenou v systému žádný vliv, neboť se jedná o skutečně velice krátké časy. Rozdíl 0,02 minut je tedy způsoben pouze tím, že pracovníci museli na příjezd kabiny z druhé stanice čekat nepatrně častěji, než v 50 % případů, konkrétně přibližně v 50,1 %.

Maximální doba, kterou někteří pracovníci stráví v systému, bude 19,42 minut. Jedná se tedy o nejdelší dosaženou dobu, za kterou se jednotka pracovníků přesune z úrovně terénu na horní pracovní plošinu či opačným směrem a to včetně čekání ve frontě, čekání na příjezd kabiny výtahu i včetně samotného přesunu. Nejdelší čekání ve frontě trvalo v případě pracovníků 3,37 minut, na samotnou přepravu tedy zbývá 16,05 minut.

Všechny uvedené výsledky vyhovují nastaveným podmínkám a zvolený systém vertikální dopravy lze spolehlivě považovat za efektivní.

4.3.3 Alternativní simulační model – popis úpravy

Vzhledem k tomu, že navržený systém vertikální dopravy s využitím čtyř druhů technologie splnil všechna kritéria efektivního systému, a některá dokonce se značnou rezervou, je vhodné prozkoumat také chování systému, který byl navržen původně, tedy bez využití malého vrátku pro přepravu osob. Tento model bude mít identické nastavení, jako model předchozí včetně nastavení sběru výsledků, jediným rozdílem bude vymazání aktivit spojených s malým vrátkem, tedy aktivit WinchS, WSDOWN, WSUP, WSBackDOWN, WSBackUP. Všichni pracovníci tedy budou cestovat pouze stožárovým výtahem. Samotná simulace bude opět provedena prostřednictvím trialu namísto 100 nezávislých simulací.

Lze předpokládat, že největší dopad bude mít tato úprava modelu na výsledky spojené s jednotkami pracovníků. Pravděpodobně však tato změna v důsledku ovlivní také jednotky výztuže, přestože výztuž malým vrátkem nikdy přepravována nebyla, a to z důvodu, že stožárový výtah nyní bude mnohem obsazenější. Zda budou zrušením jednoho přepravního prostředku ovlivněny také výsledky betonu, je nejisté, ale po provedení trialu snadno zjistitelné.

4.3.4 Alternativní simulační model – výsledky

Exportované výsledky z trialu jsou součástí příloh této práce jako obrázek 4-8.

Během provedených 100 simulací byla zachována podmínka o frontě jednotek betonu, když ani jednou tato fronta nebyla delší než 1 jednotka. To je první důležitý výsledek, který je nutný pro zachování vhodnosti systému.

Nejdelší čas ve frontě se pro beton v průměru zvýšil o 0,56 minuty. Z hlediska betonu to není moc, nicméně je to ukazatel, že odstranění malého vrátku skutečně vede k delším čekacím dobám i pro jednotky betonu. Větší rozdíl je v počtu jednotek, které musely čekat ve frontě. Množství čekajících jednotek se zvýšilo přibližně o 52 %, takže nyní dosahuje počtu mezi 160 a 166 jednotkami. V průměru tedy budou každý den 3 jednotky betonu čekat na technologii. Zvýšila se také průměrná doba tohoto čekání, kdy každá z těchto jednotek bude muset čekat o 9 vteřin déle. Počet jednotek betonu, které strávily ve frontě delší dobu než 9 minut, se samozřejmě zvýšil také a to na 0,42 %, tedy přibližně na 18 až 19 jednotek celkem, což je o 7 jednotek více než v předchozím systému.

Průměrná doba jednotek betonu strávená v systému se zvýšila o 0,06 na 10,42 minut, tedy v podstatě o dobu zanedbatelnou. Rozdíl oproti ideální době strávené v plynulém systému tedy také vzrostl o 0,06 na 0,20 minuty. Průměrná doba čekání všech jednotek se změnila z 0,10 na 0,16, a proto rozdíl v průměrném času přepravy oproti ideálnímu systému zůstal zachován.

Maximální doba jednotek betonu strávená v upraveném systému se s 95 % spolehlivostí nachází v intervalu od 30,10 do 30,76 minut. Taková doba v modelu porušuje pravidlo o zpracování betonu v průměru o necelou půlminutu. Nicméně systém by přesto mohl být akceptován, neboť do této doby je započítán i návrat technologie do výchozí pozice, který představuje dobu v intervalu od 0,5 do 9,5 minut s větší pravděpodobností vyšších hodnot. V reálném systému lze tedy předpokládat, že maximální doba, za kterou bude beton vyložen na horní pracovní plošině, bude mezi 21 a 30 minutami.

Dodávky výztuže byly dle očekávání změnou ovlivněny poněkud více. Maximální délka fronty se v průměru sice prodloužila, nicméně stále bude mezi 2 a 3 jednotkami. Výrazně se ovšem zvýšila maximální doba čekání ve frontě. Z původní komfortní rezervy se maximální doba čekání zvýšila v průměru na 9 minut, což však stále nepřekročí zadaný limit 10 minut čekání. Z hraničních hodnot v rámci intervalu spolehlivosti lze vypozorovat, že během 100 simulací muselo čekání někdy překročit limit 10 minut, neboť uvedené hraniční hodnoty jsou 99,99 % namísto 100 %, nicméně i na intervalu spolehlivosti 99 % je maximální doba čekání ve frontě 9,48 minuty. Lze tedy i tuto podmínku uznat jako splněnou.

Počet jednotek železa, které musely čekat ve frontě, vzrostl hned dvojnásobně a dosahuje tak již 8,39 % celkového množství přepravovaných jednotek. Oproti tomu průměrná doba čekání těchto jednotek vzrostla pouze o 0,05 minuty na 2,37 minut. Dvojnásobná je tedy

také průměrná doba čekání všech jednotek železa se započítáním jednotek s nulovou čekací dobou; nyní dosahuje již 0,20 minut na každou přepravovanou jednotku železa.

Průměrná doba přepravované výztuže v systému je nyní 9,69 minut, tedy o 0,44 minuty déle než v předchozím systému. Pokud si uvědomíme, že se jedná o průměrnou dobu, která se týká všech jednotek železa, je rozdíl značný. Průměrná doba čekání se zvýšila o 0,10 minuty, znamená to tedy, že zbývající nárůst 0,34 minuty je čisté prodloužení cestovních časů, způsobeného tím, že přeprava stožárovým výtahem je v některých případech až dvakrát rychlejší, ale výztuž jej nemůže využívat tak, jako v předchozím modelu.

Maximální doba, kterou jednotka výztuže strávila v systému, je přirozeně také prodloužena, konkrétně o 1,32 minuty na 25,16 minuty. Po odečtení maximální doby čekání ve frontě vychází průměrná doba přepravy nejdéle čekajících jednotek železa na 16,15 minut, tedy podobnou dobu, která byla dosažena i v předchozím modelu.

Z naměřených výsledků obou front pracovníků vyplývá, že maximální délka fronty byla v mírné většině simulací 2 jednotky. Konkrétně v 64 simulacích ze sta pro spodní stanici a v 56 v horní stanici, zbývající simulace nedosáhly delší fronty než 1 jednotka. Jedná se samozřejmě o výrazný rozdíl oproti předchozímu modelu, nicméně nejde o takový problém, jak by se mohlo na první pohled jevit, a to zejména díky tomu, že je nastaven batching a je tedy pravděpodobné, že většina dvoučlenných front bude moci být obsloužena najednou. Mnohem větším problémem tak bude maximální doba čekání jednotek ve frontě, která je v upraveném systému o 150-185 % delší než v systému předchozím. Při cestě nahoru tak některé jednotky mohou čekat až 8,5 minuty, při cestě dolů dokonce 8,92 minuty. Taková doba je pro čekající pracovníky již velice dlouhá a v žádném případě nesplňuje zadanou podmínku, která povoluje nejdéle pětiminutové čekání na přivolání výtahu.

Obrovský rozdíl v upraveném systému je také patrný u počtu jednotek pracovníků, které musí čekat na přivolání výtahu. Zatímco počet entit pracovníků, které musí čekat, než přijdou na řadu, byl v předchozím systému v řádu jednotek, v upraveném systému je těchto entit celkem 191 až 192. Tyto entity navíc v průměru čekají o 1 minutu déle. Kumulativně tedy pracovníci, kteří se potřebují přepravit na horní pracovní plošinu, stráví čekáním ve frontě 480,8 až 503,2 minut. Pracovníci v opačném směru ztratí 482,3 až 508,3 minut. Při průměru 2,2 pracovníka na 1 entitu tak celková takto ztracená doba bude 2 118,8 až 2 225,3 člověkominut. Vzhledem k tomu, že náklady na 1 člověkohodinu jsou přibližně 500 Kč, společnost tak tímto způsobem zbytečně přijde o 17 657 až 18 544 Kč, což je již částka nezanedbatelná.

Sledovaný limit doby čekání pracovníků byl nastaven na 1,5 minuty. Zatímco v předchozím modelu tento limit překročily pouze 2 jednotky pracovníků v každém směru, v upraveném systému již déle než 1,5 minuty čeká v každém směru 122 až 123 jednotek. Z pohledu pocitů pracovníků na stavbě je toto čekání rozdíl mezi extrémní smůlou při fungování prvního systému, a čekáním občas nevyhnutelným v případě systému upraveného.

Průměrná doba, kterou pracovník stráví v systému je 6,83 minut. Tato doba je kratší, než u systému předchozího, což může být na první pohled překvapující. Nicméně je důležité si uvědomit, že přeprava pomocí stožárového výtahu je po celou dobu výstavby rychlejší než přeprava malým vrátkem, proto je v novém systému zkrácena průměrná doba samotné přepravy. Při uvažování hypotetického plynulého systému byl v předchozím modelu průměrný přepravní čas přibližně 7,11 minut, v upraveném ideálním systému je tento čas 6,68 minut. Naopak průměrná doba čekání vzrostla z 0,00 na 0,18 minut. Z uvedených hodnot tedy vychází, že průměrná doba přepravy je 6,65 minut, což je o 0,03 minut méně než v hypotetickém modelu. Tento rozdíl způsobila skutečnost, že pracovníci čekali na příjezd kabiny z druhé stanice méně často, než v 50 % případů, konkrétně přibližně v 49,3 %.

Maximální doba strávená v systému vzrostla přibližně o 4,7 minut, celkem na 24,12 minut. Také u této charakteristiky jdou proti sobě dva efekty – zkrácení průměrné doby přepravy, ale zároveň prodloužení čekacích dob. Nejdelší čekání ve frontě je u pracovníků v upraveném modelu průměrně 8,92 minut, přeprava těchto dlouho čekajících pracovníků tedy trvá průměrně 15,2 minuty, tj. o 0,85 minuty kratší dobu než v původním systému.

Již před simulací upraveného systému vertikální dopravy bylo jisté, že model bude dosahovat horších výsledků, než navržený systém čtyř technologií. Samozřejmě to jinak ani nejde, neboť úprava spočívala ve snížení přepravní kapacity systému odebráním jednoho přepravního prostředku. Cílem simulačního modelu ovšem bylo zjistit, zda zhoršení plynulosti systému je natolik výrazné, že nový systém nevyhoví nastaveným podmínkám, a tedy nebude vhodným řešením vertikální dopravy. Celkově lze říci, že ačkoli všechny části systému byly úpravou ovlivněny, většina výsledků stále dosahuje dostatečných hodnot, aby mohl být systém akceptován. Velkým, a nakonec také klíčovým problémem však zůstává prodloužení maximální doby čekání pracovníků na 8,92 minut, což je zcela nepřijatelné. Tato hodnota je navíc nejdelším čekáním pracovníků směřujících z horní pracovní plošiny zpět na úroveň terénu, což v reálném systému znamená ještě relativně větší komplikaci. Pokud by totiž osoba na pracovišti měla zdravotní problém, například nevolnost, závrať, srdeční problém, ale také jakékoli zranění, musela by čekat téměř devět minut, než by mohla buď nastoupit do výtahu, nebo jej alespoň přivolat, což by mohlo mít i fatální následky. Tyto zdravotní komplikace jsou realitou každé stavby, a ačkoli problémy vyžadující odvoz do nemocnice či zranění s fatálními následky jsou díky správnému řízení stavby a plnění bezpečnostních předpisů prakticky vyloučené, lehčí výše popsané zdravotní potíže se vyskytnou na každé výškové stavbě a jsou jednoduše řešitelné rychlým odvozem pracovníka na úroveň terénu a krátkým odpočinkem. Méně závažný, ale přesto nepříjemný problém spojený s čekáním na horní stanici by pak nastal, pokud by vedoucí pracovník na horní pracovní plošině měl schůzku kontrolního dne, případně by jej volal inspektor BOZP, či technický dozor investora. Také v těchto případech je třeba, aby bylo možné do 5 minut nastoupit do výtahu či jej alespoň přivolat, což upravený systém nezaručuje.

Vzhledem k tomu, že nevyhovující podmínky jsou pouze u přepravy pracovníků, bylo navrženo zrušení přepravy výztuže stožárovým výtahem. Tak by výtah transportoval pouze

osoby. Oba druhy materiálu by i nadále byly přepravovány velkým vrátkem a jeřábem. Jednoduchou úpravou modelu tak byla tato změna implementována a byl opět proveden trial zastupující 100 nezávislých simulací. Výsledky těchto simulací ukázaly, že ačkoli je nyní systém pro pracovníky příznivější, snížit maximální dobu čekání pracovníků pod 5 minut se nepodařilo. V aktuálním systému je hodnota tohoto čekání 7,05 minut, kromě toho má ale tato změna velmi negativní vliv na přepravu výztuže a betonu. Z největších nedostatků pro výztuž stačí uvést, že průměrné maximální čekání ve frontě je delší než 30 minut, nejdelší doba strávená v systému je v průměru 49 minut a nejdelší fronta se ve většině případů skládá ze 4 jednotek. Přeprava betonu je pak zcela nevyhovující, když kromě velmi podobných výsledků, kterých dosahují jednotky výztuže, je nejdelší fronta v průměru mezi 2 a 3 jednotkami, což je kritické porušení základní podmínky.

Z uvedených důvodů tak je nutné oba modifikované systémy vertikální dopravy, tj. takové, které fungují bez použití malého vrátku pro přepravu osob, prohlásit při stanovených parametrech stavby za nevyhovující.

4.3.5 Volba vyhovujícího systému

Díky simulačnímu modelování se tedy podařilo ověřit, že navržený systém vyhovuje zadaným podmínkám. Zároveň byl zkoumán také alternativní systém, který byl původně navržen z důvodu ušetření realizačních nákladů. Pomocí simulačního modelování však bylo zjištěno, že tento systém, ani jeho upravená varianta nevyhovují zadaným podmínkám a nemohou proto být použity jako řešení vertikální dopravy připravovaného komína.

Vzhledem k charakteru výstavby a zátěže na vertikální dopravu v konkrétním zkoumaném projektu lze tvrdit, že nároky na kapacitu přepravních prostředků rostou spolu s průběhem výstavby komína, neboť s postupem výstavby roste vzdálenost, na jakou musí tyto prostředky přepravit osoby a materiál. Nejnáročnější jsou proto konečné fáze realizace.

S ohledem na výše uvedené je proto vždy nutné vyhodnotit efektivitu systému vertikální dopravy na každý projekt zvlášť. Modelovaný projekt popisuje výstavbu komína vysokého 200 m, s konstantní tloušťkou betonové stěny 500 mm po celé výšce komína a s vnitřním průměrem komínového dříku 13 m. Změny těchto základních parametrů budou mít samozřejmě vliv na parametry modelu. Je proto pravděpodobné, že navržený alternativní systém vertikální dopravy bude vyhovovat poměrně menšímu komínu, kde přepravní časy nebudou tak vysoké. Toto lze velice jednoduše ověřit například tak, že ve stávajícím modelu bude zkrácena doba sběru dat, což značí snížení výšky komína. Pokud tedy bude uvažován komín stejných parametrů, ale výšky pouze 100 m, což je ostatně výška u komínů relativně běžnější, doba sběru dat bude v modelu nastavena na 27 dní, tedy na polovinu původního času. Ostatní parametry modelu se nemění. Na případ popsaného stometrového komína bude aplikován model navrženého alternativního systému vertikální dopravy, který uvažuje

s použitím pouze velkého vrátku, jeřábu a stožárového výtahu. Je opět proveden trial, který zastupuje 100 nezávislých simulací.

Dle výsledků trialu splňuje systém všechny požadované vlastnosti. Nejdelší fronta betonu je tvořena 1 jednotkou, nejdelší čekání ve frontě je přibližně 7,6 minuty a nejdelší doba strávená v systému je asi 17,2 minuty. Nejdelší frontu železa ve většině simulací tvořily 2 jednotky, ve zbývajících simulacích pak pouze jedna. Nejdelší doba čekání ve frontě je v průměru 3,6 minut a nejdelší doba, kterou jednotka železa stráví v systému 12,4 minut. Fronta pracovníků měla v průměru maximální délku 1,10, resp. 1,06 jednotek pracovníků. Nejdelší čekání pracovníků ve frontě trvalo průměrně 3,82 až 3,86 minut, což je povolená doba v rámci limitu 5 minut. Nejdelší doba jednotek pracovníků strávená v systému je 11,78 minut. Z výsledků tedy vyplývá, že pro výstavbu komínu výšky 100 m, ale za jinak nezměněných parametrů, je alternativní systém vertikální přepravy vyhovující, a lze tak tedy ušetřit značné prostředky, které by jinak musely být investovány do technologie malého vrátku a jeho provozování a údržby.

Simulační model tak, jak je vypracován ve své základní verzi, tedy se 4 druhy technologie, je možné libovolně upravovat a přizpůsobit jej tak aktuálně řešenému projektu. Pro snazší úpravy parametrů a přístupnější model by byly přidány vlastní proměnné, které by nahradily jinak pevně zadané hodnoty. To by umožnilo použít model i těm zaměstnancům společnosti, kteří nejsou se simulačním modelováním seznámeni. Pro každý projekt by tak stačilo zadat výšku komína, tloušťku betonového dříku, jeho vnitřní průměr a plánovanou rychlost tažení. Pomocí těchto údajů a velice jednoduchých vzorců by model spočítal celkovou délku výstavby a intervaly mezi příchody jednotek betonu. Intervaly mezi příchody jednotek výztuže je třeba vždy stanovit mimo model, neboť kromě rozměrů komína je množství a délka výztuže stanovena projektovou dokumentací. Intervaly mezi příchody pracovníků závisí pouze na počtu pracovníků, kteří jsou na tento projekt přiděleni, ale pravdou je, že v tomto ohledu jsou rozdíly tak malé, že lze vždy uvažovat použité normální rozdělení se střední dobou 15 minut. Pro každou použitou technologii vertikální dopravy by pak stačilo zadat maximální rychlost přepravy, fixní doba by pro jednotlivé typy technologie měla zůstat zachována bez ohledu na rychlost aktuálních strojů. Po zadání těchto základních údajů je model schopen analyzovat vhodnost různých systémů vertikální dopravy, které je možné využít. Přesto pro další použití bude vždy nutné upravit model tak, aby zohlednil také specifika, která nelze zadat obecně, jako například druhy použité technologie (stožárový výtah nemusí být k disposici, namísto toho může být využíváno více vrátků, případně může být doplněn zcela nový přepravní prostředek), která technologie bude určena k přepravě kterých jednotek, nebo pro některé z technologií může být projektováno více stanic než pouze dvě. Všechna tato specifika však samozřejmě lze řešit další úpravou simulačního modelu.

5 Vypracování matematického modelu

V rámci nabídkového řízení a obchodních jednání byl pečlivě připraven rozpočet výstavby komína. Tento rozpočet posloužil ke stanovení obchodní ceny pro účast ve výběrovém řízení. Pro určení skutečné realizační ceny je však třeba analyzovat rozpočet podrobněji.

Nejzásadnější ekonomickou otázkou každého projektu je jeho nákladovost, tedy poměr nákladů a výnosů. Vzhledem k tomu, že není možné při zachování rozsahu prací zvyšovat obchodní cenu, jedinou možností, jak dosáhnout minimální nákladovosti, je optimalizovat náklady, přičemž je nutné započítat všechny druhy výdajů související s projektem. Mezi tyto výdaje tak patří jak náklady samotné realizace, tak náklady režijní, finanční, mzdové a subdodavatelské.

Po analýze rozpočtu byly pro účely minimalizace celkových nákladů jednotlivé nákladové položky rozděleny do 5 kategorií: Pracovní síla, Logistika a ubytování, Materiál, Technologie a Finanční náklady. Část nákladů, jako například některé materiály, některé profese a mnohé další, již nelze ovlivnit cenou, množstvím, ani zvolenou strategií a nemají tedy žádný vliv na optimalizaci celkových nákladů. Tyto náklady tak nemá smysl dále v této kapitole uvažovat, nebudou zahrnuty do matematického modelu a budou přičteny až k optimalizované částce.

Zbývající nákladové položky, které má smysl zahrnout do optimalizačního modelu, jsou rozděleny do uvedených kategorií. Tyto kategorie jsou navzájem provázány, hodnoty většiny položek závisí na ostatních položkách, tedy zvolených řešeních. Následující tabulka 5-1 uvádí seznam položek rozdělených do kategorií, dále popisuje provázanost kategorií a stručně vystihuje hlavní charakteristiky položek. Bližší popis každé položky bude následovat v další části této práce.

Vzhledem k tomu, že konkrétní informace o cenách, mzdách a ostatních nákladech jsou klasifikovány jako citlivá data, všechny takové informace uvedené v této kapitole jsou upraveny pomocí jednotného koeficientu. Tato úprava samozřejmě má vliv na hodnotu účelové funkce, nicméně nijak neovlivní optimální řešení. Pro vyloučení pochybností, jedná se pouze o změnu uvedených cen a nákladů, nikoli o úpravu jakýchkoli jiných dat, jako jsou například počty pracovníků či jakákoli další čísla či poměry. V optimalizačním modelu použitém ve firmě mimo tuto diplomovou práci budou upravené cenové hodnoty nahrazeny skutečnými daty.

Tabulka 5-1 Seznam nákladových položek dle kategorií

Kategorie	Nákladové položky	Vzájemná závislost	Další charakteristiky
1. Pracovní síla	Vlastní: Vedoucí Vlastní: Dělník Vlastní: Pomocník Místní: Dělník Místní: Pomocník	Závisí na: 3, 4 Ovlivňuje: 2	Vlastní pracovníci mají vyšší produktivitu práce. Vztah mezi počtem vlastních a místních. Minimální počet vlastních. Omezený pracovní prostor.
2. Logistika a ubytování	Nákladní přeprava Přeprava osob (auta) Letenky Ubytování	Závisí na: 1, 3, 4 Ovlivňuje: --	Kapacita automobilů. Kapacita bytů.
3. Materiál	Cihly Tmel	Závisí na: 5 Ovlivňuje: 1, 2	Různí dodavatelé. Ovlivňuje produktivitu.
4. Technologie	Posuvné bednění Vlastní technologie	Závisí na: 5 Ovlivňuje: 1, 2	Dva možní subdodavatelé různého rozsahu dodávky.
5. Finanční náklady	Úvěr	Závisí na: -- Ovlivňuje: 1, 3, 4	Omezení místních dodávek. Omezení dodávek z 3. zemí.

5.1 Nákladové položky

5.1.1 Pracovní síla

Kategorie Pracovní síla obsahuje náklady na všechny pracovníky na stavbě. Z pohledu minimalizace nákladů není třeba zahrnovat všechny profese, například hlavní stavbyvedoucí, koordinátor, řidič apod. musí být na stavbě v každém případě a není tedy nutné je zahrnovat do optimalizačního modelu. Naopak je možné ovlivňovat náklady na dělnické profese, tedy vedoucího, zkušeného dělníka a pomocníka.

Z ekonomických důvodů bude zkoumána možnost najímání místní pracovní síly jako levnější alternativy k vlastním pracovníkům. Díky tomu je možné u každého místního pracovníka ušetřit náklady na ubytování, zahraniční stravné, dopravu apod. Místní pracovníci mají ovšem nižší produktivitu práce než vlastní a navíc není možné utvořit tým pouze z místních pracovníků, vždy je nutné, aby byl na stavbě dostatečný počet vlastních zaměstnanců.

Nákladové položky této kategorie lze dělit na 3 profese, z nichž 2 mohou vykonávat místní pracovníci. Vlastní pracovníci mohou být vedoucími, dělníky a pomocníky, místní pak mohou zastávat pouze pozice dělníků či pomocníků.

Celkový počet pracovníků není určen jednoznačně, závisí totiž na několika dalších faktorech. Základním faktorem je produktivita pracovníků, kdy lze říci, že vlastní pracovníci mají průměrně dvojnásobnou produktivitu práce než místní, proto pokud se firma rozhodne zaměstnávat místní pracovníky, musí již počítat s větším počtem lidí na stavbě. Pracoviště, tj. zejména horní pracovní plošina, však pojme pouze omezený počet osob, což je také jeden z limitů. Kromě toho závisí počet pracovníků na použitých technologiích a zvoleném subdodavateli, neboť každý z možných subdodavatelů technologie vyžaduje jinou součinnost, a zároveň zvolený materiál má vliv na pracnost.

Celkový počet vlastních pracovníků má přirozeně vliv na celkové náklady za přepravu a ubytování.

5.1.2 Logistika a ubytování

Tato kategorie obsahuje čtyři nákladové položky, a to nákladní mezistátní přepravu, vnitrostátní a vnitrostaveništní přepravu osob automobily, letenky vlastních pracovníků a jejich ubytování. Ostatní uvažované náklady, které by tematicky spadaly do této kategorie, nelze dále optimalizovat a nejsou zde uvedeny.

Nákladní přepravu je možné zajistit ve spolupráci s několika přepravními společnostmi, které byly předem poptány. Bylo provedeno výběrové řízení, po kterém z celkem 7 kandidátů bylo 6 vyřazeno, a byla vybrána jediná společnost. Jediným kritériem v tomto případě byla cena, která je závislá na množství přepravovaných kontejnerů. Množství kontejnerů a jejich obsah dále závisí na volbě subdodavatelů posuvného bednění a materiálů. V případě, že budou objednány lokální materiály, bude zhotovitel přepravovat pouze technologie, mechanismy apod. s tím, že jeden z možných dodavatelů posuvného bednění je schopen nabídnout také tyto technologie; potom by na nákladní přepravu z ČR do Egypta zůstalo jen velmi málo položek.

Přeprava osob v Egyptské arabské republice je zajištěna pomocí osobních automobilů a mikrobusů, které jsou, spolu s řidičem, pronajaty po dobu výstavby. Osobní automobily jsou určeny zejména pro techniky a stavbyvedoucí, tedy se nevyskytují v tomto modelu, ostatní pracovníci využívají mikrobusy. Každý osmimístný mikrobus slouží pouze k přepravování zaměstnanců firmy, počet vozidel je tak přímo závislý na počtu vlastních pracovníků.

Letenky jsou placeny vlastním pracovníkům, náklady tedy rostou s jejich počtem.

Ubytování pracovníků je zajištěno na české ambasádě v Káhiře. Vlastní pracovníci mají k disposici dostatečný počet bytů za stanovenou cenu za měsíc a byt.

5.1.3 Materiál

Materiálové položky, které mají vliv na optimalizaci nákladů, jsou pouze dvě – žáruvzdorné cihly a kyselinovzdorný tmel pro stavbu vnitřního ochranného pouzdra komína. Každá z těchto položek má více možných dodavatelů, přičemž u cihel se jedná o českou společnost zde označenou jako CC, polskou společnost CP a egyptského výrobce CE, tmel lze objednat u české společnosti TC či u německého výrobce TD. Je důležité upřesnit, že se jedná o speciálně tvarované cihly s perem a drážkou, k jejichž výrobě je třeba mít předem připravené formy.

Výhody českých výrobců jsou zejména cena a dobrá znalost cihel z domácího trhu, ačkoli český tmel je naopak novinkou na trhu a zatím nebyl použit. V matematickém modelu se však tyto vedlejší faktory neprojeví, neboť jejich vliv je skutečně zanedbatelný. V případě nákupu českých materiálů je třeba zajistit přepravu do Egypta na vlastní náklady dle podmínek předchozí kategorie.

Polský výrobce cihel je ze všech tří variant nejdražší. Výhodou je, kromě vysoké kvality materiálu, vlastní přeprava do přístavu v Alexandrii a tedy úspora přepravních nákladů. Přeprava z Alexandrie na stavbu je zajištěna místním přepravcem za předem známou cenu, tyto náklady tak musí být k pořizovací ceně připočteny.

Výrobce tmelu v Německu dodává jeden z nejznámějších a nejspíše také nejkvalitnějších tmelů na trhu. V rámci obchodních jednání se navíc podařilo zajistit velice dobrou cenu. Jedinou nevýhodou je tak nutnost uhradit výrobci přepravu z Německa do ČR a následně zajistit přepravu z ČR do Egypta, neboť výrobce není schopen materiál do Egypta dodat napřímo.

Možností, která se na první pohled jeví nejekonomičtěji, je zajistit cihly na místním trhu. Společnosti se podařilo kontaktovat dva možné výrobce, kteří potřebnou dodávku materiálů nabídli. První výrobce byl však nakonec vyřazen zejména z důvodu nedostatečných výrobních kapacit. Druhá firma zde nazvaná CE je schopna cihly vyrobit a dodat, ovšem pouze v omezených tvarech, neboť nemá připraveny formy na tvary požadované. Výroba nových forem je sice možná, ale příliš nákladná, proto by zhotovitel musel pracovat s cihlami, které může továrna vyhotovit nyní. Pro stavbu komína jsou takové tvary akceptovatelné, nicméně pro zhotovitele to znamená vyšší pracnost z důvodu menších rozměrů cihel, a bude proto nutné zaměstnat více dělníků. Zároveň se zvýší spotřeba tmelu z důvodu většího množství spár, a to přibližně na dvojnásobek původního množství. Jednoznačnou výhodou je však možnost ušetřit náklady za přepravu materiálů z Evropy.

Na zvolených dodavatelích materiálu tak závisí celkový počet pracovníků z důvodu rozdílných rozměrů cihel a tedy rozdílné pracnosti. Dále volba dodavatelů ovlivní také celkové náklady na přepravu materiálů. Kromě toho jsou na materiálové dodávky kladena omezení spojená s financováním projektu, kdy je nutné splnit podmínky banky. Tyto podmínky jsou podrobněji popsány v dalších částech této práce, zejména v částech 5.1.5 a 5.2.

5.1.4 Technologie

Jedinými dvěma nákladovými položkami, které obsahuje kategorie Technologie, jsou posuvné bednění a vlastní technologie.

Posuvné bednění je unikátní technologie, která umožňuje betonovat výškové stavby rychle, nepřetržitě a bez dilatací. V dnešní době již není možné tuto technologii koupit, ale existuje hned několik firem, které se specializují na její pronájem, neboť je takové řešení mnohem efektivnější pro trh i pro samotného zhotovitele. Z obchodního pohledu jsou rozdíly mezi těmito společnostmi většinou zejména v celkové ceně, která vychází z jednotlivých nabídek. Je proto snadné porovnat různé možnosti a vyřadit takové, které jsou příliš drahé, aniž by poskytovaly nějaké výhody, a to bez použití jakýchkoli matematických metod. Po vyřazení dvou takto dominovaných variant má zhotovitel na výběr dva možné subdodavatele, tj. společnost z Rakouska, zde označenou PBA, a společnost se sídlem v Egyptě označenou PBE. Zásadním rozdílem mezi oběma společnostmi je fakt, že zatímco firma PBA dodává standardní rozsah prací, tedy pouze pronájem posuvného bednění spolu se dvěma supervizory, egyptský dodavatel PBE poskytne kromě uvedeného také další technologie uvedené v následujícím odstavci a veškerý obslužný personál, což bude mít samozřejmě vliv na položky v první nákladové kategorii. Cena za takto rozšířený rozsah prací je ovšem výrazně vyšší.

Vlastní technologie patřící zhotoviteli bude na stavbě použita v každém případě. Tato nákladová položka v optimalizačním modelu však bude obsahovat pouze tu technologii, kterou by mohla pronajmout společnost PBE, pokud bude vybrána jako dodavatel posuvného bednění. Taková technologie obsahuje zejména velký vrátek, závěsné lávky a vnitřní vyzdívací plošinu pro realizaci cihelného pouzdra. Pokud bude třeba použít vlastní technologii, musí být v této nákladové položce započítány odpisy, tedy jakýsi fiktivní pronájem. Kromě toho je třeba technologii dopravit na stavbu, bude tedy navýšena položka nákladní dopravy. Vzhledem k tomu, že se jedná o zahraniční dodavatele, jsou i v tomto případě platná pravidla financování popsaná v následujících částech 5.1.5 a 5.2.

5.1.5 Finanční náklady

Poslední nákladovou kategorií jsou finanční náklady. Pro účely optimalizačního modelu má smysl uvažovat pouze jednu nákladovou položku této kategorie a to náklady na úvěr. Výše těchto nákladů je odvozena z celkových nákladů dle ceníku a individuální nabídky banky, konkrétně se jedná o desetiny procent za otevření úvěrové linky a podobné činnosti a úrok dle stanovené úrokové sazby. Z charakteru těchto nákladů vyplývá, že na výsledek optimalizace nemají žádný vliv, není proto nutné tuto nákladovou položku vkládat přímo do modelu, stačí pouze úrokové sazby aplikovat na součet všech nákladů.

Přesto je tato kategorie zařazena do optimalizačního modelu a to z důvodu přísných podmínek čerpání úvěru, které jsou definovány bankou. Tyto podmínky jsou standardizované

pro všechny komerční i státní exportní banky v ČR a stanovují limity zahraničního podílu na hodnotě zakázky. Podle těchto pravidel musí být minimálně 50 % všech nákladů českého původu a zároveň maximálně 30 % z hodnoty nákladů lze zajistit na místním trhu. Vzhledem k tomu, že posuvné bednění, cihly a tmel a pracovní síla tvoří výraznou část všech nákladů projektu, je třeba zajistit, že uvedené podmínky úvěru nebudou porušeny.

5.2 Ekonomický model

Nyní jsou známy všechny podmínky a vztahy mezi nákladovými položkami, které budou třeba k formulaci ekonomického modelu a později k určení optimálního řešení. V této části práce budou uvedena konkrétní číselná data, ceny a hodnoty popisované výše v této kapitole. Všechny tyto údaje poskytl zhotovitel na základě rozsáhlých materiálů při tvorbě obchodní nabídky a jedná se vždy buď o vlastní výpočty, nebo hodnoty na základě nabídek možných subdodavatelů. Veškeré náklady budou uváděny v českých korunách, případné náklady vyžadující platby v zahraničních měnách jsou pro účely této práce přepočítány stanoveným kurzem.

Zhotovitel využije matematické modelování ke zvolení správné strategie pro optimalizaci celkových nákladů. Tato optimalizace spočívá v minimalizaci nákladů jako součtu dílčích, ale vzájemně provázaných složek, tak jak bylo uvedeno v předchozí části práce. Nejprve je však třeba stanovit výchozí hodnoty celého projektu, které vychází z technické a výrobní přípravy. Ta byla provedena v prostředí obdobného tuzemského projektu, tedy byla předpokládána stejná stavba, ovšem realizovaná v ČR za standardních podmínek a s obvyklými subdodavateli.

V takovém předpokládaném prostředí je uvažováno celkem 22 pracovníků na zkoumaných pozicích, ostatní pozice (stavbyvedoucí, koordinátor apod.) zde není třeba započítávat. Těchto 22 lidí je do tří předem uvedených kategorií Vedoucí, Dělník, Pomocník rozděleno následovně: 6 vedoucích, 8 dělníků, 8 pomocníků. Tyto počty uvažují vlastní pracovní sílu, nicméně pokud se firma rozhodne zajistit místní lidi, je třeba z důvodu nižší produktivity nahradit každého jednoho vlastního zaměstnance dvěma egyptskými pracovníky.

Je však třeba mít na paměti, že pracovní prostor je omezený a není smysluplné mít na pracovní plošině více než 12 osob najednou. Při dvousměnném provozu je tak maximální počet osob určených pro práci na plošině 24, což je dvojnásobné množství, než by bylo uvažováno při realizaci standardního tuzemského projektu. Pracoviště mimo pracovní plošinu prakticky není omezeno prostorem, nicméně lze říci, že pro více než 12 osob zde není dostatek práce a také s ohledem na koordinaci pracovníků je takové množství osob limitní. Lze tedy odvodit, že maximální počet pracovníků na stavbě bude 24 na 1 směnu, tedy celkem 48. Větší množství pracovníků není akceptovatelné.

Vzhledem k tomu, že pozici vedoucích musí zastávat pouze vlastní pracovníci, je minimální počet vlastních zaměstnanců 6, ostatní pozice mohou být nahrazeny místními pracovníky. Pro zajištění správného řízení stavby je však další podmínkou poměr vlastních a místních pracovníků, kdy na každého 1 vlastního pomocníka se na stavbě mohou pohybovat maximálně 4 pomocníci místní a na každého vlastního dělníka maximálně 3 místní dělníci. Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím počet osob na stavbě je použitý materiál keramického pouzdra. V případě, že bude rozhodnuto o dodávce místních cihel, bude třeba zajistit pro vyzdívání další 4 vlastní pracovníky-dělníky (či ekvivalent místních), tedy namísto původních 6 vlastních pracovníků na směnu jich bude 10.

Mzdové náklady na vlastního zaměstnance (včetně zahraničního stravného, pojištění apod.) činí průměrně 500,- Kč za 1 hodinu pro vedoucího, 460,- Kč za 1 hodinu pro dělníka a 400,- Kč za 1 hodinu pro pomocníka. Náklady na místního pracovníka jsou vyčísleny na 225,- Kč/hod pro dělníka a 205,- Kč/hod pro pomocníka. Počet hodin odpracovaných 1 pracovníkem po celou dobu trvání výstavby lze stanovit jako průměr 2 000 hodin (vlastní výpočet výrobního oddělení zhotovitele – průměrný počet člověkohodin).

Počet vlastních pracovníků přímo ovlivňuje přepravní a ubytovací náklady. Poskytnuté byty na české ambasádě v Káhiře jsou vybaveny a připraveny k použití, disposice 3+1 pojme 6 lůžek na 1 byt a měsíční nájem za každý byt je 22 000,- Kč (sazba stanovená českou ambasádou v Káhiře). Přesné ceny letenek pro vlastní pracovníky nemohou být známy předem, neboť se mohou měnit každý den, nicméně lze předpokládat průměrnou cenu zpáteční letenky jako 14 950,- Kč za 1 osobu (jedná se o odhad vycházející z průměrných cen letenek, se kterými zhotovitel své pracovníky do Egypta vysílá). Přeprava v Egyptě a v areálu elektrárny bude zajištěna pomocí pronajatých mikrobusů. Každý mikrobus má v ceně měsíčního pronájmu započítaného i řidiče, kromě nějž pojme každé vozidlo 8 osob. Tyto mikrobusy mohou využívat pouze vlastní pracovníci a počet vozidel tak musí být určen dle počtu vlastních zaměstnanců na stavbě. Měsíční náklady na provoz jednoho mikrobusu včetně řidiče, pohonných hmot a ostatních souvisejících nákladů jsou 124 500,- Kč (kalkulace dle skutečných nákladů během předchozího projektu). Všechny náklady uvedené v tomto odstavci tak prodražují práci vlastních zaměstnanců.

Výdaje za nákladní přepravu do Egypta závisí na několika strategických rozhodnutích společnosti. V první řadě se jedná o výběr přepravce. Jak je uvedeno výše, zhotovitel vybral nejlevnějšího, ale zároveň spolehlivého přepravce na základě výběrového řízení a porovnání cen. Cena vítězného přepravce je 92 000,- Kč za 1 kontejner přepravovaný z ČR na stavbu a 79 500,- Kč za 1 kontejner při návratu zpět do ČR. Tato cena zahrnuje také celní odbavení a veškeré poplatky s ním spojené.

Dalším rozhodnutím, které firma musí učinit, je výběr subdodavatelů, konkrétně subdodavatele posuvného bednění a výrobce cihel a tmelu. Toto rozhodnutí již nelze spolehlivě učinit bez optimalizačního modelu, neboť volba subdodavatelů má zcela zásadní vliv nejen na přepravu, ale také na počet pracovníků a ostatní náklady, tedy zcela zásadní vliv

na celkové náklady zakázky. Z pohledu nákladní přepravy se zjednodušeně řečeno jedná o rozhodnutí, kolik kontejnerů bude přepravováno. V obvyklém prostředí, v jakém byla zakázka uvažována před optimalizací, by bylo třeba zajistit celkem 43 kontejnerů s cihlami, 2 kontejnery s tmelem a 4 kontejnery s technologií (potřebné počty kontejnerů vychází z váhového omezení 22 t/kontejner a ze zkušeností s přepravováním stejné sady technologií). Tato čísla také platí pro případ, kdy by zhotovitel objednal cihly i tmel v České republice a posuvné bednění v Rakousku, zbývající technologii by použil vlastní, která je k firmě k disposici. Ovšem v případě, že zhotovitel objedná posuvné bednění u egyptské společnosti, bude kontejner s technologií pouze jeden, neboť ostatní zařízení by poskytoval Egyptský subdodavatel. Kontejnery s technologií musí být přepravovány nejprve z ČR do Egypta a po dokončení projektu také zpět, je tedy třeba započítat cesty oběma směry. Kontejnery s materiálem budou přepravovány pouze jedním směrem, a to do Egypta. V případě, že zhotovitel objedná výrobu cihel u Egyptské společnosti, ušetří tak náklady na přepravu 43 kontejnerů, neboť přeprava z místní továrny na stavbu je významně levnější a je již obsažena v ceně cihel. V případě cihel z Polska zhotovitel také nemusí řešit přepravu, neboť ta je také zahrnuta v nabídkové ceně výrobce. Přeprava tmelu musí být objednána v každém případě, a to i pokud je materiál zakoupen v Německu.

Hlavními faktory při rozhodování mezi subdodavateli jsou cena, práce s materiálem (z důvodu pracnosti i spotřeby materiálu) a původ materiálu (kvůli podmínkám financování). Následující tabulka 5-2 poskytuje přehled kalkulace ceny pro jednotlivé dodavatele materiálu pro usnadnění výpočtu celkové ceny. U tmelů jsou uváděny dvě hodnoty, čísla v kurzívě za lomítkem zobrazují hodnotu v případě, že budou použity cihly z Egypta, a bude tak potřeba více tmelu.

Tabulka 5-2 Přehled cen materiálů (vychází z nabídek všech potenciálních subdodavatelů)

Materiál, Výrobce	Množství / *varianta s CE* [tuny]	Cena za jednotku (vč. daní) [Kč]	Cena přepravy na stavbu [Kč]	Celková cena [tis. Kč]
Cihly, CC	931	11 200,-	3 956 000,-	14 383,20
Cihly, CP	931	17 340,-[16]	2 351 300,-	18 494,84
Cihly, CE	931	11 630,-	--,-	10 827,53
Tmel, TC	42 / *84*	56 420,-	184 000,- / *368 000,-*	2 553,64 / *5 107,28*
Tmel, TD	42 / *84*	40 515,-[17]	184 000,- / *368 000,-*	1 885,63 / *3 771,26*

[16] Jednotková cena již obsahuje přepravu z továrny výrobce do přístavu v Alexandrii.
[17] Jednotková cena obsahuje přepravu z továrny výrobce na pozemky zhotovitele v České republice.

Kromě usnadnění kalkulace celkových nákladů každé z variant lze z tabulky vyčíst také dvě podstatné informace. První informací je, že cena Polských cihel, ačkoli již obsahuje dopravu do Alexandrie, je příliš vysoká. Cihly vyrobené v Polsku, ačkoli jsou velice kvalitní, nemají oproti českým cihlám žádnou výhodu co do rychlosti práce, naopak polský původ materiálu by mohl způsobit nesplnění zadaných podmínek banky. Lze tedy variantu s výrobcem CP označit jako dominovanou a dále ji již neuvažovat.

Druhou informací je, že český tmel je dražší než varianta tmelu z Německa. Tato skutečnost sama o sobě ovšem nestačí, abychom mohli označit variantu TC jako dominovanou, a to právě z toho důvodu, že se jedná o zboží českého původu. Může totiž nastat případ, kdy bude podíl zahraničních dodávek hraničit s limitem 50 % a již nebude možné odebírat tmel z jiné země než z České republiky. Tato otázka je ovšem také součástí matematického modelu.

Technologie posuvného bednění musí jít v každém případě z jiné země než z ČR, neboť jsou v současnosti pouze dvě reálné varianty na zajištění tohoto systému, a to buď z Rakouska, nebo z Egypta. Jak bylo popsáno v části 5.1.4 této práce, rakouská společnost PBA dodává pouze posuvné bednění spolu s dvěma supervizory. Tito pracovníci nijak nezasahují do prací na stavbě, jsou pouze přítomni na pracovišti. Celková cena od firmy PBA včetně dopravy a souvisejících nákladů je 10 522 360,- Kč.

Kromě toho je třeba na stavbě zajistit ostatní technologie, zejména vrátky, pracovní lávky, vyzdívací plošinu apod. Zhotovitel má takovou technologii k disposici a může ji do Egypta přivézt. Pak by musel hradit kromě přepravy 3 kontejnerů navíc také odpisy za tyto technologie, jakýsi fiktivní pronájem. Celkové náklady za tento pronájem technologií je vyčíslen na 4 790 420,- Kč po celou dobu výstavby.

Právě popsané řešení se spoluprací s rakouskou firmou PBA je pro zhotovitele obvyklým řešením obdobných zakázek. V Egyptě je však velice zajímavá možnost místního dodavatele posuvného bednění, která se může ukázat jako ekonomičtější či praktičtější řešení. Společnost PBE zajistí kromě samotné technologie posuvného bednění také uvedené technologie a dalších 8 místních pracovníků, kteří budou zhotoviteli k disposici jako 2 dělníci a 6 pomocníků. Všechny tyto položky nabízí egyptská společnost celkem za 20 375 860,- Kč.

Společnost již v bance projednala financování této zakázky, aby však takové financování mohlo být schváleno, je třeba splnit základní podmínku o původu zboží. Zjednodušeně řečeno se jedná o to, že minimálně 50 % všech nákladů zakázky musí být českého původu a zároveň maximálně 30 % nákladů může být původu egyptského. Zde je však důležité si uvědomit, že se nejedná pouze o náklady, které jsou obsaženy v popisovaném optimalizačním modelu, ale o všechny náklady zakázky, tedy také ty, které již modelem nelze nijak ovlivnit. Takové náklady jsou například mzdy hlavních vedoucích výstavby, dosud

nezapočítané materiály, použité mechanismy, režie apod. Celková výše těchto nákladů byla vypočítána a je celkem 25 159 640,- Kč[18].

5.3 Matematický model

Z popsaného problému lze vytvořit celočíselný matematický model. Před tím, než přistoupíme k formulaci samotného modelu, je však třeba definovat jeho proměnné a ostatní parametry. Matematický model vychází z výše popsaného ekonomického modelu, proto je vhodné popsat parametry a vlastnosti v návaznosti na předchozí podkapitolu.

Model zahrnuje tři různé profese pracovníků, které musí být zastoupeny v požadovaných počtech. Počet vedoucích, parametr označený *Vn*, je v tomto případě 6. Základní počet zkušených dělníků, *Dn*, je 8, stejně jako základní počet pomocníků, *Pn*. Z těchto hodnot vychází skutečný počet pracovníků uvedených profesí, a to jak vlastních tak místních. Počty vlastních vedoucích, dělníků a pomocníků jsou označeny *vv*, *vd* a *vp*, počet místních dělníků a pomocníků představují proměnné *md* a *mp*. Mzdy pracovníků jsou uváděny v hodinových sazbách za 1 pracovníka, v pořadí vedoucí, vlastní dělník, vlastní pomocník, místní dělník a místní pomocník jsou tyto sazby v Kč/hod/osoba následující: $wvv = 500, wvd = 460, wvp = 400, wmd = 225, wmp = 205$.

V každém z bytů na české ambasádě v Káhiře je možné ubytovat až 6 osob. V matematickém modelu je tato vlastnost popsána omezením

$$vv + vd + vp \leq 6 \cdot byt\ .$$

Celočíselná proměnná *byt* představuje počet pronajatých bytů.

Podobně jsou do modelu zapracovány mikrobusy. Jak bylo uvedeno, každý mikrobus pojme až 8 osob. Jedná se o dvousměnný provoz, takže skupina pracovníků pojede vždy směrem z ambasády na stavbu, kde se směny vystřídají, a opačným směrem pojede druhý tým pracovníků. Lze tedy říci, že jeden osmimístný mikrobus je schopen obsloužit 16 osob. Počet pronajatých mikrobusů je v modelu představován proměnnou *aut* a příslušné omezení tak má následující podobu:

$$vv + vd + vp \leq 16 \cdot aut\ .$$

Cena za pronájem bytu spolu se všemi vedlejšími náklady může být vyjádřena pro celou dobu realizace výstavby, náklady na jednu bytovou jednotku tak budou $Pbyt = 220\,000\ Kč$. Náklady na mikrobus musí zahrnovat také plat řidiče a pohonné hmoty, celková cena za pronájem jednoho mikrobusu s těmito náklady pak na celou dobu realizace vychází na $Paut = 1\,245\,000\ Kč$.

[18] Údaj je prostým součtem položek z výkazu výměr vypracovaného zhotovitelem, jedná se tedy o citlivý interní dokument společnosti. Samotný výpočet této hodnoty však spočívá pouze v součtu jednotlivých nákladových položek, které jsou oceněny stejným způsobem, jako položky uvedené v celé této části.

Kromě mikrobusu a bytů existuje ještě jedna nákladová položka, kterou je třeba hradit za vlastní pracovníky, a to jsou letenky. Počet letenek pracovníků představuje proměnná *let* a náklady na každou letenku jsou značeny *Plet*.

Další nákladovou položkou je kontejnerová přeprava. Vzhledem k tomu, že počet kontejnerů přepravovaných do Egypta nemusí odpovídat počtu kontejnerů přepravovaných zpět, jsou v modelu vytvořeny dvě celočíselné proměnné; počet kontejnerů přepravovaných do Egypta je značen *kt*, počet kontejnerů, které je třeba přepravit zpět, představuje proměnná *kz*. Ceny za přepravu kontejnerů byly uvedeny již v ekonomickém modelu, v modelu matematickém jsou náklady za přepravu jednoho kontejneru značeny jako *Pkt* a *Pkz*.

Další parametry již souvisí s výběrem subdodavatelů. Výběr dodavatelů cihel, tmelu a posuvného bednění byl namodelován pomocí bivalentních proměnných *CE*, *CC*, *TC*, *TD*, *PBA*, *PBE*, kdy každá proměnná nabývá hodnoty 1 v případě, že je zvolen příslušný subdodavatel a hodnoty 0, pokud není. Náklady na jednotlivé dodávky obsahují pouze cenu objednávky, tedy žádné související náklady, jako např. zvýšení počtu pracovníků, více přepravovaných kontejnerů apod. Tyto náklady jsou pak do modelu zapracovány jako *PCE*, *PCC*, *PTC*, *PTD*, *PPBA* a *PPBE*. Ceny za nákup tmelu, tedy *PTC* a *PTD* platí při objednání základního množství 42 tun, v případě, že cihly budou objednány od egyptského výrobce, je třeba objednat také více tmelu, do modelu tak jsou přidány výrazy $(1 + CE)$, kterými je cena za tmel vynásobena.

V případě objednání systému posuvného bednění od dodavatele z Rakouska je třeba do nákladů započítat také odpisy vlastních technologií, v matematickém modelu jsou tyto označeny *Ptech*.

Dalším pevným parametrem je souhrn té části celkového rozpočtu projektu, kterou nelze optimalizovat. Tyto náklady v této práci dosud nebyly popsány, ale zahrnují zejména v modelu neuvedené materiály, zaměstnance, mechanismy a jejich přepravu, dále výstroj komína, projektovou dokumentaci, režijní náklady apod. Tato část rozpočtu je stanovena pevně a nelze ji matematickým modelem nijak ovlivnit. Hraje však roli v případě vyhodnocování plnění podmínek stanovených bankou, kdy hranice povoleného objemu zahraničních dodávek vychází z celkových nákladů projektu, tedy z optimalizovaných nákladů i z nákladů ostatních. Celkové náklady optimalizované matematickým modelem, tedy takové, která bude účelová funkce minimalizovat, jsou označeny zkratkou NMOD, ostatní náklady jsou značeny NOST.

Vzhledem k vzájemné závislosti proměnných je třeba při formulaci matematického modelu dávat pozor, aby výsledný model nebyl nelineární. Model zkoumaného problému tak, jak je navržen nyní, by skutečně byl nelineární, neboť množství tmelu je závislé na výběru dodavatele cihel, dochází v modelu k vyjádřením typu $TC \cdot PTC \cdot (1 + CE)$ či $TD \cdot PTD \cdot (1 + CE)$. V takovém vyjádření dochází k násobení dvou bivalentních proměnných *TC* a *CE*, resp. *TD* a *CE*. Je tedy nutné formulovat tyto dvě podmínky jinak. Vhodným způsobem je

vytvoření nových bivalentních proměnných, které budou reprezentovat vztah proměnných původních.

První proměnná bude označena *TCCE* a hodnoty 1 bude nabývat v případě, že proměnná *TC* a zároveň proměnná *CE* budou rovny 1. V opačném případě je *TCCE* rovna nule. Do modelu poté bude doplněna nová omezující podmínka:

$$(TC + CE) - 1 \leq TCCE \leq \frac{1}{2}(TC + CE).$$

Analogicky bude vytvořena proměnná *TDCE* jako vyjádření hodnot *TD* a *CE*.

Celý matematický model problému je uveden na následující straně.

Minimalizovat $NMOD$,

za podmínek

$$NMOD \geq$$
$$\geq 2000 \cdot$$
$$\cdot (vv \cdot wvv + vd \cdot wvd + vp \cdot wvp + md \cdot wmd + mp \cdot wmp) +$$
$$+ kt \cdot Pkt + kz \cdot Pkz + aut \cdot Paut + byt \cdot Pbyt + let \cdot Plet +$$
$$+ CE \cdot PCE + CC \cdot PCC + PBE \cdot PPBE + TC \cdot PTC + TCCE \cdot$$
$$\cdot PTC + TD \cdot PTD + TDCE \cdot PTD + PBA \cdot (PPBA + Ptech) -$$
$$- 2000 \cdot PBE \cdot (2 \cdot wmd + 6 \cdot wmp) ,$$

$$(TC + CE) - 1 \leq TCCE \leq \frac{1}{2}(TC + CE) ,$$

$$(TC + CE) - 1 \leq TCCE \leq \frac{1}{2}(TC + CE) ,$$

$$vv = Vn ,$$

$$3 \cdot vd \geq md ,$$

$$4 \cdot vp \geq mp ,$$

$$vd + \frac{md}{2} \geq Dn + 8 \cdot CE ,$$

$$vp + \frac{mp}{2} \geq Pn ,$$

$$vv + vd + vp \leq 6 \cdot byt ,$$

$$vv + vd + vp \leq 16 \cdot aut ,$$

$$vv + vd + vp \leq let ,$$

$$vv + vd + vp + md + mp \leq 48 ,$$

$$kt = 3 + 43 \cdot CC + 2 \cdot CE + 3 \cdot PBA ,$$

$$kz = 1 + 3 \cdot PBA ,$$

$$md \geq 2 \cdot PBE ,$$

$$mp \geq 6 \cdot PBE ,$$

$$(NMOD + NOST) \cdot 0{,}5 \geq$$
$$\geq 2000 \cdot (md \cdot wmd + mp \cdot wmp) + PBE \cdot PPBE + PBA \cdot$$
$$\cdot PPBA + CE \cdot PCE + aut \cdot Paut + TD \cdot PTD + TDCE \cdot PTD ,$$

$$(NMOD + NOST) \cdot 0{,}3 \geq$$
$$\geq 2000 \cdot (md \cdot wmd + mp \cdot wmp) + PBE \cdot PPBE + CE \cdot PCE +$$
$$+ aut \cdot Paut ,$$

$$CE + CC = 1 ,$$

$$PBA + PBE = 1 ,$$

$$TC + TD = 1 ,$$

$$vv; vd; vp; md; mp; kt; kz; aut; byt; let \geq 0; \text{celočíselné} ,$$

$$CE; CC; PBA; PBE; TC; TD; TCCE; TDCE \in \{0; 1\} .$$

Pro lepší orientaci v modelu zobrazuje následující tabulka 5-3 celkový přehled proměnných a parametrů modelu i s hodnotami parametrů.

Tabulka 5-3 Přehled parametrů a proměnných matematického modelu

Zkratka	Význam	Hodnota
Parametry		
Vn	Požadovaný počet vlastních vedoucích pracovníků	6
Dn	Požadovaný počet vlastních dělníků (či ekvivalent místních)	8
Pn	Požadovaný počet vlastních pomocníků (či ekvivalent místních)	8
wvv	Hodinové náklady na vlastní vedoucí pracovníky	500
wvd	Hodinové náklady na vlastní dělníky	460
wvp	Hodinové náklady na vlastní pomocníky	400
wmd	Hodinové náklady na místní dělníky	225
wmp	Hodinové náklady na místní pomocníky	205
Pkt	Cena přepravy jednoho kontejneru z ČR do Egypta	92 000
Pkz	Cena přepravy jednoho kontejneru z Egypta do ČR	79 500
Pbyt	Celkové náklady na pronájem 1 bytu po dobu výstavby	220 000
Paut	Náklady na pronájem a provoz 1 mikrobusu po dobu výstavby	1 245 000
Plet	Náklady na jednu zpáteční letenku	14 950
PCE	Cena dodávky cihel od egyptského výrobce	10 827 530
PCC	Cena dodávky cihel od českého výrobce	10 427 200
PTC	Cena dodávky tmelu od českého výrobce	2 369 640
PTD	Cena dodávky tmelu od německého výrobce	1 701 630
PPBA	Cena pronájmu posuvného bednění od rakouského dodavatele	10 522 630
PPBE	Cena pronájmu posuvného bednění od egyptského dodavatele	20 375 860
Ptech	Odpisy/pronájem vlastní technologie	4 790 420
NOST	Celkové ostatní náklady rozpočtu	25 159 640

Zkratka	Význam	Hodnota
Proměnné		
NMOD	Celkové náklady optimalizované části rozpočtu	$\in \mathbb{R}$
vv	Počet vlastních vedoucích pracovníků	$\in \mathbb{N}$
vd	Počet vlastních dělníků	$\in \mathbb{N}$
vp	Počet vlastních pomocníků	$\in \mathbb{N}$
md	Počet místních dělníků	$\in \mathbb{N}$
mp	Počet místních pomocníků	$\in \mathbb{N}$
kt	Počet kontejnerů z ČR do Egypta	$\in \mathbb{N}$
kz	Počet kontejnerů z Egypta do ČR	$\in \mathbb{N}$
byt	Počet pronajatých bytů	$\in \mathbb{N}$
aut	Počet pronajatých mikrobusů	$\in \mathbb{N}$
let	Počet zakoupených zpátečních letenek	$\in \mathbb{N}$
CE	Objednání egyptského dodavatele cihel	$\in \{0; 1\}$
CC	Objednání českého dodavatele cihel	$\in \{0; 1\}$
TC	Objednání českého dodavatele tmelu	$\in \{0; 1\}$
TD	Objednání německého dodavatele tmelu	$\in \{0; 1\}$
PBA	Objednání rakouského dodavatele posuvného bednění	$\in \{0; 1\}$
PBE	Objednání egyptského dodavatele posuvného bednění	$\in \{0; 1\}$
TCCE	Fiktivní proměnná, nabývá hodnoty 1 pokud *TC=CE=1*	$\in \{0; 1\}$
TDCE	Fiktivní proměnná, nabývá hodnoty 1 pokud *TD=CE=1*	$\in \{0; 1\}$

5.4 Řešení úlohy v MPL for Windows

Jako první přepíšeme matematický model do prostředí modelovacího systému. Doporučuje se importovat data z tabulkového kalkulátoru, například z MS Excel, zejména díky přehlednosti, snadné editaci, rychlejší a pohodlnější práci s daty a díky možnosti exportu výsledků. Všechny výše popsané parametry jsou nastaveny v sešitu souboru MS Excel pro přehlednější úpravu parametrů modelu, pokud se například změní některé ceny. Vybrané

výsledky jsou také do tohoto sešitu exportovány, je tedy možné okamžitě zobrazit výsledky a identifikovat optimální strategii.

Matematický model sledované úlohy má v prostředí MPL for Windows následující podobu (řádkování upraveno z důvodu úspory prostoru):

```
TITLE komin;

Options
ExcelWorkBook="dpkomin.xlsx";

Data
Vn=ExcelRange("vn");Dn=ExcelRange("dn");Pn=ExcelRange("pn");
wvv=ExcelRange("wvv");wvd=ExcelRange("wvd");wvp=ExcelRange("wvp");
wmd=ExcelRange("wmd");wmp=ExcelRange("wmp");
Pkt=ExcelRange("pkt");Pkz=ExcelRange("pkz");
Pbyt=ExcelRange("pbyt");Paut=ExcelRange("paut");Plet=ExcelRange("plet");
PCE=ExcelRange("pce");PCC=ExcelRange("pcc");
PTC=ExcelRange("ptc");PTD=ExcelRange("ptd");
PPBA=ExcelRange("ppba");PPBE=ExcelRange("ppbe");
Ptech=ExcelRange("ptech");
NOST=ExcelRange("nost");

Variables
NMOD Export to ExcelRange("nmod");

Integer Variables
vv Export to ExcelRange("vv");vd Export to ExcelRange("vd");vp Export to
ExcelRange("vp");
md Export to ExcelRange("md");mp Export to ExcelRange("mp");
kt Export to ExcelRange("kt");kz Export to ExcelRange("kz");
byt Export to ExcelRange("byt");aut Export to ExcelRange("aut");let Export to
ExcelRange("let");

Binary Variables
CE Export to ExcelRange("ce");CC Export to ExcelRange("cc");
TC Export to ExcelRange("tc");TD Export to ExcelRange("td");
PBA Export to ExcelRange("pba");PBE Export to ExcelRange("pbe");
TCCE; TDCE;
```

```
Model
min z=NMOD;

Subject to
NMOD>=2000*(vv*wvv+vd*wvd+vp*wvp+md*wmd+mp*wmp)+kt*Pkt+kz*Pkz+aut
*Paut+byt*Pbyt+let*Plet+CE*PCE+CC*PCC+PBE*PPBE+TC*PTC+TCCE*PTC+TD
*PTD+TDCE*PTD+PBA*(PPBA+Ptech)-2000*PBE*(2*wmd+6*wmp);
TCCE>=(TC+CE)-1;
TCCE<=1/2*(TC+CE);
TDCE>=(TD+CE)-1;
TDCE<=1/2*(TD+CE);
vv=Vn;
3*vd>=md;
4*vp>=mp;
vd+md/2>=Dn+8*CE;
vp+mp/2>=Pn;
vv+vd+vp<=6*byt;
vv+vd+vp<=16*aut;
vv+vd+vp<=let;
vv+vd+vp+md+mp<=48;
kt=3+43*CC+2*CE+3*PBA;
kz=1+3*PBA;
md>=2*PBE;
mp>=6*PBE;
0.5*(NMOD+NOST)>=2000*(md*wmd+mp*wmp)+aut*Paut+CE*PCE+PBE*PPBE+
TD*PTD+TDCE*PTD+PBA*PPBA;
0.3*(NMOD+NOST)>=2000*(md*wmd+mp*wmp)+aut*Paut+CE*PCE+PBE*PPBE;
CE+CC=1;
PBA+PBE=1;
TC+TD=1;

End
```

Software nalezl optimální řešení. Hodnota účelové funkce a tedy celkové náklady ovlivnitelné modelem jsou 54 132 080,- Kč. Tento výsledek je samozřejmě zcela zásadním výstupem modelu, nicméně kromě samotné hodnoty účelové funkce potřebuje firma znát také hodnoty všech ostatních proměnných.

Následující tabulka 5-4 shrnuje dosažené hodnoty proměnných.

Tabulka 5-4 Výsledky optimalizace – hodnoty proměnných

Zkratka	Význam	Hodnota
Proměnné		
NMOD	Celkové náklady optimalizované části rozpočtu	54 132 080
vv	Počet vlastních vedoucích pracovníků	6
vd	Počet vlastních dělníků	4
vp	Počet vlastních pomocníků	6
md	Počet místních dělníků	8
mp	Počet místních pomocníků	4
kt	Počet kontejnerů z ČR do Egypta	49
kz	Počet kontejnerů z Egypta do ČR	4
byt	Počet pronajatých bytů	3
aut	Počet pronajatých mikrobusů	1
let	Počet zakoupených zpátečních letenek	16
CE	Objednání egyptského dodavatele cihel	0
CC	Objednání českého dodavatele cihel	1
TC	Objednání českého dodavatele tmelu	0
TD	Objednání německého dodavatele tmelu	1
PBA	Objednání rakouského dodavatele posuvného bednění	1
PBE	Objednání egyptského dodavatele posuvného bednění	0

Z uvedených výsledků vyplývá, že na stavbě se bude pohybovat celkem 28 pracovníků, z toho 16 vlastních a 12 místních. K přepravě tak bude stačit 1 mikrobus, ubytování bude zajištěno pronájmem 3 bytů na české ambasádě v Káhiře.

Výroba cihel bude zadána firmě v České republice, tmel se ovšem objedná v Německu. Posuvné bednění zhotoviteli pronajme rakouská firma a zbývající technologie tak zhotovitel zajistí z vlastních zdrojů. Celkem tedy bude do Egypta přepravováno 49 kontejnerů, zpět se vrátí 4 z nich.

Po sečtení optimální hodnoty a celkových ostatních nákladů projektu jsou tak celkové náklady zakázky 79 291 720,- Kč. Zboží českého původu tak musí být minimálně v hodnotě 39 645 860,- Kč. Hodnota zboží zahraničního původu je však celkem pouze 18 709 260,- Kč, rozpočet tedy splňuje limit 50 i 30 % podílu zahraničního, resp. místního zboží.

Před optimalizací byla standardním způsobem kalkulována realizační cena. Po provedení výběrových řízení na subdodavatele a zhodnocení možných strategií byla firma schopna dosáhnout minimální realizační ceny 80 886 420,- Kč. Této ceny je možné docílit vyplněním vhodných zvolených strategií do proměnných modelu tak, jak vedoucí projektu považuje za optimální. Díky konstrukci modelu a jeho objektivní optimalizaci tak byly celkové náklady sníženy na 79 291 720,- Kč, tedy celková úspora je 1 594 700,- Kč.

6 Vyhodnocení výsledků a implementace

V předchozích kapitolách této práce byly popsány tři různé části přípravy zkoumané zakázky. Řešení každého z těchto problémů hraje důležitou roli při zjištěných výsledcích dané oblasti přípravy. V této kapitole jsou výsledky modelů a jejich vliv na projekt shrnuty.

Prvním modelem je projekt vytvořený pomocí aplikace MS Project. Vytvořený projekt poskytuje mnoho informací, které mohou být vyhodnoceny a využity v praxi. Nejdůležitějším výsledkem je sestavení přesného harmonogramu prací. Přehledný a přesný harmonogram je zcela zásadním prvkem technické přípravy zakázky a pro praxi je nezbytný, neboť stanoví nejen doby trvání jednotlivých činností, ale také jejich posloupnost. Tento harmonogram bude používán i během realizace, kdy bude probíhat jeho průběžná kontrola v kanceláři i přímo na stavbě. Pro výrobní oddělení je také velmi důležitá informace o rezervách úkolů, kdy pouze několik málo činností může být zpožděno.

Analýza využití zdrojů má potenciál velmi užitečného nástroje, který je však velice náročný na zadání syrových dat. V případě, že by sestavený projekt sloužil také k určení počtu pracovníků jednotlivých profesí v každém momentě realizace zakázky, bylo by řízení stavby usnadněno a zároveň by pravděpodobně došlo k úspoře nákladů. Pro vytvořený projekt byla tato analýza přesto implementována pouze omezeně, neboť se jedná o náročnou zahraniční zakázku a není tedy možné využívat některé pracovníky pouze některé dny. Podmínky obdobných staveb umožňují plně využít i pracovníky, kteří by v plánu nasazení pracovníků nebyli zrovna nasazeni, což je řešením i tohoto projektu, neboť pracovníky nelze dočasně přesunout na jinou stavbu, jako by tomu bylo na tuzemské zakázce. Pro zkoumaný projekt tedy tato analýza nebude provedena, nicméně pro domácí projekty většího rozsahu bude velmi užitečným nástrojem, který bude využíván.

Sledování nákladů v rámci tvorby projektu je naopak funkcí, která praktického využití ve firmě zhotovitele zcela jistě nenajde. Tvorba rozpočtu musí být prováděna jiným způsobem a mnohem dříve než tvorba projektu a zároveň možnosti analýzy nákladů v MS Project jsou pouze velmi omezené.

V konkrétním prostředí společnosti Omega-Teplotechna Praha a.s. je MS Project v současnosti využíván pro plánování velkých projektů, nikoli však zdaleka v takovém rozsahu, jako je popsáno v této práci. Plán bývá využit pro určení základní doby trvání, stanovení milníků a synchronizaci s ostatními zakázkami společnosti. Stanovení kritických činností je však velmi zajímavá funkce, která využití v řízení projektů společnosti zcela jistě najde. Pro významné tuzemské zakázky pak začne být prováděna také analýza využití zdrojů, ovšem pouze se zaměřením na lidské zdroje.

Druhým modelem vypracovaným v rámci přípravy sledované zakázky je model simulační. Vertikální doprava je skutečně jedním z nejkritičtějších míst celé realizace a je třeba mít jistotu, že kapacita systému bude dostatečná pro plynulou přepravu osob i materiálů.

Tato problematika je ve firmě zhotovitele obvykle řešena na základě dlouholetých zkušeností a jednoduchých výpočtů vycházejících z rychlosti dostupných technologií a četnosti dodávek materiálu, což je v případě zakázek menšího rozsahu dostačující. Pro realizaci několika paralelních projektů by již musel být výpočet přesnější, neboť ruční výpočet musí pro jistotu počítat s určitou rezervou a případné dodatečné technologie by zhotovitel musel pronajmout nebo nakoupit, čímž by zvýšil své náklady.

Hlavním využitím simulačního modelu pro stanovení vhodného systému vertikální dopravy však budou projekty velkého rozsahu, tedy přesně toho typu, který je zkoumán v této práci. Vzhledem k tomu, že nároky na kapacitu systému rostou s rozsahem (a zejména s výškou) realizované konstrukce, nalezne tento simulační model uplatnění právě pro stavby výjimečného rozsahu.

Velkou výhodou simulačního modelu je možnost relativně snadné úpravy jeho parametrů a využití pro různé projekty i v budoucnu. Lze dokonce říci, že tato možnost je natolik důležitá, že pokud by stejný simulační model nemohl být použit na různé stavby, nevyplatilo by se jej pro tuto analýzu vypracovávat z důvodu velké časové náročnosti. Stávající simulační model je tak vhodné doplnit o další možnosti vertikální dopravy, které lze vždy jednoduše „připojit“ ke zbytku modelu či je naopak „odpojit“ dle reálných možností stavby, a dále usnadnit přizpůsobení jednotlivých parametrů modelu například vytvořením seznamu parametrů přímo v modelu. Pokud se bude jednat o tuzemský projekt, může být vhodné například systém doplnit jedním vrátkem navíc až v průběhu samotné realizace, kdy bude výstavba probíhat ve vyšších úrovních, což lze v takto vytvořeném modelu provést již snadno. Pomocí takového modelu pak lze stanovit vhodný systém vertikální dopravy pro výstavbu jakékoli konstrukce realizované s využitím technologie posuvného bednění.

Výraznou nevýhodou modelu však zůstává problematika určení kritérií, dle kterých bude systém posuzován. Neexistuje totiž žádný přímý ukazatel, který by dokázal stanovit, jak vhodný systém vertikální dopravy je. Bude tak vždy třeba analyzovat několik naměřených údajů, tak jak byly analyzovány v této práci.

Simulační modelování je zcela unikátním nástrojem, který může být ve firmě zhotovitele skutečně využíván, je však vždy třeba, aby řešený problém byl natolik významný, že se vytvoření a analýza simulačního modelu vyplatí.

Matematický model optimalizace nákladů je posledním vypracovaným modelem. Přínos tohoto modelu je nejsnáze kvantifikovatelný, neboť okamžitě po provedení optimalizace lze říci, že díky zvolené optimální strategii zhotovitel ušetří na realizačních nákladech 1 594 700,- Kč, což je bez ohledu na výši celkové realizační ceny částka velmi vysoká.

Otázky, které se díky matematickému programování podařilo zodpovědět, jsou otázky skutečné a před vytvořením modelu zhotovitel skutečně nevěděl, jaká řešení budou vhodnější, tedy například se kterým dodavatelem posuvného bednění se vyplatí spolupracovat, zda zajistit místní pracovní sílu i navzdory nižší produktivitě práce, nebo zda se vyplatí objednat cihly na domácím trhu a do Egypta je raději dovézt. Teprve po formulaci všech faktorů, které tato rozhodnutí ovlivňují, a jejich vyhodnocení za pomoci matematického modelování byla tedy strategie zvolena.

Lze tedy jednoznačně říci, že pokud by v každém projektu byl prostor pro realizaci podobné optimalizace nákladů, zcela jistě by byla taková optimalizace provedena. Existuje však několik důvodů, proč tomu tak není.

Zaprvé, během přípravy projektu bývá obvyklý silný časový pres, kdy není prostor věnovat se složité optimalizaci nákladů za pomoci matematického modelování. Snižování ceny probíhá pomocí výběrových řízení na subdodavatele a dále na obchodních jednáních. Množství faktorů, které je třeba zahrnout do modelu, aby měl správnou vypovídací hodnotu v reálném problému, je velmi vysoké a například v projektu zkoumaném v této diplomové práci byla právě definice a utřídění všech těchto faktorů časově nejnáročnější část, a to navzdory tomu, že technická a výrobní příprava byla provedena nadstandardně a všechna výběrová řízení již byla dokončena.

Dalším důvodem je fakt, že velká část těchto faktorů souvisí s tím, že je zakázka prováděna v zahraničí. V případě tuzemských zakázek není pro optimalizaci nákladů tohoto typu prostor. U zahraničních zakázek ale téměř vždy bude třeba zvážit většinu z uvedených faktorů.

Třetím důvodem, který je velmi důležitý zejména z obecného pohledu, je nízká míra univerzálnosti modelu. Všechny parametry modelu byly zadány do aplikace MS Excel, což umožňuje jejich snadnou a rychlou úpravu, kdykoli je třeba. Přesto však není možné použít totožný model například pro výstavbu komína v Estonsku[19], neboť zde nemusí být uvažován lokální výrobce cihel či dodavatel posuvného bednění, tyto otázky by pravděpodobně mohly být vyřešeny prostým výběrovým řízením na subdodavatele. Takový projekt by měl naopak zcela nová specifika, kdy kromě jiných možností najmutí místní pracovní síly hraje významnou roli členství Estonska v Evropské Unii (z pohledu cla, přepravy, finančních podmínek banky apod.), relativní blízkost (to má vliv na způsob přepravy pracovníků i technologií) ale také zcela jiné podnebí, kdy je třeba přijmout zvláštní opatření z důvodu betonáže při nízkých teplotách okolního vzduchu. Zcela jiný model by pak musel být vytvořen, pokud by se nejednalo o výstavbu nového železobetonového komína s keramickým pouzdrem, ale například o opravu či rekonstrukci komína, dodávku nového ocelového komína, nebo výstavbu zcela jiného objektu.

[19] Jako příklad je uvedena jedna z předchozích zakázek společnosti, stavba komína v. 120 m v Estonsku.

Dobrou zprávou však je, že s aktuální situací na trhu v Egyptě a novým energetickým plánem země, je velmi pravděpodobné, že se zhotovitel zúčastní mnoha dalších tenderů na výstavbu podobných komínů, které se v příštích letech budou konat. Vypracovaný model tak bude možné použít na každou z těchto zakázek po úpravě zadávacích parametrů a minimalizovat tak realizační cenu.

6.1.1 Přínos do praxe

Díky využití tří různých disciplín operačního výzkumu se podařilo usnadnit komplexní proces plánování a přípravy projektu. Zároveň byly zodpovězeny některé otázky, které jsou obvykle pouze odhadovány, což je vždy spojeno s rizikem a vyššími náklady zhotovitele, neboť odpovědi není možné nalézt jinými způsoby.

Hlavní pozitivní dopady vypracovaných modelů se dají shrnout do několika následujících bodů:

- Poskytnutí podrobného návodu jak postupovat při přípravě konkrétní zakázky.
- Perfektní znalost všech faktorů usnadňuje plánování ostatních projektů k realizaci, tj. ostatních zakázek společnosti.
- Možnost s předstihem vyjednat finanční a bankovní podmínky exportu, které obvykle podléhají velice dlouhým lhůtám, neboť provedená analýza zajistí splnění stanovených podmínek a navíc slouží jako podklad pro schválení exportního financování.
- Jasné instrukce pro objednání materiálů, zajištění pracovní síly a přípravu technologie. Toto umožní zajistit výrobu i přepravu na stavbu včas, případně lze zjištěné informace použít pro vyjednání slevy od některých dodavatelů.
- Snadná, průběžná a okamžitá kontrola realizace během provádění prací a to jak po stránce nákladů, tak i termínů.
- Reálná a kvantifikovaná úspora nákladů bez jakéhokoli negativního vlivu na kvalitu či dobu provádění díla.

Z hlediska plnění cílů, které autor pro tuto práci stanovil, lze říci, že se je do velké míry podařilo splnit a v některých případech poskytly modely dokonce více informací, než bylo původně očekáváno. Kromě přínosů této práce vyjmenovaných v předchozím odstavci, se tak podařilo splnit následující cíle:

- Propojení teorie s praxí, tedy aplikace znalostí nabytých studiem na reálný případ, který je řešen v zaměstnání. To se podařilo navzdory tomu, že kromě projektového řízení není tato specifická oblast stavebnictví příliš vhodným prostředím pro aplikace simulačních modelů či optimalizace, neboť je třeba řešit

jednotlivé zakázky, které jsou zpravidla velmi individuální, a neexistuje standardizovaný výrobní postup.
- Vytvoření modelů poskytujících komplexní informace pro různé oblasti přípravy.
- Stanovení optimální realizační ceny se zahrnutím všech nákladů.
- Nastavení optimálních podmínek pro realizaci včetně zodpovězení dosud nevyřešených otázek.

Přes relativní splnění stanovených cílů, v některých případech dokonce nad očekávání, existuje jeden skrytý cíl, který však již před započetím tvorby této práce byl spíše přáním než reálným cílem. Tímto přáním bylo vytvořit model, který bude možné použít univerzálně pro analýzu jakékoli zakázky, nebo alespoň zakázky podobného druhu.

Ačkoli všechny vytvořené modely lze relativně snadno modifikovat pomocí úpravy jejich parametrů, míra univerzálnosti je natolik nízká, že by nový projekt musel být velice podobný projektu analyzovanému v této práci, aby jej šlo využít znovu. To sice není nemožné, ale v praxi to další využití modelů značně omezuje. Pravděpodobným scénářem tak bude spíše vytvoření modelů nových, které budou poznatky a některá základní pravidla z již vytvořených modelů čerpat.

Jedinou částečnou výjimkou je simulační model systému vertikální dopravy, který má potenciál stát se univerzálním nástrojem pro volbu vhodného systému i pro jiné zakázky. Do systému je třeba přidat další možnosti vertikální dopravy a zadávací rozhraní pro úpravu parametrů zakázky, jako jsou rozměry objektu, případně četnost dodávek materiálů na pracoviště, rychlost použitých technologií apod. Poté bude možné model využít pro simulaci systému vertikální dopravy pro libovolné výškové betonové konstrukce cylindrického či hranolového tvaru. Jedinou nevýhodou pak zbývá nutnost vlastnit licenci pro používání příslušného simulačního software pro podnikové účely.

Závěr

Tato diplomová práce sledovala hned několik cílů. Existuje zde prvotní motiv, dále dílčí stanovené cíle a také skryté naděje, které jsem do práce vkládal. Primárním záměrem práce bylo nalézt možnosti využití operačního výzkumu v konkrétním zaměstnání. Praktických příkladů, ať už hypotetických či reálných, samozřejmě může existovat nekonečné množství, motivem mé práce však bylo nalézt takové procesy, se kterými se denně setkávám v zaměstnání já osobně.

Jak je v práci několikrát uvedeno, zásadním momentem pro určení úspěšnosti projektu je jeho kvalitní příprava. Zároveň jsou právě v této fázi činěna důležitá rozhodnutí, která vyžadují pečlivé úvahy a propočty. Naopak v průběhu realizace již zdaleka není takový prostor pro rozhodnutí, která budou mít výrazný vliv na výsledek zakázky. Dílčí cíle práce se tedy zaměřují na fázi přípravy a to na její nejcitlivější místa, tedy podrobný harmonogram (řízení projektů), nákladovost (optimalizace) a systém vertikální dopravy (simulační modely).

Jak je naznačeno v závěrečné kapitole, všechny cíle lze považovat za splněné, neboť se podařilo všechna zkoumaná slabá místa podpořit analýzou, která zajišťuje správné fungování těchto částí projektu. Naopak jako neúspěšný může být vnímán pokus o vytvoření univerzálního modelu pro použití při přípravě ostatních zakázek. Tento bod sice nebyl cílem modelu, nicméně pokud by se podařilo vytvořit takový optimalizační model, jeho přínos by byl nesmírný.

Jak je uvedeno v kapitole Vyhodnocení výsledků a implementace, vytvořený simulační model je možné upravit a dosáhnout tak univerzálnosti alespoň v oblasti posuzování systému vertikální dopravy. Takový model by samozřejmě také urychlil práci a pomohl odstranit riziko plánování, nicméně existují dva důvody, proč nejspíše k úpravě modelu na univerzální nedojde. Prvním důvodem je licenční stránka věci, kdy k tomu, aby mohl být univerzální simulační model využíván jako podpora pro činnost obchodní společnosti, je samozřejmě třeba placená verze software. Takovou investici (nejlevnější licence od cca 1 995,- USD, zdroj [13]) by však muselo posoudit vedení společnosti a je třeba říci, že pouze kvůli využití jednoho modelu by nejspíše zamítlo. Druhým důvodem je pak skutečnost, že zatímco v případě zkoumané zakázky jsou simulací získané informace velmi užitečné, pro velkou většinu zakázek by takový model nebyl potřeba, neboť se zpravidla jedná o projekty menšího rozsahu, kde je dostačující odhad dle zkušeností výrobního oddělení, a zároveň případný krátkodobý pronájem dodatečné technologie nepředstavuje výrazné zvýšení nákladů.

Praktická aplikace metod operačního výzkumu v prostředí skutečné zakázky tedy přinesla nejen důležité podpůrné informace, které vedou k minimalizaci rizika, ale také kvantifikovanou úsporu celkových nákladů, což je výsledek, který je nejen pozitivní pro analytika, ale také jasně pochopitelný pro vedení společnosti.

Literatura

[1] DLOUHÝ, M., FÁBRY, J., KUNCOVÁ, M.: *Simulace pro ekonomy*, Oeconomica, Praha 2005.

[2] DLOUHÝ, M., FIALA, P.: *Úvod do teorie her*, Oeconomica, Praha 2009.

[3] FÁBRY, J.: *Matematické modelování,* Oeconomica, Praha 2007.

[4] FIALA, P.: *Modely a metody rozhodování*, Oeconomica, Praha 2008.

[5] JABLONSKÝ, J.: *Operační výzkum,* Professional Publishing, Praha 2007.

[6] JABLONSKÝ, J.: *Programy pro matematické modelování,* Oeconomica, Praha 2007.

[7] KAHOUNOVÁ, J., BÍLKOVÁ, D.: *Počet pravděpodobnosti*, Oeconomica, Praha 2009.

[8] KOŘENÁŘ, V.: *Stochastické procesy*, Oeconomica, Praha 2010.

[9] KUBÁLEK, T., KUBÁLKOVÁ, M.: *Řízení projektů v Microsoft Project 2010: učebnice,* Computer Press, Brno 2010.

[10] LAGOVÁ, M., JABLONSKÝ, J.: *Lineární modely,* Oeconomica, Praha 2009.

[11] PELIKÁN, J.: *Diskrétní modely v operačním výzkumu*, Professional Publishing, Praha 2001.

Internetové zdroje:

[12] Domovská stránka aplikace Microsoft Project.
Dostupné z, [cit. 2015-06-17]: products.office.com/cs-cz/project

[13] Domovská stránka simulačního software Simul8.
Dostupné z, [cit. 2015-06-17]: www.simul8.com

[14] Informace o programu Lingo na oficiálních stránkách společnosti vyvíjející tento software.
Dostupné z, [cit. 2015-06-17]: www.lindo.com/products/lingo

[15] Oficiální stránky společnosti vyvíjející systém MPL.
Dostupné z, [cit. 2015-06-17]: www.maximalsoftware.com/mpl

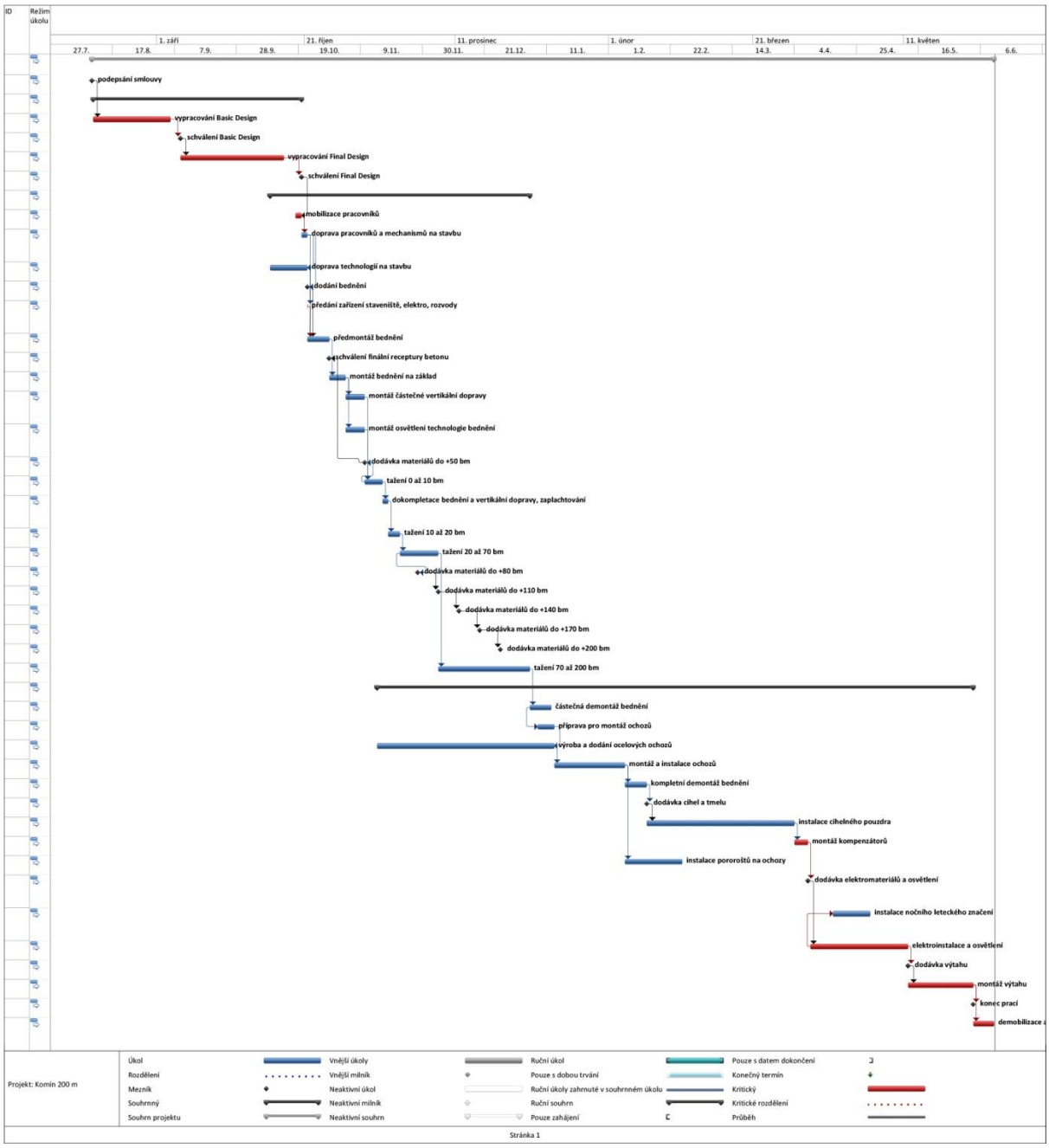
[16] Webové stránky společnosti Omega-Teplotechna Praha a.s.
Dostupné z, [cit. 2015-06-23]: www.ot.cz

Přílohy

Obrázek 3-1 Seznam úkolů

ID	Dost reze	Elek	Název úkolu	Doba trvání	Zahájení	Dokončení	Předchůdci	Časová rezerva zahájení	Časová rezerva dokončení
0			**Komín 200 m**	**212,63 dny**	**pondělí, 10.8. 2015 8:00**	**pátek, 10.6. 2016 14:00**		**0,25 dny**	**0 dny**
1			podepsání smlouvy	0 dny	pondělí, 10.8. 2015 8:00	pondělí, 10.8. 2015 8:00		0,25 dny	0,25 dny
2			**Vypracování projektové dokumentace**	**49,75 dny**	**pondělí, 10.8. 2015 10:00**	**pondělí, 19.10. 2015 17:00**		**0 dny**	**0 dny**
3			vypracování Basic Design	20 dny	pondělí, 10.8. 2015 10:00	sobota, 5.9. 2015 16:00	1	0 dny	0 dny
4			schválení Basic Design	0 dny	úterý, 8.9. 2015 17:00	úterý, 8.9. 2015 17:00	3FS+2 dny	0,25 dny	0,25 dny
5			vypracování Final Design	25 dny	úterý, 8.9. 2015 17:00	úterý, 13.10. 2015 17:00	4	0,25 dny	0 dny
6			schválení Final Design	0 dny	pondělí, 19.10. 2015 17:00	pondělí, 19.10. 2015 17:00	5FS+4 dny	0 dny	0 dny
7			**Betonové konstrukce**	**57 dny**	**pátek, 9.10. 2015 9:00**	**úterý, 5.1. 2016 9:00**		**0,88 dny**	**112,5 dny**
8			mobilizace pracovníků	6 dny	sobota, 17.10. 2015 17:00	pondělí, 19.10. 2015 17:00	6FF	0 dny	0 dny
9			doprava pracovníků a mechanismů na stavbu	48 hodin	pondělí, 19.10. 2015 17:00	středa, 21.10. 2015 17:00	8	5 hodin	5 hodin
10	✓		doprava technologií na stavbu	37 dny	pátek, 9.10. 2015 9:00	středa, 21.10. 2015 17:00	9FF	1,88 dny	1,88 dny
11			dodání bednění	0 dny	středa, 21.10. 2015 17:00	středa, 21.10. 2015 17:00	9FF	0 dny	0 dny
12			předání zařízení staveniště, elektro, rozvody	10 hodin	středa, 21.10. 2015 17:00	čtvrtek, 22.10. 2015 3:00	9	0 hodin	0 hodin
13			předmontáž bednění	70 hodin	čtvrtek, 22.10. 2015 7:00	čtvrtek, 29.10. 2015 11:00	12;10;11	1 hodina	1 hodina
14	✓		schválení finální receptury betonu	0 dny	čtvrtek, 29.10. 2015 9:00	čtvrtek, 29.10. 2015 9:00	18SF-14 dny	265,88 dny	265,88 dny
15			montáž bednění na základ	50 hodin	čtvrtek, 29.10. 2015 11:00	úterý, 3.11. 2015 18:00	13	1 hodina	1 hodina
16			montáž částečné vertikální dopravy	60 hodin	úterý, 3.11. 2015 18:00	úterý, 10.11. 2015 11:00	15	1 hodina	1 hodina
17			montáž osvětlení technologie bednění	60 hodin	úterý, 3.11. 2015 18:00	úterý, 10.11. 2015 11:00	15	1 hodina	1 hodina
18	✓		dodávka materiálů do +50 bm	0 dny	úterý, 10.11. 2015 11:00	úterý, 10.11. 2015 11:00	19SF	251,88 dny	251,88 dny
19			tažení 0 až 10 bm	120 hodin	úterý, 10.11. 2015 11:00	pondělí, 16.11. 2015 11:00	17;16	1 hodina	1 hodina
20			dokompletace bednění a vertikální dopravy, zaplachtování	20 hodin	pondělí, 16.11. 2015 11:00	středa, 18.11. 2015 9:00	19	1 hodina	1 hodina
21			tažení 10 až 20 bm	80 hodin	středa, 18.11. 2015 9:00	neděle, 22.11. 2015 9:00	20	1 hodina	1 hodina
22			tažení 20 až 70 bm	260 hodin	neděle, 22.11. 2015 9:00	sobota, 5.12. 2015 9:00	21	1 hodina	1 hodina
23	✓		dodávka materiálů do +80 bm	0 dny	sobota, 28.11. 2015 9:00	sobota, 28.11. 2015 9:00	22SF+6 upl.dny	418 dny	418 dny
24	✓		dodávka materiálů do +110 bm	0 dny	sobota, 5.12. 2015 9:00	sobota, 5.12. 2015 9:00	23FS+7 upl.dny	418 dny	418 dny
25	✓		dodávka materiálů do +140 bm	0 dny	sobota, 12.12. 2015 9:00	sobota, 12.12. 2015 9:00	24FS+7 upl.dny	418 dny	418 dny
26	✓		dodávka materiálů do +170 bm	0 dny	sobota, 19.12. 2015 9:00	sobota, 19.12. 2015 9:00	25FS+7 upl.dny	418 dny	418 dny
27	✓		dodávka materiálů do +200 bm	0 dny	sobota, 26.12. 2015 9:00	sobota, 26.12. 2015 9:00	26FS+7 upl.dny	418 dny	418 dny
28			tažení 70 až 200 bm	620 hodin	sobota, 5.12. 2015 9:00	úterý, 5.1. 2016 9:00	22	1 hodina	1 hodina
29			**Vybavení komína**	**139,63 dny**	**sobota, 14.11. 2015 15:00**	**pátek, 3.6. 2016 14:00**		**0 dny**	**5 dny**
30			částečná demontáž bednění	70 hodin	úterý, 5.1. 2016 9:00	úterý, 12.1. 2016 14:00	28	1 hodina	1 hodina
31			příprava pro montáž ochozů	50 hodin	pátek, 8.1. 2016 8:00	středa, 13.1. 2016 15:00	30SS+4 dny	1 hodina	1 hodina
32			výroba a dodání ocelových ochozů	60 upl.dny	sobota, 14.11. 2015 15:00	středa, 13.1. 2016 15:00	31FF	0,04 upl.dny	0,04 upl.dny
33			montáž a instalace ochozů	230 hodin	středa, 13.1. 2016 15:00	sobota, 6.2. 2016 14:00	32	1 hodina	1 hodina
34			kompletní demontáž bednění	70 hodin	sobota, 6.2. 2016 14:00	sobota, 13.2. 2016 18:00	33	1 hodina	1 hodina
35			dodávka cihel a tmelu	0 dny	sobota, 13.2. 2016 18:00	sobota, 13.2. 2016 18:00	34	0 dny	0 dny
36	✓		instalace cihelného pouzdra	50 upl.dny	sobota, 13.2. 2016 18:00	neděle, 3.4. 2016 18:00	35	0,54 upl.dny	0,54 upl.dny
37			montáž kompenzátorů	50 hodin	pondělí, 4.4. 2016 7:00	pátek, 8.4. 2016 14:00	36	0 hodin	0 hodin
38	✓		instalace pororoštů na ochozy	180 hodin	sobota, 6.2. 2016 14:00	čtvrtek, 25.2. 2016 18:00	33	997 hodin	997 hodin
39			dodávka elektromateriálů a osvětlení	0 dny	pátek, 8.4. 2016 14:00	pátek, 8.4. 2016 14:00	37	0 dny	0 dny
40	✓		instalace nočního leteckého značení	120 hodin	sobota, 16.4. 2016 17:00	pátek, 29.4. 2016 16:00	41SS+9 dny	394 hodin	394 hodin
41			elektroinstalace a osvětlení	310 hodin	sobota, 9.4. 2016 10:00	čtvrtek, 12.5. 2016 12:00	39FS+1 den	0 hodin	0 hodin
42			dodávka výtahu	0 dny	čtvrtek, 12.5. 2016 12:00	čtvrtek, 12.5. 2016 12:00	41	0 dny	0 dny
43			montáž výtahu	210 hodin	čtvrtek, 12.5. 2016 13:00	pátek, 3.6. 2016 14:00	42	0 hodin	0 hodin
44	✓		konec prací	0 dny	pátek, 3.6. 2016 14:00	pátek, 3.6. 2016 14:00	43	5 dny	5 dny
45			demobilizace a odvoz mechanismů a vybavení	7 upl.dny	pátek, 3.6. 2016 14:00	pátek, 10.6. 2016 14:00	43	0 upl.dny	0 upl.dny

Obrázek 3-2 Grafická část Ganttova diagramu



Tabulka 4-7 Výsledky simulace systému vertikální dopravy

Queue of Beton	Maximum Queue Size	1.00	1.00	1.00
Queue of Beton	Maximum Queuing Time	13.01	13.20	13.39
Queue of Beton	Number of Non-zero Queuing Times	105.60	107.74	109.88
Queue of Beton	Average (Non-zero) Queuing Time	3.91	3.97	4.03
Queue of Beton	Average Queuing Time	0.10	0.10	0.10
Queue of Beton	Items Entered	4316.00	4316.00	4316.00
Queue of Beton	"Queued Less Than" Time	9.00	9.00	9.00
Queue of Beton	% Queued Less Than Time Limit	99.72	99.73	99.75
Queue of Zelezo	Maximum Queue Size	2.24	2.35	2.46
Queue of Zelezo	Maximum Queuing Time	7.51	7.74	7.97
Queue of Zelezo	Number of Non-zero Queuing Times	104.91	107.46	110.01
Queue of Zelezo	Average (Non-zero) Queuing Time	2.29	2.32	2.36
Queue of Zelezo	Average Queuing Time	0.09	0.10	0.10
Queue of Zelezo	Items Entered	2573.08	2583.61	2594.14
Queue of Zelezo	"Queued Less Than" Time	10.00	10.00	10.00
Queue of Zelezo	% Queued Less Than Time Limit	99.99	100.00	100.00
Queue from DOWN	Maximum Queue Size	0.99	1.02	1.05
Queue from DOWN	Maximum Queuing Time	3.07	3.37	3.67
Queue from DOWN	Number of Non-zero Queuing Times	4.98	5.39	5.80
Queue from DOWN	Average (Non-zero) Queuing Time	1.40	1.53	1.65
Queue from DOWN	Average Queuing Time	0.00	0.00	0.00
Queue from DOWN	Items Entered	2686.17	2694.02	2701.87
Queue from DOWN	"Queued Less Than" Time	1.50	1.50	1.50
Queue from DOWN	% Queued Less Than Time Limit	99.91	99.92	99.93
Queue from UP	Maximum Queue Size	1.00	1.04	1.08
Queue from UP	Maximum Queuing Time	2.82	3.12	3.42
Queue from UP	Number of Non-zero Queuing Times	4.67	5.10	5.53
Queue from UP	Average (Non-zero) Queuing Time	1.36	1.47	1.58
Queue from UP	Average Queuing Time	0.00	0.00	0.00
Queue from UP	Items Entered	2683.61	2691.24	2698.87
Queue from UP	"Queued Less Than" Time	1.50	1.50	1.50
Queue from UP	% Queued Less Than Time Limit	99.92	99.93	99.94
EndBeton	Average Time in System	10.36	10.36	10.36
EndBeton	Maximum Time in System	29.35	29.66	29.96
EndZelezo	Average Time in System	9.24	9.25	9.27
EndZelezo	Maximum Time in System	23.50	23.84	24.18
EndLidi	Average Time in System	7.12	7.13	7.13
EndLidi	Maximum Time in System	19.12	19.42	19.73

Tabulka 4-8 Výsledky simulace alternativního systému vertikální dopravy

Queue of Beton	Maximum Queue Size	1.00	1.00	1.00
Queue of Beton	Maximum Queuing Time	13.53	13.76	13.99
Queue of Beton	Number of Non-zero Queuing Times	160.85	163.26	165.67
Queue of Beton	Average (Non-zero) Queuing Time	4.07	4.12	4.18
Queue of Beton	Average Queuing Time	0.15	0.16	0.16
Queue of Beton	Items Entered	4316.00	4316.00	4316.00
Queue of Beton	"Queued Less Than" Time	9.00	9.00	9.00
Queue of Beton	% Queued Less Than Time Limit	99.57	99.58	99.60
Queue of Zelezo	Maximum Queue Size	2.40	2.51	2.62
Queue of Zelezo	Maximum Queuing Time	8.65	9.01	9.37
Queue of Zelezo	Number of Non-zero Queuing Times	213.15	216.76	220.37
Queue of Zelezo	Average (Non-zero) Queuing Time	2.34	2.37	2.39
Queue of Zelezo	Average Queuing Time	0.19	0.20	0.20
Queue of Zelezo	Items Entered	2573.08	2583.61	2594.14
Queue of Zelezo	"Queued Less Than" Time	10.00	10.00	10.00
Queue of Zelezo	% Queued Less Than Time Limit	99.98	99.99	99.99
Queue from DOWN	Maximum Queue Size	1.54	1.64	1.74
Queue from DOWN	Maximum Queuing Time	8.14	8.46	8.77
Queue from DOWN	Number of Non-zero Queuing Times	188.55	191.42	194.29
Queue from DOWN	Average (Non-zero) Queuing Time	2.55	2.57	2.59
Queue from DOWN	Average Queuing Time	0.18	0.18	0.19
Queue from DOWN	Items Entered	2686.17	2694.02	2701.87
Queue from DOWN	"Queued Less Than" Time	1.50	1.50	1.50
Queue from DOWN	% Queued Less Than Time Limit	95.40	95.48	95.56
Queue from UP	Maximum Queue Size	1.46	1.56	1.66
Queue from UP	Maximum Queuing Time	8.51	8.92	9.33
Queue from UP	Number of Non-zero Queuing Times	188.39	191.58	194.77
Queue from UP	Average (Non-zero) Queuing Time	2.56	2.58	2.61
Queue from UP	Average Queuing Time	0.18	0.18	0.19
Queue from UP	Items Entered	2683.61	2691.24	2698.87
Queue from UP	"Queued Less Than" Time	1.50	1.50	1.50
Queue from UP	% Queued Less Than Time Limit	95.34	95.44	95.53
EndBeton	Average Time in System	10.41	10.42	10.42
EndBeton	Maximum Time in System	30.10	30.43	30.76
EndZelezo	Average Time in System	9.67	9.69	9.71
EndZelezo	Maximum Time in System	24.72	25.16	25.61
EndLidi	Average Time in System	6.83	6.83	6.84
EndLidi	Maximum Time in System	23.85	24.12	24.38