

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA DOPRAVNÍ**



Bc. Rozálie Metelková

**OPTIMALIZACE SKLADOVÁNÍ OBALOVÉHO MATERIÁLU**

Diplomová práce

2023

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K617..... Ústav logistiky a managementu dopravy**

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Rozálie Metelková**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

**navazující magisterský – LA – Logistika a řízení dopravních procesů**

Název tématu (česky): **Optimalizace skladování obalového materiálu**

Název tématu (anglicky): **Optimisation the Storage of Packaging Material**

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Motivace k řešení - význam optimálního využívání ploch určených ke skladování obalového materiálu
- Charakteristika vybraného skladovacího problému
- Analýza současného stavu skladování obalového materiálu
- Formulace problému vícekriteriální optimalizace
- Návrh matematického modelu a jeho řešení metodou STEM
- Validace navrženého matematického modelu
- Zhodnocení dosažených výsledků s výsledky dvoufázového lineárního modelu



- Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucích diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: JABLONSKÝ, J.: Operační výzkum, 3. vydání, Professional Publishing, Praha, 2011, ISBN 978-80-86946-44-3.  
GROS, I.: Velká kniha logistiky, 1. vydání, VŠCHT Praha, Praha, 2016, ISBN 978-80-7080-952-5.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Denisa Mocková, Ph.D.**  
**Ing. Karel Ječmen**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2022**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **15. května 2023**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Tomáš Horák, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu logistiky a managementu dopravy



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Rozálie Metelková  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 30. června 2022

## Poděkování

Na začátku bych ráda poděkovala všem lidem, kteří se podíleli na vzniku mé diplomové práce. Na prvním místě vřele děkuji vedoucím mé práce doc. Ing. Denise Mockové, Ph.D. a Ing. Karlu Ječmenovi za příkladné pedagogické a odborné vedení, za velké množství informací a podnětů, které mi poskytli a za čas, který mi věnovali. Zároveň bych chtěla poděkovat znovu doc. Ing. Denise Mockové, Ph.D. a doc. Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D. za perfektní vedení projektové výuky, inspirativní a pečlivé vedení vyučovaných předmětů, a celkovou podporu během studia. Na závěr bych upřímně ráda poděkovala své rodině, mým přátelům a kolegům, kteří mi byli trpělivou a empatickou oporou během tvorby této práce i po celou dobu studia.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použití informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne



.....  
Bc. Rozálie Metelková

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Ústav logistiky a managementu v dopravě

## **OPTIMALIZACE SKLADOVÁNÍ OBALOVÉHO MATERIÁLU**

Diplomová práce

květen 2023

Rozálie Metelková

### **Abstrakt**

Předmětem diplomové práce „Optimalizace skladování obalového materiálu“ je charakterizovat vybraný skladovací problém a na základě jeho popisu formulovat problém pomocí metod vícekriteriální optimalizace. Navržené modely budou vypočítány pomocí metody STEM, která bude srovnána s výsledky dvoufázového lineárního programování. Hlavním výstupem bude zhodnocení dosažených výsledků metody STEM a její porovnání s výsledky dvoufázového lineárního programování.

### **Klíčová slova**

Skladování, skladování na volné ploše, obalový materiál, optimalizace, vícekriteriální rozhodování, lineární programování, metoda STEM, dvoufázové lineární programování.

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

Department of Logistics and Management of Transport

## **OPTIMISATION THE STORAGE OF PACKAGING MATERIAL**

Diploma Thesis

May 2023

Rozálie Metelková

### **Abstract**

The subject of the diploma thesis "Optimization of packaging material storage" is to characterize a selected storage problem and on the basis of its description to formulate the problem using multi-criteria optimization methods. The proposed models will be computed using the STEM method, which will be compared with the results of the two-phase linear programming. The main output will be the evaluation of the results obtained by the STEM method and their comparison with the results of the two-step linear programming method.

### **Key words**

Storage, open storage, packaging material, optimization, multi-criteria decision making, linear programming, STEM, two-phase linear programming.

# Obsah

Seznam použitých zkratek .....	7
Úvod .....	8
1. Skladování .....	10
1.1. Historie skladování .....	10
1.2. Definice skladování a skladů .....	17
1.3. Funkce skladování a skladů .....	18
1.4. Druhy skladů a způsobů uskladnění .....	20
1.5. Náklady na skladování .....	23
2. Obaly a manipulační jednotky .....	25
2.1. Definice obalů .....	25
2.2. Legislativa .....	25
2.2.1. Ochranná funkce .....	26
2.2.2. Manipulační funkce .....	27
2.2.3. Informační funkce .....	27
2.2.4. Prodejní funkce .....	27
2.3. Rozdělení obalů .....	27
2.4. Manipulační jednotky .....	28
3. Optimalizace a její význam ve skladování .....	32
3.1. Lineární programování .....	36
4. Charakteristika vybraného optimalizačního problému .....	38
4.1. Metody řešení .....	39
5. Návrhová část optimalizace vybraného skladovacího problému .....	42
5.1. Formulace problému .....	42
5.2. Optimalizační aplikace Jupyter .....	43
5.3. Vstupní data .....	45
5.4. Matematický model pro dvoufázové lineární programování .....	47
5.4.1. Seznam množin, vstupních parametrů a proměnných .....	47
5.4.2. Model .....	48

5.5.	Matematický model pro metodu STEM.....	50
5.5.1.	Seznam vstupních množin, vstupních parametrů a proměnných.....	50
5.5.2.	Model pro výpočetní část první fáze.....	50
5.5.3.	Model pro výpočetní část druhé fáze.....	51
6.	Výpočetní experiment.....	53
6.1.	Výsledky dvoufázového lineárního programování .....	53
6.2.	Výsledky metody STEM .....	53
6.2.1.	Zdrojový kód Pythonu pro metodu STEM.....	62
7.	Zhodnocení dosažených výsledků.....	63
	Závěr .....	66
	Zdroje .....	68
	Seznam obrázků.....	72
	Seznam tabulek.....	73
	Seznam příloh.....	73



## Seznam použitých zkratek

EU	Evropská unie
WMS	Warehouse Management System
JIT	Just-in-Time
JIS	Just-in-Sequence
LP	Lineární programování
TSP	Traveling salesman problem

## Úvod

Svět, který nás obklopuje, je v neustálém pohybu a dynamickém vývoji. V posledních letech se vyrovnáváme s řadou turbulentních událostí, jež přinesly jak negativní, tak i pozitivní změny do našeho každodenního života. Ačkoliv to nemusí být na první pohled zřejmé, dá se říci, že současné politické, ekonomické, zdravotnické, společenské a ekologické problémy významně zasáhly do všech oblastí lidského konání. Například stejně tak výrazně ovlivnily i oblast logistiky a skladování, kdy problematika skladování je tématem této diplomové práce.

Skladování jako klíčová součást dodavatelských řetězců prochází v posledních letech obrovskými výzvami. V tomto období například vyvstala problematika dlouhodobého zpoždění dodávek zboží, které může mít dalekosáhlé dopady na celý dodavatelský řetězec. Dalším novou zajímavou výzvou je enormní vývoj automatizovaných skladovacích a manipulačních technologií, jež sice přinášejí spoustu nových možností, ale zároveň kladou daleko vyšší nároky na správu, digitalizaci, bezpečnost a optimalizaci skladovacích procesů a ploch.

Nedostatek skladovacích ploch se pak stává jen dalším krizovým bodem. S rostoucími požadavky na rychlost a efektivitu dodávek se zvyšuje i potřeba optimalizace skladových ploch. Nestačí pouze ukládat zboží, je třeba to dělat rychle, efektivně a s optimálním využitím dostupných prostor a prostředků.

Diplomová práce se zaměřuje na „*Optimalizaci skladování obalového materiálu*“. Optimalizaci lze popsat jako proces, který poskytuje nejlepší možná řešení určitého problému dle stanoveného kritéria nebo kritérií. V této diplomové práci budou sledována kritéria dvě, jedná se tedy o vícekritériální optimalizaci. Existuje hned několik metod vícekritériálních optimalizace, které lze v konkrétním případě použít. Vybranými metodami pro tuto diplomovou práci jsou: dvoufázové lineární programování a metoda STEM, kdy obě metody budou řešeny za pomoci aparátu lineárního programování.

Výsledkem této diplomové práce nemá být komparativní analýza dvou uvedených metod na sledovaném skladovacím problému, nýbrž zhodnocení těchto dvou metod a výpočetní poukázání na základní rozdíl mezi nimi. Hlavní rozdíl spočívá ve vstupu samotného zadavatele řešení do optimalizačního výpočtu, který může dosahované výsledky interaktivně ovlivnit. Právě na tomto principu je založena metoda STEM, která bude v diplomové práci popsána.

Diplomová práce se dělí na teoretickou část a praktickou (návrhovou) část. V teoretické části je v první kapitole stručně charakterizována problematika skladování a skladů. Druhá kapitola přináší definici a charakteristiku obalového materiálu. Třetí kapitola představuje úvod do optimalizačního aparátu, zejména do matematického lineárního programování. Všechny

tyto aspekty jsou důležité pro správné pochopení optimalizačního problému, který bude zpracován v praktické části.

Praktická část se již věnuje podrobné definici a formulaci vybraného skladovacího problému, vybraným optimalizačním metodám a vybrané řešitelské aplikaci. Na základě formulace problému a vlastností použitých metod jsou vytvořeny jednotlivé modely s tím, že první dvoufázový model lineárního programování byl převzat z výpočetního experimentu Ing. Karla Ječmena. Modely jsou výpočetně otestovány na stejných vstupní datech, poskytnutých anonymním zadavatelem. Vybrané metody a jejich rozdílné výpočty sledují za stanovených podmínek dvě základní charakteristiky: počet umístěných obalů a relativní úsporu z manipulací.

Na závěr diplomové práce jsou zhodnoceny a graficky znázorněny výsledky výpočetního experimentu, které jsou i příslušně okomentovány.

# 1. Skladování

V návaznosti na téma diplomové práce a jeho řádné pochopení, bude v této kapitole výstižně popsána činnost skladování, její historie, definice, funkce, druhy a její náklady.

## 1.1. Historie skladování

Historie skladování a s ní i související budování skladovacích prostor a rozvoj skladovacích technologií, sahá až do samotných dávných dob. V pravěkých dobách byly suroviny či zboží, skladovány v podzemních jámách nebo jeskyních, aby byly chráněny před negativními vlivy počasí a krádežemi. Proto můžeme říct, že skladování hraje důležitou a nezanedbatelnou roli v historii a evoluci lidstva.

Již v pravěku bylo důležité udržovat v bezpečí zejména zásoby jídla. Z důvodu nepředvídatelnosti vlivů přírody, zejména počasí, bylo důležité jejich bezpečné uchování. Správné skladování eliminovalo negativní vlivy přírody či období špatné úrody. V mnoha případech mohla pojistná zásoba rozhodovat o životě a smrti našich předků. Jedním z nejstarších příkladů skladovací technologie jsou jednoduché skladovací jámy, které se poprvé objevily v pozdní době kamenné. Tyto jámy byly určeny především k uchování semen či přebytků potravin. Jedním ze zajímavých faktů, který uvádí i samotní archeologové a antropologové je, že skladování potravin bylo důležitým předchůdcem domestikace plodin a zvířat. První sofistikované a účelově vybudované sýpky se začaly objevovat až s nástupem zemědělství. Jedny z prvně historicky doložených, zhruba z roku 9 500 př.n.l., se nacházely na území dnešního Jordánska. [18], [19], [20]

Stejně jako v mnoha jiných převratných záležitostech a vynálezech, tak i s principy moderního skladování prvně přišli starověcí Římané. Jejich požadavky modernizace skladování plynuly zejména z prudkého nárůstu obyvatel, ale i s rostoucími požadavky obchodu. Zásoby obilí, olivového oleje a vín ve druhém století našeho letopočtu přesahovaly téměř 400 000 tun, přivezených ročně na zhruba 1 700 lodích. Není tedy divu, že starověký Řím byl často označován jako „skladiště země“. Jako způsob skladování, Římané preferovali skladování zboží, materiálu a surovin na zemi. Tehdejší sklady byly nejčastěji stavěny ze dřeva a vyvýšeny na podpěrách, aby bylo umožněno větrání proti znehodnocení potravin. Jedním z předchůdců nynějších skladů je tzv. Horreum. [18]

Horreum se nejčastěji nacházelo v přístavních městech, vojenských táborech či v blízkosti největších dopravních tepen. Obvykle se jednalo o dvoupatrové obdélníkové budovy se zvýšeným přízemím a převislou střechou. Hlavním stavebním materiálem byl kámen, který udržoval stěny budov studené. Použití kamene jako hlavního stavebního materiálu snižovalo i riziko vzniku požáru, který v té době byl poměrně častým problémem. Dveře byly většinou velmi úzké a neumožňovaly vjezd povozů, neboli vnitřní vykládku a nakládku. Již v té době

byly dveře chráněny velmi důmyslným bezpečnostním systémem zámků a závor. Okna byla velmi malá a umístěna vysoko na stěnách, aby se zabránilo případným krádežím a negativním vlivům slunečního záření. Některé z vystavených komplexů byly vybaveny i přístupovými rampami či mezipatry. [19], [20]

Přestože je velmi obtížné určit přesné množství staveb typu Horrea v období antického Říma, historikové odhadují, že jich bylo postaveno přes tisíce a že pokrývaly většinu Římského impéria. Mezi jedním z neznámějších vybudovaných komplexů patří Horreum Galbae, pocházející z roku 69 př.n.l. Jeho rozloha činila téměř 24 000 m<sup>2</sup> a byla tvořena až 140 místnostmi, což je v porovnání s dnešní průměrnou plochou skladů 10 000 m<sup>2</sup> v České republice něco nepředstavitelného. [19]

V období raného středověku postupně docházelo k upouštění od budování tradičních komplexů typu Horrea. Namísto toho se začaly hojně rozšiřovat zemědělské stodoly, zvláště pak stodoly s místem pro desátky. Středověké skladovací plochy či skladovací prostory se obvykle stavěly jako součást obytných a obchodních budov. Nejčastějšími stavebními materiály bylo dřevo, kámen či cihly. Sklady byly různých tvarů a velikostí. Nejrozsáhlejší a neznámější skladovací komplexy ve středověku se nacházely v přístavních městech či jejich blízkosti, což souviselo s rozvojem mezinárodního obchodu po moři. [18], [19], [20]

Během středověku docházelo i k rozvoji skladovacích technologií, jako byly například kabelová lana sloužící jako výtah, zvedací plošiny, regály, police či výklopné dveře. Tyto technologie umožnily snadnější manipulaci se zbožím a zvýšily tak i samotnou efektivitu skladování. [18], [19]

První známé použití slova „*sklad*“ pochází z konce 14. století z Velké Británie. Slovem sklad byla označována plocha či místnost pro skladování zboží nebo komodit. Přičemž slovo „*zboží*“ začalo být stále více spojováno s opracovanými výrobky neboli průmyslovou výrobou, jako byly především sklo a keramika. [18], [19]

Pravidelné používání slova „*sklad a skladování*“ je spojeno se začátkem průmyslové revoluce v 18. století. Během průmyslové revoluce došlo hned k několika zásadním změnám (např. vynález parního stroje či textilní výroba), které vedly ke změnám výrobních procesů a distribuce zboží. V důsledku toho prošly výraznou transformací také sklady a skladování. [18], [19]

V počátcích průmyslové revoluce se skladování zaměřovalo především uložení surovin, jako jsou uhlí, železo a dřevo, které byly potřebné pro nově zbudované továrny a nové stroje. S rozvojem výrobních procesů tak narůstala i potřeba specializovaného skladování. První velká změna v této oblasti během průmyslové revoluce spočívala v zavedení páry. Parní

jeřáby a výtahy usnadnily pohyb zboží a materiálu uvnitř i vně skladu a parní stroje umožnily stavbu budov s vícenásobně vyšší kapacitou, než bylo doposud zvykem. [18], [19]

Další významnou změnou bylo zavedení standardizovaného balení a označování, což umožnilo snadnější identifikaci a sledování jednotlivých výrobků v rámci skladovací plochy. Zároveň byla zvýšena efektivita v řízení skladových zásob a sníženo riziko ztráty zboží. [18]

S rozvojem železniční, námořní a říční dopravy vyvstala problematika vhodného výběru lokace skladů. Ty byly, stejně jako v dnešní době, budovány v blízkosti dopravních uzlů, jako jsou přístavy a železniční stanice, což usnadňuje rychlou a efektivní přepravu zboží i na větší vzdálenosti. Tak vznikla první velká distribuční centra či oblasti. Jednou z nich je například v 19. století vybudovaná Cottonopolis v Manchesteru, která byla jedním z největších evropských center bavlnářského průmyslu. Mezi nejznámější místní budovy patří 30 metrů vysoký a 90 metrů dlouhý „Watts Warehouse“, dostavěný v roce 1856. Jeho náčrt lze nalézt na Obrázku 1. [18], [20]



Obrázek 1 – Architektonický model Watts' Warehouse, zdroj: [21]

Zásadně ovlivnila způsob skladování 2. světová válka, kdy sklady hrály klíčovou roli v podpoře válečného úsilí, neboť zásoby, munice a vojenského vybavení musely být rychle a účelně

dopravovány na fronty. Enormní rozsah válečného konfliktu vyžadoval výstavbu masivních skladových a distribučních center na strategických místech.

Po 2. světové válce pokračovala evoluce skladování opět velmi razantním tempem, jelikož se musela adaptovat na měnící se potřeby podniků a jejich zákazníků. Jedním z hlavních vývojových kroků v oblasti logistiky a skladování byla kontejnerizace, která změnila nejen způsob dopravy zboží, ale i způsob skladování. Koncept kontejnerizace byl poprvé představen v 50. letech 20. století, ale celosvětově se rozšířil až v 70. letech 20. století. [18], [19]

Kontejnerizace přinesla standardizaci v oblasti obalového materiálu zboží. To umožňuje velmi snadno přemísťovat náklady mezi různými dopravními módy, jako jsou vlaky, lodě a nákladní automobily, bez nutnosti vybalování a opětovaného přebalování. Tato standardizace výrazně zvýšila efektivitu, rychlost a bezpečnost přepravy nákladu. Zároveň umožnila snížit přepravní náklady vlivem eliminace časově náročných manipulačních procesů a aktivit a také snížit riziko krádeže nebo poškození nákladu. [18], [19]

Samotná kontejnerizace nebyla jediným velkým přínosem a změnou v té době. Postupně přicházely do světa skladování i další technologické změny a inovace za cílem zvýšení efektivitu a produktivity skladování. Jedním z příkladů invence jsou vysokozdvíhací vozíky a další manipulační technika, která díky svému vybavení umožňuje manipulovat zboží po skladech mnohem rychleji, ergonomičtěji a bezpečněji. [18], [19]

Devadesátá léta 20. století byla dalším výrazným transformátorem světa logistiky a světa skladování, a to zejména díky příchodu internetu a vzestupu e-commerce. E-commerce je pojem, který se používá pro označení obchodních transakcí pomocí internetu či jiných elektronických prostředků. Elektronické obchodování lze rozlišit, dle jeho cílových skupin [22]:

- **B2B (Business-to-Business)** – označuje obchodní vztahy mezi dvěma či více obchodními partnery (např. vztah mezi velkoobchodem a maloobchodem),
- **B2C (Business-to-Consumer)** – označuje obchodní vztahy mezi konkrétním podnikem a konečným zákazníkem (např. prodej hotového výrobku nebo poskytnutí služeb),
- **B2G (Business-to-Government)** – označuje podmnožinu B2B, kdy se jedná o poskytování služeb firmami orgánům veřejné správy (např. poskytnutí marketingových služeb),
- **B2E (Business-to-Employee)** – označuje obchodní vztahy mezi podnikem a jeho zaměstnanci (např. prodej produktů se zaměstnaneckou slevou).

Příchod e-commerce do světa skladování vyžadoval a stále i vyžaduje účelné a účinné skladovací systémy a efektivní distribuci ke správě rostoucí nabídky produktů a poptávky

zákazníků. Lidská síla a vysokozdvížené vozíky nebyly již schopné takové tempo nárůstu manipulací dlouhodobě zvládnout, proto se přistoupilo k vývoji automatizovaných skladovacích technologií, které se označují jako AS/RS (Automated Storage and Retrieval Systems neboli automatické skladovací a výběrové systémy).

Tyto technologie plně nebo částečně umožňují automatizované uložení nákladu, jeho alokaci, pickování i distribuci k výrobním linkám. Systémy AS/RS se v průběhu let neustále zdokonalují díky využívání sofistikovanějších a výkonnějších technologií, jako jsou například lasery nebo QR kódy, nahrazující mechanické čáry. Trend AS/RS je dlouhodobě populární i v České republice, která v zavádění systémů AS/RS v moderních logistických centrech rozhodně není pozadu za světovým vývojem. Jen za poslední dobu došlo k otevření dvou (suchý a chlazený) tzv. Autostorů pro firmu Rohlík.cz v Chrášťanech (Obrázek 2). Na dennodenní bázi zde pickuje, manipuluje 269 robotů s 40 600 bedýnkami na celkem 64 stanovištích pro naskladnění či vyskladnění. Tito roboti jsou schopni manipulovat rychlostí až 70 km/h, což je při použití lidské síly nebo méně automatizovaných technologií zcela nepředstavitelné. Jednou z poměrně velkých nevýhod na provoz veškerých automatických technologií je vysoká náročnost na jejich obslužný software, který musí provádět zcela přesné operace, protože cena takových dvou nabouraných robotů se může pohybovat v cenové hladině nové Škody Superb. [23]



Obrázek 2 - AutoStore v Rohlík.cz v Chrášťanech, zdroj: [autor]

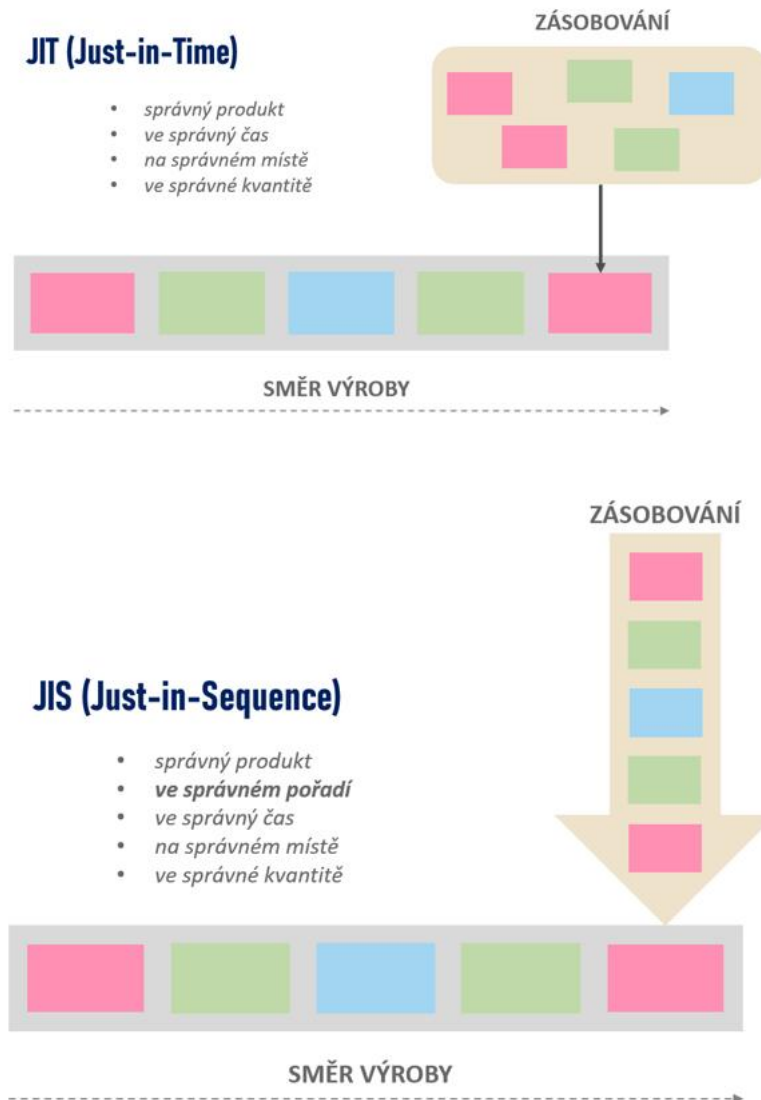
V 80. letech 20. století, ruku v ruce s růstem vlivu internetu, se začaly vyvíjet i systémy řízení skladu neboli WMS (Warehouse Management System). Jsou navrženy tak, aby automatizovaly procesy jako jsou optimální výše zásob ve skladu, optimální umístění zásob



(např. dle ABC nebo XYZ analýzy) či předpovídání poptávky na základě sdílení dat mezi jednotlivými zainteresovanými osobami. Dnešní moderní WMS si dokážou poradit s širokou škálou problémů včetně integrace s dalšími technologiemi (např. integrace se čtečkami). Tento vynález přinesl do světa skladování zejména navýšení efektivity, rychlosti a bezpečnosti manipulačních procesů.

Samotné změny v oblasti skladování se netýkaly pouze změny způsobu uložení zboží nebo zavádění automatizovaných technologií, ale dotkly se i inovací v oblasti distribuce zboží a lokalizace skladů. S nárůstem internetového obchodování se zvyšovala poptávka po menších a efektivnějších skladech umístěných v blízkosti center velkých měst. Tento trend nazýváme jako trend „logistika poslední míle“, která umožňuje, aby logistická centra byla nadosah zákazníkovi. S tím souvisí i větší flexibilita v doručování (např. same day delivery), přínos nových doručovacích technologií (např. Z-BOX, doručování roboty či drony) či minimalizace ekologických faktorů, které sebou doprava přináší (kongesce, prach či hluk).

Změny v oblasti doručování zásilek se netýkaly pouze sektoru B2C, ale i sektoru B2B. V průběhu 80. let 20. století došlo k rozmachu logistických technologií jako jsou JIT (Just in Time) nebo JIS (Just in Sequence). Tyto technologie a přístupy, které byly vyvinuty v Japonsku, se zaměřují na minimalizaci zásob, efektivní plánování výroby, doručování materiálu do výroby v co nejkratším možném čase, snižování skladovacích nákladů a snižování množství kapitálu vázaného v zásobách. JIS oproti technologii JIT je schopna řídit dodávky materiálů a komponent v přesném pořadí požadovaném výrobou (Obrázek 3). [18], [19], [24]



Obrázek 3 - Rozdíl mezi JIT a JIS, zdroj: [autor]

Objektivně lze říci, že skladování má velmi bohatou a nezanedbatelnou historii. V průběhu let se měnilo nejen to, jakým způsobem bylo zboží skladováno a distribuováno, ale i to jaké skladovací technologie byly používány či jakým způsobem byly jednotlivé sklady navrhovány. Samotné vynálezy zvýšily efektivitu a bezpečnost skladových manipulací a procesů a zároveň i jejich automatizaci. Tento významný faktor přispívá k udržení tempa s dnešními logistickými řetězci, které sebou často přinášají i řadu nepredikovatelných událostí, například COVID-19. Ten sebou přinesl spousty negativních změn a výzev v oblasti logistiky a skladování

(např. zpožděné dodávky materiálů), ale zároveň i řadu pozitiv, jako byly investice jednotlivých podniku do výše zmíněných inovací.

Vzhledem k neustálým změnám a pokrokům v oblasti logistiky a skladování je pravděpodobné, že budoucnost skladování se bude neustále vyvíjet, a i nadále bude klíčovým faktorem pro fungování společnosti.

## 1.2. Definice skladování a skladů

Již desítky let je skladování nedílnou součástí logistiky a dodavatelských řetězců. Definici skladování lze uvést hned několika způsoby například:

- Za skladování jako součásti logistického, nebo dodavatelského řetězce budeme považovat soubor činností spojených s pořízováním, udržováním zásob a zejména dodávkami skladovaných položek podle požadavků přímým zákazníkům na nějakém místě logistického nebo dodavatelského systému včetně uskutečnění s tím spojených nezbytných rozhodovacích procesů. Sklad je pak jedním z prvků logistického, dodavatelského systému. [7]
- Pernica vymezuje sklad jako „místo udržování zásob, článek logistického systému, z něhož jsou uspokojováni odběratelé formou skladových dodávek“. [8], [9]
- Skladování je součástí logistiky a zahrnuje všechny činnosti spojené se skladování od přijetí zboží až po jeho expedici. Cílem skladování je poskytnout zboží ve správném množství, kvalitě a čase, a to za co nejnižší náklady. [7]
- Skladování je proces správy materiálových toků, který zahrnuje příjem, skladování a výdej zboží a surovin. [7]

Mezi nejznámější definice skladu patří:

- Sklad je prostor určený pro skladování nějakého materiálu (surovin, výrobků, zboží, domácích potřeb atd.), ve smyslu jejich trvalého uchování v nezměněném stavu. [7]
- Sklad je místo, kde je uskladněno zboží nebo suroviny takovým způsobem, aby byly k dispozici v případě potřeby. Sklad může být jakýkoli prostor, včetně budov, kontejnerů, sil, nádrží atd. [7]
- Sklad je místo, kde se uskladňuje zboží, než bude přepraveno na místo určení. Skladování pomáhá snižovat náklady a zvyšovat efektivitu při přepravě zboží. [7]
- Sklad je místo, kde se zboží nebo suroviny uskladňují a spravují pro účely výroby nebo distribuce. Sklady mohou být jak manuální, tak automatizované a mohou být provozovány jak samostatně, tak i jako součást výrobního nebo distribučního zařízení. [7]

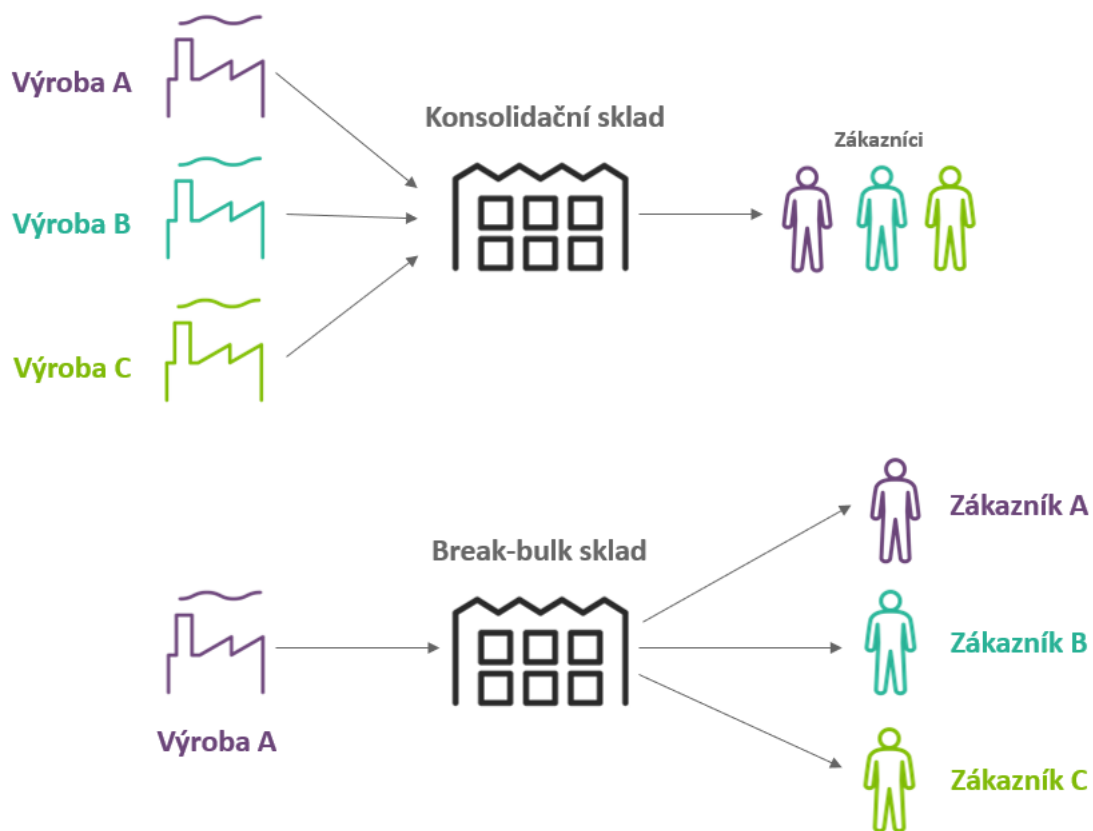
### 1.3. Funkce skladování a skladů

Sklady a s nimi související skladování mají hned několik základních funkcí a úloh, které zajišťují plynulý průběh obchodních, distribučních a výrobních procesů. Mezi hlavní a stěžejní úlohy skladů patří zejména pohybové procesy: příjem (vykládka a zaevidování zboží), skladování zásob, picking (výběr konkrétní poptávané položky), kompletace (konsolidace vybraných položek a jejich příslušné balení) a expedice zásob (výdejní kontrola a nakládka).

Mimo obecné pohybové funkce skladů mají samotné sklady několik dalších funkcí. Klasifikace a vymezení jednotlivých funkcí skladů se u jednotlivých odborníků může lišit, ale obecně je lze integrovat do následujících funkcí [7], [25], [27], [28], [29]:

- **Skladování zásob** – zatímco dnešní moderní sklady mohou sloužit pro mnohem více účelů, tak primární funkcí skladů vždy byla a bude funkce skladovací. Sklady poskytují prostor pro skladování zboží, vybavení, hotové výroby atd.
- **Bezpečnostní funkce** – umístění zboží do skladu umožňuje i určitý druh ochrany zboží. Jedná se o ochranu zejména před poškozením, krádeží či jinými bezpečnostními riziky. Dnešní moderní sklady bývají vybaveny hned několika bezpečnostními prvky jako jsou například kamery, alarmy, laserová čidla, jenž umožňují chránit skladované zboží před vnějšími vlivy.
- **Kvalitativní funkce** – kontrola kvality zboží či materiálu probíhá nejčastěji právě ve skladu. Pověření a proškolení zaměstnanci odpovídají za dodržení příslušných kvalitativních předpisů, které vycházejí z povahy skladovaného zboží. Nejčastější forma kontroly kvality je vizuální a hmotnostní. Tato kontrola probíhá obvykle na příjmu zboží, kde je zboží zkontrolováno dle uvedených údajů, nacházejících se nejčastěji na dodacím listu nebo jiné formě příjmového dokladu. V dnešní době, kdy logistické a výrobní řetězce zažívají poměrně těžké časy ohledně dodávek materiálů či zboží, může mít podcenění kvalitativních procesů ve skladu až fatální následky. Kontrola kvality ve skladu nemusí probíhat pouze na vstupu materiálu či zboží do skladu, ale i během celého skladovacího procesu. Různé kontrolní systémy (čidla, lasery atd.) umožňují chránit skladované zboží před negativními vlivy okolního prostředí (např. teplo, vítr či prach), které by mohly mít neblaze působit na jeho kvalitu (zkažení zboží, expirace, ztráta záruky atd.). Kontrolní systémy nemusí jít pouze fyzickou cestou, mohou mít i podobu softwarovou. Dnešní WMS umí sledovat pohyb jednotlivých materiálů a zboží po celém logistickém řetězci, přenášet příslušné informace včetně informací o kvalitě. Tyto systémy dovedou zavčas upozornit odpovědnou osobu například na blížící se expiraci zboží či konec záruční lhůty.

- **Inventarizační funkce** – existence skladů a s ní spojené procesy pomáhají s řízením inventářů a pohybem zásob. Systémy řízení zásob umožňují v reálném čase sledovat pohyby zboží a umožňují tak zjednodušit procesy plánování, nákupu či výroby.
- **Konsolidační funkce** – skladovací prostory umožňují shromažďovat zboží a materiály z různých míst či zdrojů do jednoho. Konsolidace zboží se může provádět hned z několik důvodů, zejména se provádí s cílem snižování nákladů na přepravu a skladování nebo za cílem zvýšení efektivity vybraného procesu.
- **Dekonsolidační funkce** tzv. Break-bulk – na rozdíl od funkce konsolidační, umožňují sklady přijímat zboží i z jednoho závodu, výroby či od jednoho dodavatele ve velkém množství a distribuovat jej dál v menších množstvích dle jednotlivých potřeb či zákaznických poptávek. Rozdíl mezi konsolidační a dekonsolidační funkcí (Obrázek 4).



Obrázek 4 - Rozdíly mezi konsolidací a dekonsolidací, zdroj: [autor]

- **Stabilizační funkce** – skladové zásoby umožňují minimalizaci zpoždění výroby či distribuce v případě neočekávaných výkyvů na logistickém řetězci. Tyto výkyvy se týkají zejména přerušení dodávek, náhodného charakteru poptávky či výrobních a distribučních problémů u dodavatelů, které v dnešní době bývají na denním pořádku. Se stabilizační funkcí skladů se pojí i pojem tzv. pojistná zásoba. Pojistná zásoba je udržována ve skladu jako ochrana vůči neočekávaným vlivům a událostem

na logistickém řetězci. Důležité ale je tuto hladinu pojistné zásoby nastavit optimálně s přihlédnutím na skladovací a provozní náklady. Zároveň skladování zboží ve skladu umožňuje přizpůsobit nabídku poptávce zákazníků.

- **Spekulativní funkce** – sklady a jejich zásoby jsou také často spojovány s udržováním a pořizováním tzv. spekulativní zásoby. Tato funkce skladů a strategie nákupu bývá využívána zejména v situacích, kdy nákup daného materiálu, či zboží není vynucen poptávkou zákazníka či potřebou výroby, ale pro zajištění zásob v době, kdy jsou zásoby značně levnější a v dostatečném množství a očekává se nárůst cen či růst poptávky. Spekulativní nákupy mohou umožnit vybraným podnikům i budoucí získání konkurenční výhody, jelikož se stihli v dostatečném předstihu oproti ostatním připravit. Ovšem i při této strategii je nutné být velmi obezřetný, protože v případě, že k očekávanému růstu cen nebo zvýšení poptávky nedojde, tak to může vést i nekontrolovatelným ztrátám a uložením zbytečně vysokých investic v zásobách.
- **Výkonová funkce** – sklady a jejich technologie umožňují v dnešní době zlepšovat a zvyšovat efektivitu logistických procesů a snižovat tak potřebný čas na vyřízení a distribuci objednávek.
- **Nákladová funkce** – vhodné umístění skladu a efektivní nastavení skladovacích procesů umožňuje snížit náklady na skladování, manipulaci a přepravu zboží.
- **Technologická funkce** – sklady mohou být také často součástí výrobních a technologických procesů. Kdy příkladem potřebné skladovací kapacity během výrobního procesu jsou například procesy zrání sýrů, kvasné procesy v lihovarnictví, stabilizační chemické procesy v kosmetologii atd.

#### 1.4. Druhy skladů a způsobů uskladnění

Sklady můžeme členit a posuzovat do několika kategorií, dle různých kritérií a hledisek. Podle toho můžeme sklady členit (Tabulka 1):

Tabulka 1 - Typy skladů, zdroj: [7], [15], [17]

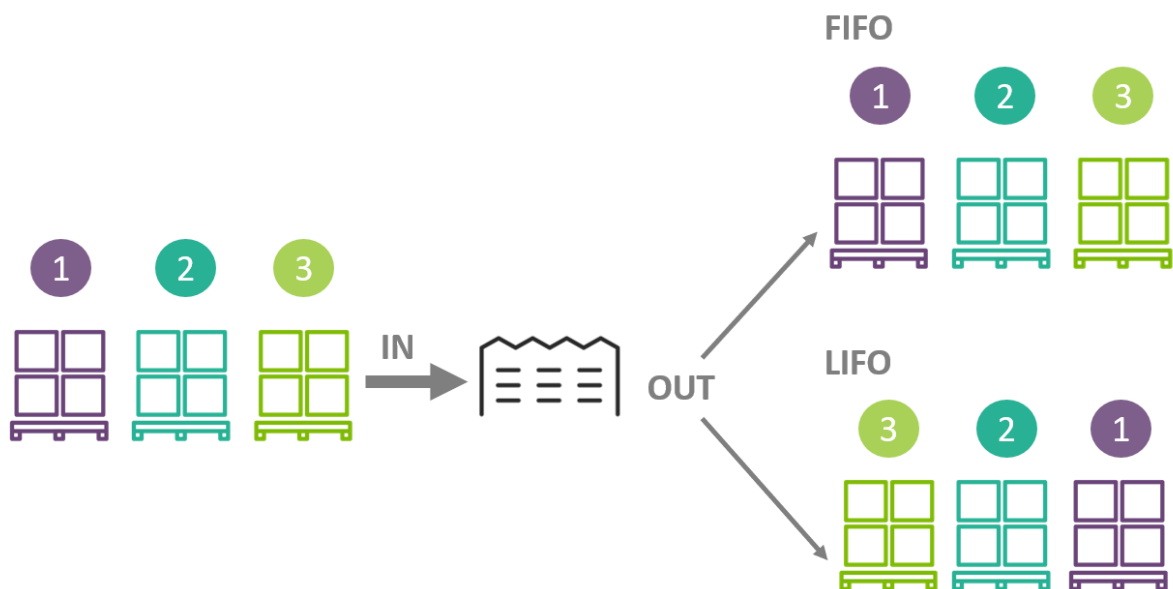
Kritérium	Příklad	Poznámka
Funkce	Distribuční sklad	Sklad zahrnující větší počet dodavatelů i zákazníků. Umožňuje jak skladování, změnu sortimentu, tak distribuci.
	Zásobovací sklad	Sklad pro zásobování průmyslové výroby.
	Cross – dock	Nejedná se o sklad určený pro skladování, ale pouze pro překládku dle zadaných kritérií.

	Tranzitní sklad	Sklad nalézající se na dopravním uzlu, který zajišťuje příjem, rozdělení a naložení na vyžádaných dopravní prostředek.
	Konsignační sklad	Sklad u dodavatele, kdy je skladováno na účet dodavatele a odběr zboží je prováděn na základě potřeb zákazníka (např. skladování náhradních dílů).
	Celní sklad	Sklad pro umístění zboží vyžadujícího proclení nebo celní ochranu (např. tabák či alkohol).
<b>Vlastnictví</b>	Soukromý sklad	Ve vlastnictví podniku, který sklad zároveň využívá
	Externí sklad (veřejné sklady)	Sklad využívaný firmami, které nejsou vlastníky skladovacích prostor.
<b>Technologická pokročilost</b>	Konvenční sklad	Využívají standartních způsobů skladování bez využití automatizovaných technologií pro manipulaci a skladování.
	Poloautomatizovaný sklad	Částečně využívá automatizované zařízení.
	Plně automatizovaný sklad	Plně využívá automatizaci pro skladování i pro manipulace.
<b>Povaha zákazníků</b>	Velkoobchodní sklad	Sklad určený pro skladování zboží určené pro další prodej.
	Maloobchodní sklad	Sklad určený pro skladování zboží, které je určeno pro prodej koncovým zákazníkům.
	E-commerce sklad	Sklad určený pro skladování zboží, které je určeno pro on-line prodej.
<b>Dle způsobu skladování</b>	Pevné skladování	Každý druh skladovaného zboží má své pevně vymezené skladovací místo.
	Volné skladování	Skupiny skladovaného zboží mají vymezený skladovací prostor v rámci skladu.
	Náhodné skladování	Zboží je ukládáno do aktuálních systémově volných adres.
<b>Dle druhu skladovaného zboží</b>	Sklady pro sypké materiály	-
	Sklady pro tekuté materiály	-

	Sklady pro nebezpečný odpad	-
<b>Dle konstrukce skladu</b>	Otevřené sklady	Volně skladované zboží a materiál.
	Uzavřené sklady	Uzavřené ze všech stran.
	Kryté sklady	Mohou mít střechu, ale nejsou uzavřené ze všech stran.
	Halové sklady	Jednopodlažní sklady.
	Etážové sklady	Vícepodlažní sklady.
<b>Dle průtoku zboží</b>	Průtokový sklad	Oblast příjmu a vyskladnění jsou na různých stranách, zboží má tedy jednosměrný pohyb.
	Hlavový sklad	Oblast příjmu i vyskladnění jsou na téže straně, zboží má tedy obousměrný pohyb.

Samotný výběr skladovací plochy či prostor může ovlivnit i plánovaná metoda vyskladnění. Jedná se o metody FIFO a LIFO (Obrázek 5).

- **FIFO** (First In, First Out) – materiál, zboží či komponenty opouští skladovací místo v pořadí, v jakém bylo zaskladněno
- **LIFO** (Last In, First Out) – materiál, zboží či komponenty, které byly umístěny do skladovacího místa jako poslední, tak opouští skladovací místo jako první



Obrázek 5 - Metoda FIFO vs. LIFO, zdroj: [autor]



Způsob, jakým budou zboží, materiál či komponenty v daném skladě uskladněny, může záviset hned na několika hlediscích, například na vlastnostech skladovaného materiálu či zboží, četnosti materiálu, rozměrech materiálu atd. Mezi nejznámější způsoby zaskladnění (technologický způsob skladování) patří [7], [15], [17]:

- **Skladování na volné ploše** – jedná se o nejjednodušší formu skladování zboží či materiálu, která má minimální technologickou náročnost. Tento způsob skladování patří mezi nejstarší a zároveň i mezi nejméně efektivní, jelikož nedochází k využívání plochy i do výšky. Uvedený způsob se často používá pro nadrozměrný materiál nebo pro jiné druhy materiálů, které nejsou vhodné pro ostatní metody skladování (např. sypké materiály).
- **Stohování** – jedná se o skladovací systém, který také využívá volnou plochu, ale na rozdíl od volného skladování zde dochází ke stohování materiálu do výšky. Ve většině případů bývají stohovány paletové nebo kontejnerové manipulační jednotky. Výhodou využití této metody skladování oproti skladování na volné ploše je větší využití skladové plochy a prostoru. Tento způsob ale vyžaduje rovnoměrné rozložení materiálu na paletě a dostatečné upevnění materiálu, aby nedošlo k jakémukoliv poškození.
- **Regálové skladování** – forma skladování, kterou i v dnešní automatizované době, potkáte stále nejčastěji. Do této skupiny skladování patří skladování v policových regálech, paletových regálech, konzolových regálech, karuselových regálech či ve spádových regálech.

### 1.5. Náklady na skladování

Skladování a činnosti s ním spojené jsou klíčovou součástí funkčnosti logistického řetězce. Náklady na skladování vznikají v průběhu procesu skladování a uskladnění zboží. Mohou zahrnovat náklady na energie, pronájem, zabezpečení, vybavení skladu (regály, manipulační technika atd.), údržbu, WMS atd. Mezi hlavní faktory ovlivňující náklady na skladování patří [6], [7], [10], [11], [12]:

- **Doba skladování** – čím déle je zboží ve skladu umístěno, tím vyšší jsou náklady na skladování. Toto tvrzení platí zejména v případě externího skladování, kde se mimo ceny za příjem a expedici zboží započítává do celkových nákladů i cena skladování palety/binu za den.
- **Druh zboží** – určité typy zboží či materiálů mohou vyžadovat specifické skladovací podmínky či skladovací technologii, což může mít výrazný vliv na náklady (např. mražené produkty).

- **Velikost skladu** – větší sklady sebou nesou i větší náklady za skladování nejenom z hlediska ceny za 1 m<sup>2</sup>, ale také i z hlediska náročnosti na vybavení, například na dodržení požární bezpečnosti. Jedním z typických příkladů jsou sprinklerové hlavice, které jsou často vyžadovány od světlé výšky skladu (tzn. Svislá vzdálenost mezi nejvyšším bodem dolního okraje a nejnižším bodem horního okraje využitelného prostoru) nad 9 m a jejichž pořízení a implementace jsou vysoce nákladné.
- **Poloha skladu** – stejně jako v případě polohy nemovitostí je zásadní rozdíl mezi umístěním skladu v blízkosti center měst oproti umístění v odlehlých oblastech. Při možnosti výběru polohy skladu je vhodné brát v potaz: rozmístění zákazníků a dodavatelů, dopravní dostupnost a dostupnost pracovní síly v přijatelné platové hladině.
- **Využití skladu** – častým příkladem z praxe je neefektivní využívání stávajících skladových ploch, kdy si jednotlivé podniky stěžují na nedostatek skladovací kapacity. Ve velkém procentu těchto případů ale stačí pouze lépe využít stávající skladovací plochy (umístění zboží do vhodných skladovacích prostředků dle jejich rozměrových charakteristik) nebo provést analýzu zásob (umožňuje zobrazit obrátkovost položek a zjistit tak, které zboží/materiály již nevykazují obrátku a dle výrobního plánu už ani vykazovat nebudou, lze je tedy zcela vyřadit a uvolnit tak skladovací plochu pro jiné položky).

V dnešní době je mezi podniky stále populárnější outsourcovat skladování do rukou logistických odborníků, často známých pod pojmem fulfillment. Toto rozhodnutí může být pro firmy výhodné hned z několika důvodů. Jedním z důvodů je přenechání této činnosti do rukou profesionálů se specifickými zdroji a know-how, které by pro samotné firmy mohly být často nedostupné. Ušetřený čas je pak možné věnovat vlastnímu výrobnímu procesu. Ušetřit lze i skladovací prostory, který je potom možno využít pro potřeby výroby a vývoje či jiná oddělení.

S využitím externího skladování je ovšem nutno zvážit veškerá rizika, která s sebou tato možnost přináší. Jedním z nich je výběr kvalitního poskytovatele služeb, který bude skladovat a distribuovat dle potřeb zákazníka a neohrozí tak zákaznickou spokojenost a kvalitu poskytovaných zboží a služeb. Dalším negativním faktorem může být i samotná cena poskytovaných služeb. Cena se neskládá pouze z poplatků spojených s příjmem, skladováním a expedicí, ale může zahrnovat i poplatky za přebalení zboží, označení, umístění reklamního materiálu či provoz vlastního WMS. Zvolení cesty externího skladování je tedy nutno velmi dobře a odpovědně zvážit, pečlivě zhodnotit její rizika a její přínosy.

## 2. Obaly a manipulační jednotky

Obaly jsou jednou z nejdůležitějších součástí dodavatelských řetězců a systémů, která spadá mezi pasivní logistické prvky. Až na výjimky, tak většina pohybu zboží a materiálů není realizovatelné bez použití obalů, které jsou následně kompletovány do manipulačních a přepravních jednotek. Jejich primární posláním je uchovávání zboží v nezměněné kvalitě až do bodu jejich spotřeby. Využití obalů a jejich přepravních jednotek nalezneme jak v procesech skladování, nákupu, distribuci, ale stejně i při uskutečnění reverzní logistiky. Obaly jsou častým příkladem reverzní logistiky, jelikož často bývají předmětem jejich likvidace a následným zdrojem výroby sekundárních materiálů. [7]

### 2.1. Definice obalů

Definice obalu se průběhu let vyvíjela a lze jich citovat mnoho. Ve většině případech vycházejí z jeho funkce a vztahu k produktu a výrobnímu procesu. Příkladem takových definic jsou:

- Pernica [8], [9] definuje „obal jako prostředek nebo soubor prostředků chránících materiál před ztrátou a před poškozením, které by během manipulace, přepravy, skladování či prodeje (převedení, nabídky) mohl utrpět nebo způsobit“.
- Čujan [13] definuje „obaly jako prostředky na ochranu, manipulaci, dopravu a skladování, které svými vlastnostmi vyrovnávají časové, prostorové a obsahové difference a vyplňují prostor mezi výrobou a spotřebou“.
- Chopra a Meindl [14] definují „obal jako zpravidla pevnou a uzavřenou nádobu nebo obalový materiál, který je určen k ochraně zboží před poškozením, kontaminací a ztrátou během skladování, manipulace a přepravy, a umožňuje jeho prezentaci a identifikaci“.

### 2.2. Legislativa

Obalovou legislativu v České republice upravuje **zákon č. 477/2001 Sb., o obalech**, který považuje obal za „výrobek zhotovený z materiálu jakékoli povahy a určený k použití, ochraně, manipulaci, dodávce, popřípadě prezentaci výrobku nebo výrobků určených spotřebiteli nebo jinému konečnému uživateli, jestliže má zároveň [31]:

1. v místě nákupu tvořit prodejní jednotku pro spotřebitele nebo jiného konečného uživatele (dále jen „prodejní obal“),
2. v místě nákupu tvořit skupinu určitého počtu prodejních jednotek, ať již je tato skupina prodáván spotřebiteli nebo jinému konečnému uživateli, anebo slouží pouze jako pomůcka pro umístění do regálů v místě prodeje a může být z výrobku odstraněn, aniž se tím ovlivní jeho vlastnosti (dále jen „skupinový obal“), nebo

3. usnadnit manipulaci s určitým množstvím prodejních jednotek nebo skupinových obalů a usnadnit jejich přepravu tak, aby se při manipulaci a přepravě zabránilo jejich fyzickému poškození (dále jen „přepravní obal“).

Zákon se skládá z několika částí, mimo samotnou definici obalu a základní rozdělení zákon stanovuje práva a povinnosti pro právnické a podnikající fyzické osoby. Upravuje oblast uvádění nových obalů na trh a do oběhu, evidence, označování obalů, stanovuje procentuální množství obalového odpadu, které musí být recyklováno nebo využito, upravuje pravidla pro nakládání s vratnými a vratnými zálohovanými obaly, využití odpadu z obalů atd. Důležitými body jsou i body v oblasti životního prostředí, které sebou výroba obalů přináší.

Mimo zákon je používána i řada legislativních norem, které upravují a blíže specifikují požadavky na obaly zejména z důvodu snižování vlivu obalového průmyslu a koloběhu na životní prostředí. Příkladem takových norem jsou [32]:

- ČSN 77 0000 Obaly – Základní termíny: jejíž účelem je definovat základní termíny této oblasti pro jejich použití v celém průřezu hospodářství a při tvorbě legislativy,
- ČSN 77 0003 Obaly – Obaly a životní prostředí,
- ČSN 77 0004 Obaly – Terminologie – Základní termíny a definice: jejíž účelem je Funkce obalů.

Obaly mají v dodavatelských řetězcích a systémech řadu funkcí, které se odvíjí od toho, v jaké části řetězce se obalový materiál nachází. V současné době můžeme funkce obalů rozdělit do následujících funkcí:

### 2.2.1. Ochranná funkce

Ochrannou funkci lze považovat za nejdůležitější. Obaly a jejich nástroje pomáhají chránit zboží či materiál před úmyslným i neúmyslným mechanickým poškozením, ke kterému může dojít v průběhu celé řady procesů dodavatelského řetězce. Za rizikové situace se považují zejména manipulace, skladování a distribuce. Obal by měl vždy být přizpůsoben tomu, v jakých podmínkách se bude nacházet. Vhodná volba obalu může omezit i ztráty spojené s krádežemi. [6], [7], [16]

Obaly zároveň umožňují chránit zboží či materiály od poškození vlivem změny klimatických, biologických či chemických podmínek. Jedná se o případy ochrany proti absolutní a relativní vlhkosti vzduchu, proti změnám teploty, které mohou zásadně ovlivnit kvalitu skladovaného nebo manipulovaného materiálu. Řada zboží může vyžadovat i ochranu před světlem či napadením hmyzem či hlodavci. [6], [7], [16]

Obaly mohou představovat i určitý typ spotřebitelské ochrany, můžou obsahovat varování a informace o způsobu, jak má být se zbožím manipulováno.

### 2.2.2. Manipulační funkce

Manipulační funkce obalu výrazně souvisí s ochrannou funkcí, jelikož právě při manipulaci dochází k rizikovým situacím, před kterými musí být výrobek chráněn. Základním cílem této funkce je, aby obaly byly navrženy a vyrobeny tak, aby usnadnily manipulaci během dodavatelského procesu. Vhodně navržený obal může napomoci ke snížení pracnosti manipulačních operací a významně tak ovlivnit náklady s přepravou a manipulací spojené. [6], [7]

Manipulační funkce jsou zásadní zejména během procesů skladování, manipulaci a distribuce. Pro tyto procesy je vhodné obaly přizpůsobit tak, aby byly snadno dostupné (tzn. Snadná otevíratelnost), splňovaly rozměry a tvar v souladu s ISO normami a byly dostatečně pevné. Obaly by měly být navrženy s ohledem na manipulaci a automatizaci, aby byly pro techniku a stroje snadno čitelné a identifikovatelné. [6], [7]

Při samotném návrhu obalu je třeba myslet na standardizaci, která významně usnadňuje manipulaci a skladování a zvyšuje jejich rychlost a efektivitu. Standardy bývají obvykle stanoveny mezinárodními a národními organizacemi a sdruženími. Jejich hlavním cílem je standardizovat rozměry a nosnosti obalů a manipulačních jednotek, zároveň by měly být i kompatibilní s dalšími technologiemi napříč dodavatelským řetězcem. [6], [7]

### 2.2.3. Informační funkce

Obaly slouží rovněž jako nositelé informací pro všechny účastníky toku. Uvádí informace o výrobku, složení, datumech výroby a spotřeby, způsobu správného použití a identifikaci. Tyto informace nejsou důležité pouze pro spotřebitele, ale také pro dopravce, prodejce či další subjekty dodavatelského řetězce. Absence informační funkce by mohla vést k nesprávnému použití výrobku a ke zhoršení kvality zákaznického servisu. [6], [7]

### 2.2.4. Prodejní funkce

Často podceňovanou funkcí obalu je prodejní funkce neboli marketingová funkce. Tato funkce se týká prezentace a vizualizace obalu, jenž by měl zákazníka hned na první pohled zaujmout. Obaly by měly být navrženy tak, aby dokázaly upoutat pozornost zákazníků na všech prodejních kanálech, zvýšit jeho atraktivitu a podpořit jeho prodejnost. Jedná se o různé prvky, které mohou ovlivnit rozhodovací proces zákazníků. Jsou to například barevné kombinace, designové prvky, písmo a další speciální prvky, které vystihnou charakter produktů přizpůsobený cílové skupině zákazníků. Prodejní funkce a její provedení může mít výrazný vliv na úspěch produktu na trhu při zachování informační hodnoty produktu. [6], [7]

## 2.3. Rozdělení obalů

Dle [13], [15] můžeme obaly rozdělit do třech základních skupin:

1. Přepravní obaly – skupina obalů, která zajišťuje ochranu zboží při manipulaci, skladování a distribuci. Přepravní obaly by měly být navrženy tak, aby byly snadno dostupné a dostatečně pevné a odolné, aby dokázaly výrobek ochránit před vnějšími vlivy. Zároveň by měly plnit i funkci informační, kdy přinesou nezbytné obchodní, bezpečnostní a manipulační informace. Nejznámějším příkladem přepravních obalů jsou palety a kontejnery.
2. Spotřebitelské obaly (tzv. primární obaly) – jsou určeny pro konečné spotřebitele, kdy bývají v přímém styku s baleným výrobkem. Spotřebitelské obaly plní funkci ochrannou a informační.
3. Manipulační obaly (tzv. sekundární obaly) – jsou určeny pro ochranu spotřebitelských obalů, které sdružují do větších celků díky čemuž snižují pracnost manipulačních činností. Příkladem manipulačních obalů jsou různé druhy fólií, přepravky či krabice.

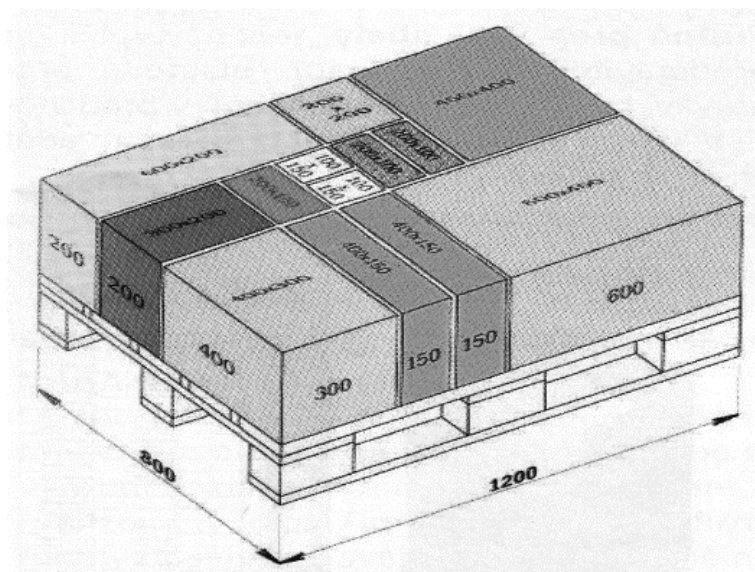
## 2.4. Manipulační jednotky

Manipulační jednotky dle Pernica [8], [9] vznikají postupným sdružováním obalů a zajišťují tak efektivnější a bezpečnější pohyb zboží. Manipulační jednotky mohou plnit jak ochrannou, tak informační funkci. Mezi jejich hlavní funkce patří celosvětová standardizace a unifikace manipulačních jednotek, která umožní zrychlení dodavatelského řetězce, lepší využití kapacit dopravních prostředků a snížení logistických nákladů. Dle stupně jejich postupného seskupení je lze klasifikovat na manipulační jednotky I. až IV. řádu.

**Manipulační jednotky I. řádu** představují jednotky určené pro ruční manipulaci. Každá manipulační jednotka může obsahovat několik kusů požadovaných výrobků a může být zabalena různými způsoby, jako je například smrštitelná fólie, přepravka, kartonová krabice či bedna (lepenkové, plastové či plechové). Pro jednodušší vytvoření, vyplnění a využití jednotek II. řádu jsou vytvářeny základní rozměrové moduly ISO pro kartonové krabice, přepravky nebo bedny. Výchozím ISO rozměrem půdorysné plochy pro manipulační jednotku I. řádu je 400 x 600 mm, ale existuje řada jeho modifikací (Tabulka 2). [7], [8], [9]

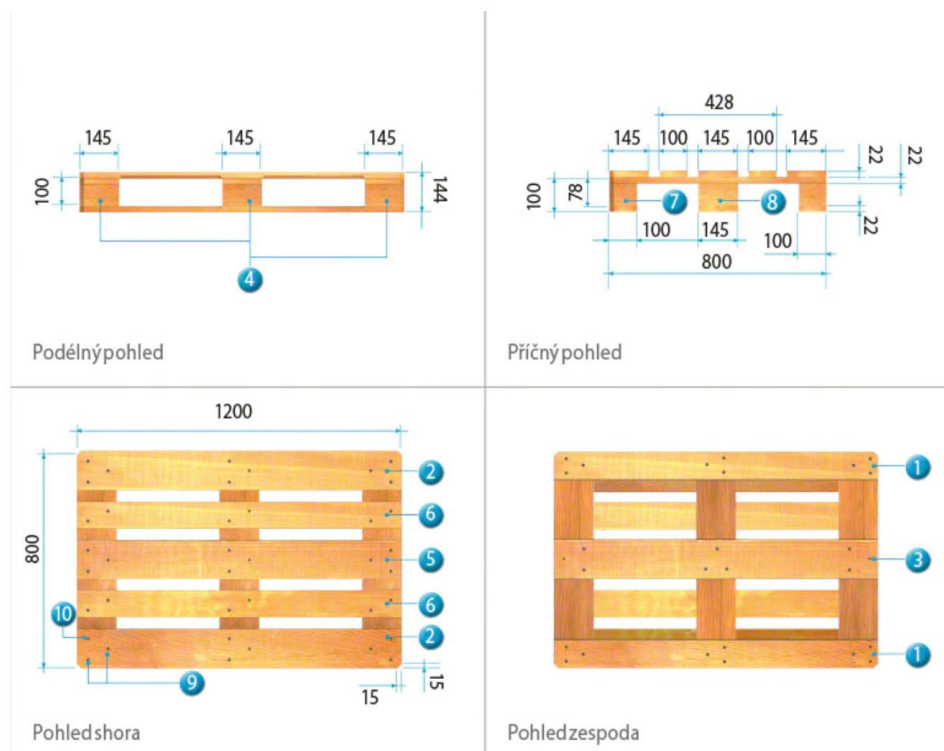
*Tabulka 2 - Modifikace půdorysných ploch manipulačních jednotek I. řádu, zdroj [7]*

a (mm)	400	400	400	400	200	200	200	200	100	100	100	100
b (mm)	600	300	200	100	600	300	200	100	600	300	200	100



Obrázek 6 - Normalizace rozměrů EUR paleta, zdroj: [30]

**Manipulační jednotky II. řádu** jsou důležitými jednotkami pro efektivní a bezpečnou manipulaci ve skladech a ve výrobě. Tyto jednotky vznikají seskupením 16 až 24 jednotek I. řádu a jejich hmotnost se pohybuje v rozmezí od 250 až 1 000 kg (výjimečně až 5 000 kg). K jejich tvorbě se nejčastěji využívají palety (nejčastěji Europalety Obrázek 7), plošiny, malé kontejnery, skupiny jednotek I. řádu (Obrázek 6) nebo roltejnery. Ve většině případů bývají fixovány pomocí specializovaných fólií nebo pásek. Stručný přehled manipulační jednotek II. řádu lze nalézt na Obrázku 8. [7]



Obrázek 7 - EURo palety, zdroj: [33]



Obrázek 8 - Přehled manipulačních jednotek II. řádu, zdroj: [7]

**Manipulační jednotky III. řádu** sehrávají klíčovou roli v dálkové přepravě zboží, a to všemi dopravními prostředky. Obvykle se skládají z 10 až 44 jednotek II. řádu a mohou vážit až 40 tun. Mezi nejčastěji využitými přepravními prostředky pro manipulaci se používají velké kontejnery, letecké kontejnery a výměnné nástavby. [7], [30]

**Manipulační jednotky IV. řádu** jsou posledním stupněm v hierarchii manipulačních jednotek. Jsou určeny pro dálkovou kombinovanou dopravu, vodní dopravu, tedy námořní



i vnitrozemskou. Obvykle jsou využívány pro přepravu velkoobjemových zásilek a vyžadují tak specializované prostředky pro jejich manipulaci.

Obecně se manipulační jednotky vyrábí z různých materiálů, které závisí na vlastnostech a požadavcích manipulovaného, skladovaného a přepravovaného zboží či materiálu. Mezi nejpoužívanější materiály pro výrobu obalů bezesporu patří: papír, plast, lepenka, sklo a kov. Působením stále viditelnějších mezinárodních a národních ekologických organizací je v současnosti vyvíjen zvýšený tlak na udržitelnost a recyklovatelnost obalů s cílem minimalizovat negativní vliv obalového průmyslu na životní prostředí. [7], [30]

### 3. Optimalizace a její význam ve skladování

V dnešní době jsou skladovací náklady jednou z nejdůležitějších nákladových položek pro většinu výrobních či distribučních firem. Efektivní skladování je důležitým faktorem pro úspěch jednotlivých podnikatelských subjektů. Faktorů, které ovlivňují skladování a náklady na něj, je hned několik (Kapitola 1.5). Operační výzkum a jeho aparát mohou pomoci, například s minimalizací nákladů na skladování, se zvýšením efektivity práce zaměstnanců nebo s efektivnějším využitím skladovacích či manipulačních prostorů.

Optimalizační metody se rozdělují na metody exaktní a metody heuristické. Základní rozdíl mezi nimi spočívá v tom, že u exaktních metod je možnost otestovat, zda dané řešení splňuje podmínku optimality (pokud optimální řešení úlohy existuje), u heuristických metod tato možnost není. Ne vždy jsou však exaktní metody schopny nalézt hledané optimum v disponibilním čase, a ne vždy exaktní metoda pro daný problém existuje. Heuristické metody sice nalezení optimálního řešení negarantují, ale mohou najít dobré řešení v přijatelném čase. Důležité je také zmínit, že v případě, že exaktní metoda pro danou problematiku existuje a je naděje na ukončení optimalizačního výpočtu v čase přijatelném z hlediska rozhodování, má před heuristickou metodou vždy přednost. [2], [3]

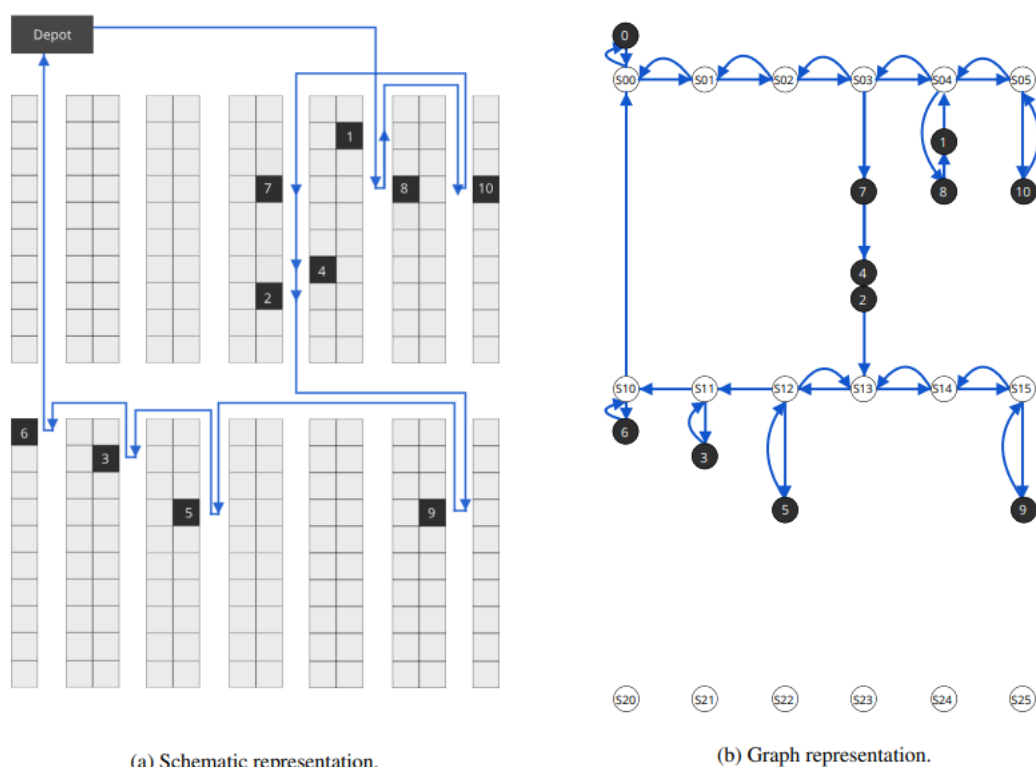
Skladovací problematika představuje oblast, kde lze optimalizační metody efektivně využít k řešení rozmanitých problémů a výzev. Skladové prostory mohou čelit různým obtížím, jako jsou omezená kapacita, vysoké skladovací náklady, neefektivní manipulační procesy či nedostatečná utilizace ploch. V tomto kontextu mohou optimalizační metody přinést významnou pomoc při řešení těchto problémů.

Jedním z konkrétních příkladů využití optimalizačních metod je pro plánování manipulací a logistických činností ve skladu nebo mezi sklady. Optimalizace manipulací a logistických činností ve skladu je zásadní pro zlepšení efektivity a snížení nákladů. Právě v tomto kontextu mohou být optimalizační metody velmi užitečné. Optimalizace ve skladových operacích je komplexní úloha, která vyžaduje pečlivé řízení a koordinaci mnoha různých proměnných. Mezi tyto proměnné patří rozmístění zásob ve skladu, plánování tras pro sběr objednávek, koordinace manipulačních zařízení, jako jsou vysokozdvizné vozíky, a také řízení pracovních sil. Každý z těchto aspektů představuje jedinečné výzvy a problémy, které je možné řešit pomocí různých optimalizačních metod.

Pokud se zaměříme například na oblast vychystávání objednávek, metoda obchodního cestujícího (TSP) může najít velmi zajímavé uplatnění. V případě standardního ručního vychystávání objednávek musí picker (tj. osoba vychystávající objednávky) obsloužit hned několik stanovišť umístěných v různých částech skladu, ze kterých vypickuje potřebné položky

objednávky. Pokud tento proces není optimalizovaný, picker může zbytečně nachodit stovky metrů navíc a ztratit čas, který mohl být využit pro vychystání další objednávky.

TSP je diskretní optimalizační úloha aparátu teorie grafů. V kontextu tohoto problému představují vrcholy grafu jednotlivé pickovací stanoviště (paletové či policové místo) a hrany grafu reprezentují jednotlivé trasy mezi těmito stanovišti. Po provedení optimalizačního výpočtu pomocí TSP lze najít optimální trasu pro vychystávání jednotlivých objednávek. Tímto způsobem lze ušetřit stovky kroků pickera denně a zvýšit efektivitu procesu vychystávání. Toto lze využít například i pro meziskladové pohyby. Příklad využití úlohy TSP ve skladu na Obrázku 9. [40]



(a) Schematic representation.

(b) Graph representation.

Obrázek 9 - Řešení skladovacího problému pomocí úlohy TSP, zdroj: [40]

Tento typ algoritmu je často součástí pokročilých systémů WMS, které plánují frontu práce jednotlivých zaměstnanců či manipulační techniky. Takto lze dosáhnout maximální efektivity skladových operací a zároveň snížit náklady spojené s manipulací se zbožím.

Je důležité poznamenat, že úloha TSP je pouze jedním z konkrétních a ověřených příkladů optimalizačních algoritmů pro skladové problémy. Existuje však mnoho dalších algoritmů, které mohou efektivně řešit různé typy skladových problémů. Výběr konkrétní metody záleží na mnoha faktorech, včetně specifických potřeb a omezení daného skladu. Tím pádem je důležité pro každý konkrétní případ zvolit ten nejvhodnější algoritmus, který nejlépe odpovídá jeho charakteristikám a požadavkům.

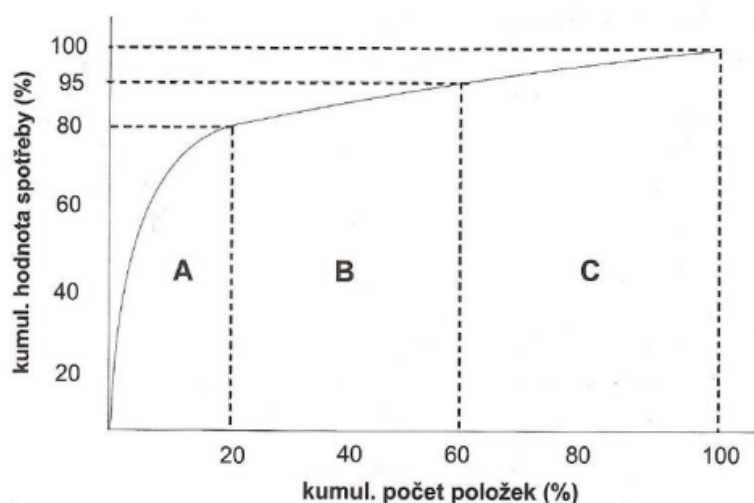
Dalším z příkladů optimalizačních problémů ve skladech je optimalizace stavu zásob. Na zásoby jsou vázány aktiva jednotlivých podniků, a právě optimalizace řízení zásob umožňuje částečné uvolnění těchto vázaných finančních prostředků a zároveň tak snižuje náklady na skladování, manipulace a přepravu, které se zásobami souvisí. Mezi nejčastější otázky, které v oblasti řízení zásob nastávají jsou: [5]

- Ve který časový okamžik je vhodné vytvořit novou objednávku pro určenou jednotku zásob?
- Jak velká by tato objednávka měla být?

Právě na tyto otázky mohou přispět svými odpověďmi různé typy aplikací modelů řízení zásob, jejichž nejčastějším optimalizačním kritériem jsou právě skladovací náklady, pořizovací náklady nebo náklady z nedostatku zásob, které vznikají v souvislosti s neuspokojením poptávky. Základní charakteristikou v modelech řízení zásob je charakter sledované poptávky, která může být buď deterministická nebo stochastická (pravděpodobnostní). [5]

Deterministická poptávka se vyznačuje tím, že je pro modelované období pevně daná. Naopak stochastická poptávka sebou přináší do modelu neurčitost, jelikož její velikost lze odhadnout pouze s určitou pravděpodobností. Se stochastickým modelem řízením zásob se setkáváme v běžné praxi. [5]

Jednou z neznámějších metod využívaných pro kvalitní řízení zásob je ABC analýza. Jedná se o metodu, která vychází z tzv. Paretova pravidla, a patří do diferenciovaných metod řízení. Paretův princip může mít hned několik možných formulací, jelikož jej lze aplikovat na širokou škálu situací, například malý počet zboží či materiálů (20 %) má velký vliv (80 %) na celkovou spotřebu neboli na celkový odbyt. Obrázek 10 zobrazuje Lorenzovu inverzní křivku, která je přehledným grafickým znázorněním Paretova principu. [5], [34]



Obrázek 10 - Lorenzova křivka zobrazující princip ABC analýzy, zdroj: [34]

Kritérium na základě, kterého můžeme rozdělit položky do jednotlivých skupin může být například cena nebo obrátkovost. Kategorie, které pomocí ABC analýzy vytváříme jsou kategorie [5]:

- **A** – kategorie nejvýznamnějších a nejhodnotnějších zásob, které představují malou část položek na skladě, ale mají důležitý vliv na celkové náklady.
- **B** – kategorie středně významných a hodnotných zásob, které tvoří střední část celkového počtu položek na skladě, a na rozdíl od kategorie A ovlivňují sledovaný parametr v mnohem nižší míře.
- **C** – kategorie zásob s nejnižší hodnotou a významem, které tvoří většinu celkového počtu položek na skladě, a sledovaný parametr ovlivňují minimálně. Pokud tyto položky jsou nezbytné pro fungování podniku, je vhodné je umístit do vzdálenějších skladovacích míst, aby se zvýšila efektivita práce a procesů.

Použití ABC analýzy má přínos zejména v tom, že přináší jednoduchý přehled o tom, které ze skladovaných položek mají největší dopad na celkové skladovací náklady a náklady na manipulace a celkově tak na hospodářský výsledek sledovaného podniku. [5]

Metoda ABC analýzy se v praxi často používá v kombinaci s metodou Slottingu, také známou jako metoda umístění. Metoda Slottingu se používá k optimalizaci uspořádání skladu, kdy jejím cílem je minimalizace skladovacích nákladů a zvýšení produktivity a efektivity skladovacích míst, a to tak, že skladované zboží či materiál budou uskladněny v závislosti na jejich vlastnostech a poptávce zároveň. Vlastnosti a charakter zboží či jiného skladovaného materiálu, které můžeme pomocí metody sledovat jsou například rozměry, hmotnost, velikost objednávek či obrátkovost zásob. Hlavním cílem je minimalizace skladových manipulací a maximalizace využití skladovacího prostoru. [35]

Metoda Slottingu a její problematika v určité podobě bude řešena i v této diplomové práci pomocí metod matematického programování. Matematické programování je soubor principů a metod, pomocí kterých hledáme optimální hodnotu sledovaného kritéria při zachování zvolených vstupních podmínek. Neboli hledáme optimální řešení (nejlepší dosažené řešení) za daných vstupních podmínek. [35]

Výše uvedené příklady optimalizačních problémů a metod ve skladech, jsou jen stručným přehledem toho, s čím se jednotlivé podniky musí každý den potýkat a kde mohou nástroje optimalizace poskytnout výraznou pomoc. Existuje hned několik podob matematického programování, mezi které patří i metody lineárního, nelineárního, dynamického, stochastického či cílového programování, které můžeme pro tyto problémy využít. Každá z těchto metod se liší v závislosti na složitosti problému, parametrech a dostupnosti dat.

Pro tuto diplomovou práci je použita metoda lineárního programování, pomocí které je vytvořen optimalizační model.

### 3.1. Lineární programování

Mezi známé disciplíny operačního výzkumu patří i lineární programování (dále jen LP). LP se zabývá tzv. rozhodovacími problémy a jejich řešením. LP bylo prvně představeno ve 40. letech 20. století matematikem Georgem Dantzigem, který v roce 1947 představil tzv. Simplexovou metodu, která byla navržena pro řešení úloh LP a je základem pro další vývoj optimalizačních algoritmů. [5]

Pojem lineární programování se skládá ze dvou slov. Slovo „*lineární*“ charakterizuje to, že veškeré vazby, které se v modelu nachází jsou lineárními. Jinými slovy všechny funkce, které se v těchto modelech využívají jsou lineární matematické funkce. Kdyby daná lineární struktura v modelech neexistovala, nebylo by možné tak snadno LP aplikovat a řešit.

Druhé slovo „*programování*“ může být v tomto kontextu zavádějící, jelikož nemá, co dočinění s programováním, tak jak ho známe dnes. Naopak je spojeno s vojenským a průmyslovým prostředím, kde termín „program“ označoval činnosti plánování a koordinace činností a zdrojů, aby byly dosaženy jejich cíle co nejefektivněji. LP bylo považováno za přístup, který umožňuje efektivní „programování“ těchto zdrojů. [38]

V lineárních matematických modelech se využívají dva základní druhy veličin:

1. **Proměnné** – představují modelované rozhodnutí, které má být po ukončení optimalizačního výpočtu provedeno.
2. **Konstanty** – představují vstupní údaje, které se v průběhu optimalizačního výpočtu nemění.

Lineární matematický model se skládá ze **dvou základních částí**:

1. optimalizačního kritéria,
2. soustavy omezujících podmínek.

Optimalizační kritérium, které je matematicky interpretováno pomocí kriteriální funkce, je veličinou, která charakterizuje kvalitu získaného přípustného řešení. Lze si jej představit jako určitý parametr jednotlivých úloh a modelů, pomocí kterého hledáme optimální řešení. Cílem řešení je nalezení takových hodnot proměnných, pomocí kterých dosáhneme hledaného extrému (maxima nebo minima), jehož volba závisí na povaze příslušného optimalizačního kritéria. Například při umístění jednotlivých položek do skladovacích prostorů se snažíme najít maximum kriteriální funkce, jelikož chceme umístit co nejvíce položek. Naopak náklady na skladování se snažíme minimalizovat. [2], [3]

Pomocí rovnic a nerovnic definujeme soustavy omezujících podmínek, které vymezují prostor přípustných řešení úlohy. Omezující podmínky ve většině případů vyjadřují proměnou v závislosti na jiných parametrech modelu. Omezující podmínky mohou být dvojího typu. Jedná se o obligatorní podmínky a strukturální podmínky. [2], [3]

Obligatorní podmínky vymezují definiční obory proměnných vystupujících v modelu. Definiční obor se volí podle povahy rozhodnutí modelovaného příslušnou proměnnou. Definiční obory během optimalizačních výpočtů zaručují správnou interpretaci výsledků daného optimalizačního problému. Pro potřeby lineárního matematického modelování se pro proměnné využívají tři základní definiční obory [2], [3]:

- $Z_0^+$  - nezáporná celá čísla
- $R_0^+$  - reálná nezáporná čísla
- $\{0, 1\}$  – binární veličiny

Strukturální podmínky existují dvojího typu. První skupina podmínek zajišťuje dodržení reálných omezení (například nepřekročení kapacity skladu). Druhou skupinou podmínek jsou vazební podmínky, které v modelech vytváří logické vazby mezi hodnotami proměnných z různých skupin. [2], [3]

Mezi povolené matematické operace, které můžeme s proměnnými provádět jsou sčítání, odčítání, násobení a dělení. V modelech lze zároveň využívat relačních znamének a to pouze:  $\leq, \geq, =$ .

#### 4. Charakteristika vybraného optimalizačního problému

Problematika diplomové práce vznikla na základě nutnosti uskladnit prázdné obaly na volných plochách, které jsou vhodné pro jejich skladování. Skladovací plochy jsou určeny čistě pro obalové materiály. Jak bylo zmíněno v úvodu diplomové práce, cílem pro vyřešení optimalizačního problému je využití dvou metod vícekritériální optimalizace, jejichž výsledky budou v závěru zhodnoceny

Specifikem řešeného skladování je skladová plocha umístěná na volném prostranství v areálu zadavatele, což odlišuje tento přístup od optimalizace tradičních konvenčních či automatizovaných skladů. Předmětem skladování jsou obalové materiály určené pro dodávky typu JIT a JIS, které se obvykle neskladují v klasických skladech, ale spíše na volných plochách a prostranstvích v areálech firem. Příklad takového skladování je uveden na Obrázku 11.



Obrázek 11 - Skladování na volné ploše, zdroj: [39]

Skldovací proces probíhá tak, že prázdné JIT nebo JIS jednotky jsou po jejich využití na výrobních linkách konsolidovány na palety a následně manipulovány na vyhrazenou skladovací plochu, kde jsou uskladněny podle jejich obrátkovosti. Dle potřeby jsou jednotky posléze vyzvednuty jejich dodavateli a znovu použity.

V současné době, kdy většina společností čelí nedostatku skladovacích prostor a ploch, je optimalizace skladování i na těchto volných plochách klíčová, a to z toho důvodu, aby bylo možné umístit co nejvíce zboží a zároveň minimalizovat jeho rozptýlení. Další motivací k řešení optimalizace využití ploch může být snížení nákladů (např. za pronájem externích ploch, režijní náklady atd.), zvýšení přesnosti inventarizace, zvýšení efektivity manipulací či vyšší užití ploch nebo skladovacích prostor.



Optimalizace skladování obalového materiálu může být důležitá hned z několika důvodů, které jsou často i jedním z optimalizačních kritérií. Pro případ této diplomové práce jsou zvolena dvě základní kritéria, která budou následně porovnána.

První ze zmíněných kritérií je **počet umístěných druhů obalového materiálu**. Cílem optimalizace je tento počet maximalizovat. Důvodem pro zahrnutí tohoto kritéria do analýzy je již dříve zmíněný nedostatek skladovacích ploch a prostor. V důsledku toho je nezbytné optimalizovat využití dostupné plochy, aby byla co nejefektivněji využita a zajišťovala tak maximální kapacitu pro skladování.

Druhým zkoumaným kritériem je optimalizace **relativní úspory manipulačních procesů**. Toto kritérium je důležité pro snížení manipulačních procesů, zajištění rychlého přístupu k položkám s vysokou obrátkovostí a zlepšení celkové efektivity provozních procesů.

#### 4.1. Metody řešení

K optimalizačnímu výpočtu budou využity hned dvě metody matematické vícekriteriální optimalizace. Jedná se o metody:

1. **Dvoufázové lineární programování (metoda postupné vícekriteriální optimalizace),**
2. **Metoda STEM.**

**Metoda dvoufázového lineárního programování** je jednou z méně náročnějších metod pro řešení komplexních problémů, kdy je potřeba optimalizovat více kritérií současně. Výpočet probíhá tak, že dochází k postupné optimalizaci kritérií. Nejprve dochází k optimalizaci prvního zkoumaného kritéria, s tím, že hodnota druhého kritéria je získána standardním výpočtem, nikoli jako výsledek kriteriální funkce. Následuje výpočet hodnoty druhé kriteriální funkce. Pro obě analyzovaná kritéria je nezbytné hledat identické extrémy funkce, což znamená, že obě kritéria musíme buď maximalizovat nebo minimalizovat. Pro správné vyhodnocení výpočtu je řešitel často donucen k nalezení kompromisu mezi kritérii, který je na jeho uvážení.

**Metoda STEM** (česky známá jako kroková metoda), je interaktivní metoda řešení vícekriteriálních problémů lineárního programování, která spočívá ve střídání dvou základních kroků – **výpočtové** a **rozhodovací fáze**. Jako u metody dvoufázového lineárního programování, tak i pro metodu STEM platí, že je nutné hledat identické extrémy kriteriálních funkcí. [1]

Stejně jako v případě kterékoli optimalizace, tak i v případech metody STEM je první otázkou, zda existuje přípustné řešení, které splňuje zadané podmínky. Na rozdíl od jiných matematických modelů, tak v tomto případě neexistuje jednoznačné řešení, proto hovoříme o tzv. **kompromisní variantě řešení**. [36], [37]

Zároveň pro zajištění tzv. správných výsledků se na STEM kladou určité požadavky. Jedním z požadavků je tzv. **nedominovanost výsledné varianty**. Variantu  $X$  nazýváme nedominovanou v tom okamžiku, kdy neexistuje varianta, která by ji dominovala, tedy varianta  $X$  není dominovaná žádnou jinou variantou. Jinými slovy v množině variant neexistuje jiná lépe hodnocená varianta, která by byla lepší ve všech kritériích. V opačném případě říkáme, že varianta je dominovaná. [36], [37]

Postup optimalizace spočívá v tom, že v průběhu výpočtové fáze řešitel vypočte průběžné řešení, které následně předloží zadavateli. Zadavatel v rozhodovací fázi provede expertní posouzení výsledku z předchozí výpočtové fáze. Na základě expertního posouzení předá řešiteli informaci o tom, které hodnoty mu vyhovují a hodnotu které kritériální funkce je ochoten zhoršit. Zhoršení některých z vyhovujících hodnot kritériálních funkcí je nezbytným krokem pro zlepšení hodnot těch kritérií, které nedosahují požadovaných hodnot zadavatele. [1]

Cílem interakce mezi řešitelem a zadavatelem je nalezení kompromisního řešení, které lépe splňuje požadavky zadavatele, i když to může znamenat snížení hodnoty kritériální funkce. Pokud mu výsledné hodnoty nevyhovují, je třeba definovat kritéria, u nichž lze připustit zhoršení výkonnosti ve prospěch „horších kritérií“.

Počátečním krokem výpočtové části je nalezení ideálních hodnot pro jednotlivé kritériální funkce. Tyto ideální hodnoty jsou získány pomocí jednokritériálního optimalizačního výpočtu (matematického modelu), ve kterém se maximalizuje nebo minimalizuje hodnota pouze jednoho kritéria a tím je získána ideální hodnota daného kritéria. Tento postup se opakuje pro každé kritérium. Je tedy třeba provést tolik výpočtů, kolik je kritérií. Výsledkem výpočtů je matice  $Z$  s hodnotami  $z_{mn}$ , kde  $m \in M$  a  $n \in M$ , kdy množina  $M - |M| = 2$ , představuje množinu kritérií. Hodnoty matice  $Z$  představují hodnotu kritéria  $m \in M$  při maximalizaci kritéria  $n \in M$ . Ideální hodnoty kritériálních funkcí se nachází na hlavní diagonále matice. Ukázka matice  $Z$  pro dvě kritéria dle vztahu (1).

$$z_{mn} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \quad m \in M \quad (1)$$

Pomocí matice  $Z$  jsou následně určeny váhy jednotlivých kritérií dle vzorce (2), přičemž platí podmínka (3). Hodnota  $\bar{z}_m$  představuje hodnotu kritérií nacházejících se na hlavní diagonále a hodnota  $c_{mn}$  představuje hodnotu koeficientů kritériálních funkcí.

$$w_m = \frac{\bar{z}_m - \min_{n \in M} \{z_{mn}\}}{\bar{z}_m} \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{\sum_{n \in M} c_{mn}^2}} \quad m \in M \quad (2)$$

Kde:

$$\sum_{m \in M} w_m = 1 \quad (3)$$

Následujícím krokem první fáze je minimalizace maximální vážené odchylky od ideální varianty (tzn. všechna kritéria nabývají ideálních hodnot). Tyto výsledky jsou posléze předány zadavateli, který provede expertní posouzení a určí, zda je s výsledky kritériálních funkcí spokojen nebo ne. Tato fáze je označována jako rozhodovací fáze, jelikož zadavatel rozhoduje, zda je či není spokojen s výsledky optimalizace. V případě, že není zadavatel spokojen, tak stanoví, o kolik je ochoten hodnotu kritéria zhoršit ( $\Delta f_m$ ) a výpočet poté přechází do druhé fáze. Řešení úlohy je ukončeno, pokud je uživatel spokojen nebo nespokojen se všemi kritérii. [1]

V další fázi výpočtu dochází k úpravě matematického modelu, a to takovým způsobem, aby hodnoty kritériálních funkcí neklesly pod tzv. hodnotu  $q_m$ , kterou lze získat pomocí vztahu (4), který platí pouze pro maximalizační kritéria. Poté se provede přepočtení hodnot vah jednotlivých kritérií, přičemž platí, že pro všechna kritéria, kde  $\Delta f_i > 0$  se upravují podle vztahu (5) a pro ty ostatní kritéria podle vztahu (2) a (3). [1]

$$q_m = f_m - \Delta f_m \quad m \in M \quad (4)$$

$$w_m = 0 \quad m \in M \text{ kde } \Delta f_m > 0 \quad (5)$$

## 5. Návrhová část optimalizace vybraného skladovacího problému

V rámci této kapitoly bude popsána formulace problému, následně bude popsána webová programovací aplikace, která byla využita pro řešení problému v obou metodách. Poté budou popsána vstupní data a představeny modely pro obě sledované metody.

### 5.1. Formulace problému

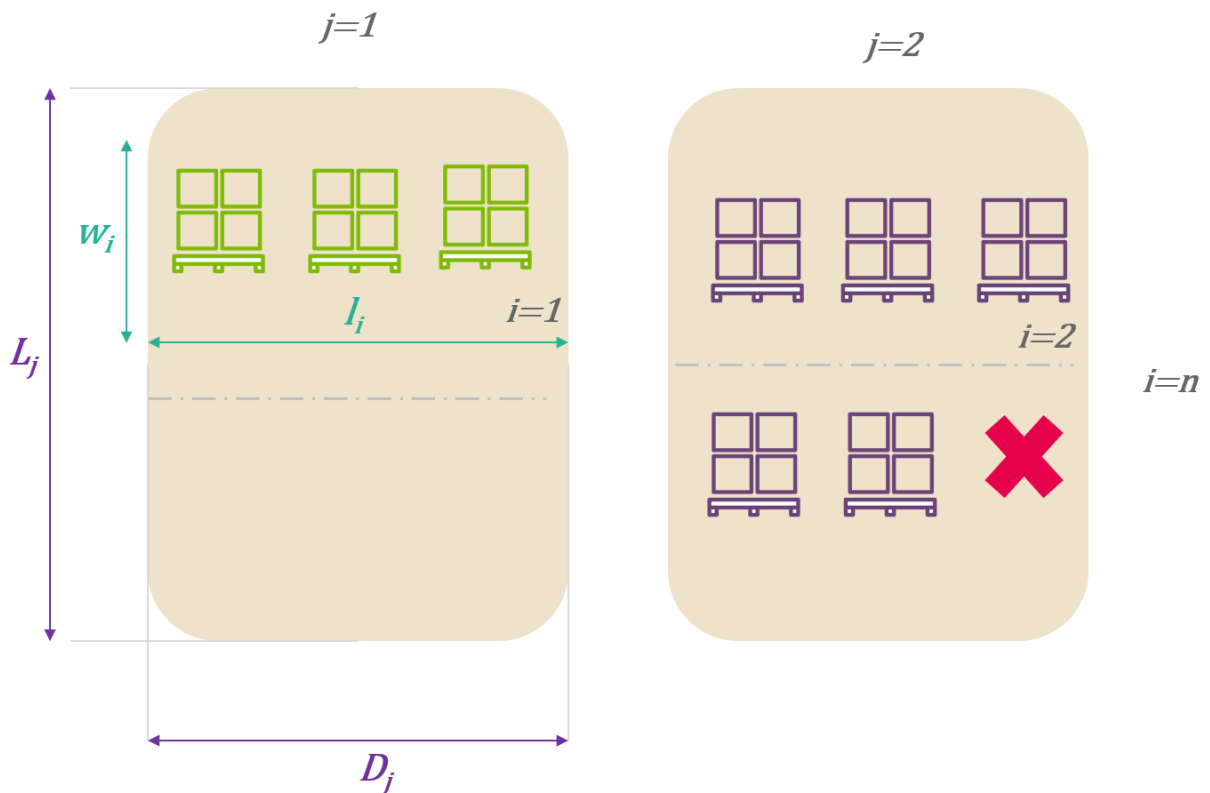
Uvažujme množinu obalů  $I$ , které je třeba uskladnit ve skladovacích zónách množiny  $J$ . Obaly mají předem definovaný způsob uskladnění palet (Obrázek 12). V jedné řadě se smí vyskytovat maximálně jeden typ obalu.

Každý obal má definovanou délku řady  $l_i$ , vyjadřující celkovou délku palet k uskladnění, šířku řady  $w_i$ , a obrátkovost  $o_i$ . Délku řady získáme dle následujícího vzorce:

$$l_i = \frac{\text{počet palet}}{\text{stohovatelnost}} \cdot \text{šířka palety} \quad (6)$$

Každá zóna má definovanou hloubku  $D_j$  a délku  $L_j$ , které vymezují prostor vhodný pro skladování obalů. Dále je definován parametr  $p_j$ , který kvantifikuje přístupnost slotu v rámci skladu. Palety s obaly mohou mít různé rozměry.

Cílem optimalizačního výpočtu u obou metod, je nalezení takového rozmístění obalů v zónách, které zajistí maximální počet uskladněných obalů a zároveň obaly vhodně umístí dle jejich obrátkovosti.



Obrázek 12 - Schéma skladovací plochy, zdroj: [autor]

## 5.2. Optimalizační aplikace Jupyter

Pro optimalizační výpočet u obou případech metod bude využita open-source webová aplikace Jupyter Notebook. Jedná se o velmi interaktivní prostředí, které umožňuje pracovat s kódem a dokumentací v jednom integrovaném rozhraní. Díky tomu lze jednoduše experimentovat s různými přístupy a zároveň dokumentovat svou práci, což na rozdíl od standardní konzole není možné. Kromě standardních programovacích příkazů nástroj také umožňuje vykreslovat grafy, tabulky, obrázky až po vytvoření samotných slajdů prezentace.

Díky tzv. kernelům neboli jádrům, je možné upravovat a spouštět jednotlivé dokumenty notebooku. Standardním programovacím jazykem Jupyteru je Python, ale obsahuje jádra i pro další desítky programovacích jazyků jako jsou například: Julia, R, C++ nebo Java 9. [26]

Samotný název aplikace napovídá, že programovací prostředí graficky připomíná diář (notebook). Do tohoto „diáře“ se zapisuje samotný kód programu, komentáře a je zde vypsán i samotný výsledek modelu (programu) v požadovaném formátu. Ukázka uživatelského prostředí Jupyter Notebook viz Obrázek 13. [26]

```

In [1]: from pulp import *
import pandas as pd
import numpy as np

In [2]: #Vstupní data
obaly_data = pd.read_excel('Data.xlsx', index_col = 0, sheet_name = 0)
sloty_data = pd.read_excel('Data.xlsx', index_col = 0, sheet_name = 1)

In [3]: obaly = obaly_data.index.to_list()
print('obaly =', obaly_data.index.to_list())
obaly = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]

In [4]: sloty = sloty_data.index.to_list()
print('sloty =', sloty_data.index.to_list())
sloty = [7, 6, 5, 4, 3, 2, 1]

In [5]: w = obaly_data['Sirka'].to_dict()
print('w =', obaly_data['Sirka'].to_dict())
w = {1: 1.8, 2: 2.1, 3: 1.8, 4: 1.2, 5: 2.0, 6: 1.9, 7: 1.8, 8: 1.5, 9: 1.21, 10: 1.8, 11: 1.61, 12: 1.61, 13: 2.4, 14: 1.2, 15: 1.205, 16: 1.61, 17: 1.6, 18: 1.6, 19: 1.35, 20: 2.43}

In [6]: o = obaly_data['Obratkovost'].to_dict()
print('o =', obaly_data['Obratkovost'].to_dict())
o = {1: 1, 2: 1, 3: 1, 4: 1, 5: 2, 6: 2, 7: 3, 8: 3, 9: 3, 10: 3, 11: 4, 12: 4, 13: 4, 14: 4, 15: 5, 16: 5, 17: 5, 18: 5, 19: 5, 20: 5}

In [7]: p = sloty_data['Pristup'].to_dict()
print('p =', sloty_data['Pristup'].to_dict())
p = {7: 1, 6: 2, 5: 3, 4: 4, 3: 5, 2: 6, 1: 7}

In [8]: l = obaly_data['Delka'].to_dict()
print('l =', obaly_data['Delka'].to_dict())
l = {1: 98, 2: 74, 3: 108, 4: 333, 5: 74, 6: 58, 7: 57, 8: 72, 9: 144, 10: 59, 11: 53, 12: 8, 13: 72, 14: 216, 15: 175, 16: 42, 17: 107, 18: 88, 19: 77, 20: 64}

In [9]: D = sloty_data['Hloubka'].to_dict()
print('D =', sloty_data['Hloubka'].to_dict())
D = {7: 26, 6: 15, 5: 10, 4: 10, 3: 10, 2: 22, 1: 6}

In [10]: L = sloty_data['Delka'].to_dict()
print('L =', sloty_data['Delka'].to_dict())
L = {7: 58, 6: 6, 5: 6, 4: 29, 3: 10, 2: 55, 1: 7}

In [11]: #Model
#First phase
model = LpProblem("Umístění obalů", LpMaximize)

umistení = [(i,j) for i in obaly for j in sloty]

#Variables used in model
x = LpVariable.dicts('x', (obaly, sloty), lowBound = 0)
y = LpVariable.dicts('y', (obaly, sloty), lowBound = 0, cat = 'Integer')
z = LpVariable.dicts('z', (obaly, sloty), cat = 'Binary')
k = LpVariable.dicts('k', (obaly), cat = 'Binary')

#Objective function 1
#model += 100 * lpSum(k[i] for i in obaly) - lpSum(z[i][j] for (i,j) in umistení

```

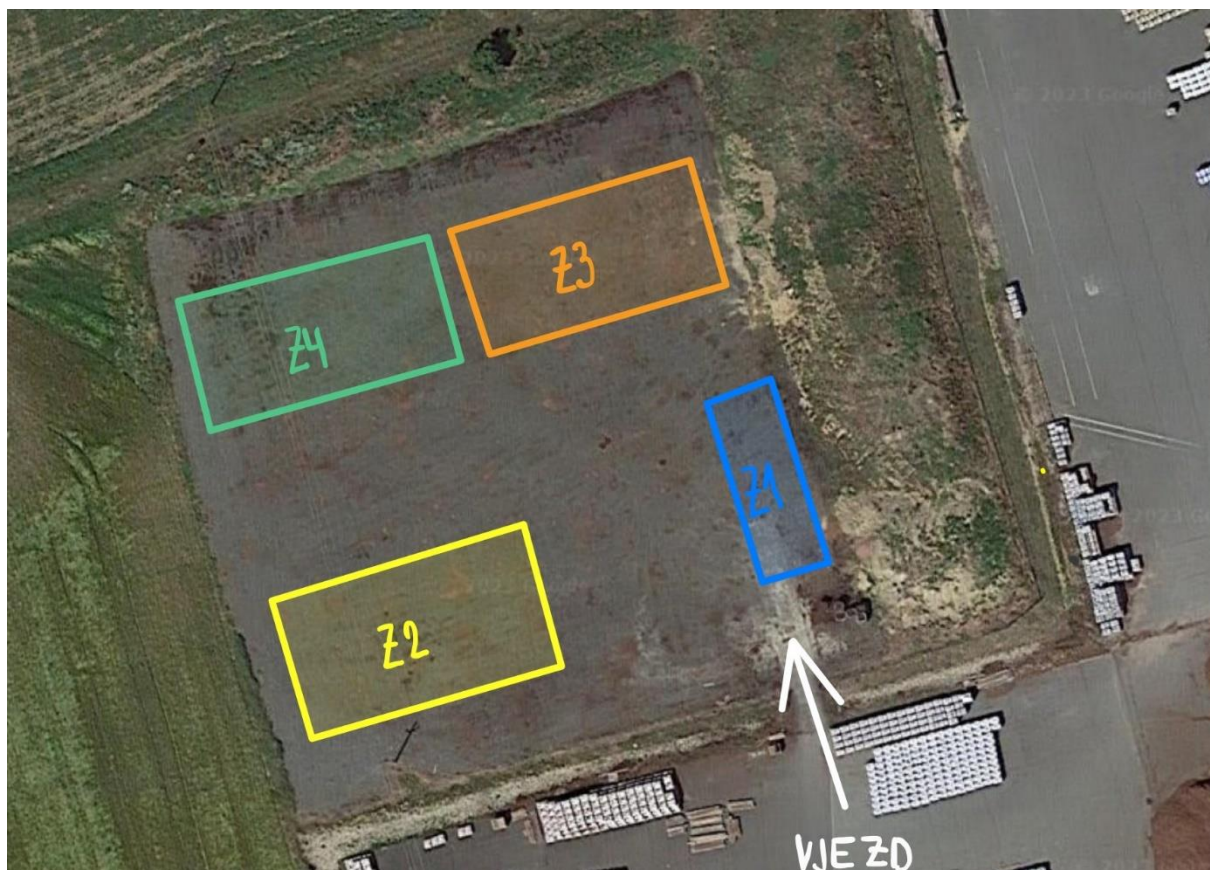
Obrázek 13 - Uživatelské prostředí Jupyter Notebook, zdroj: [autor]

Pro optimalizační výpočty byl využit vysokoúrovňový programovací jazyk Python, který byl navržen tak, aby umožňoval jak výpočty jednoduchých řešení, ale stejně tak i tvorbu rozsáhlých aplikací a programů. To je umožněno zejména díky jeho snadné čitelnosti a jednoduché syntaxi, kterou rychle pochopí i samotní začátečníci.

Python je tzv. interpretovaným jazykem. U interpretovaných jazyků se kód spouští řádek po řádku, za pomoci tzv. interpretu, který řádek přečte a vykoná v reálném čase. Opakem interpretovaných jazyků jsou kompilované jazyky. Součástí Pythonu je i řada modulů a knihoven, které umožňují řešit široké spektrum problémů. Právě díky těmto specializovaným knihovnám, lze využít Python i pro úlohy lineárního programování. Pro výpočet modelů diplomové práce byla využita knihovna PuLP, která obsahuje veškeré nezbytné prvky pro lineární a nelineární optimalizaci. Díky tomuto je lineární programování v prostředí Pythonu velmi jednoduché a není třeba využívat specializovaných softwarů. [26]

### 5.3. Vstupní data

Pro obě metody byla využita data, která jsou poskytnuta anonymním zadavatelem úlohy. První sada dat představuje informace o obalech (ID obalu, obrátkovost, šířka a délka), lze vidět v Tabulce 3. Druhá sada dat představuje informace o skladovacích slotech (ID slotu, délka, hloubka a přístup), lze vidět v Tabulce 4. Ilustrativní příklad toho, jak by mohly takové zóny ve skutečnosti vypadat na Obrázku 14.



Obrázek 14 - Ilustrativní způsob skladování na volné ploše, zdroj: [Google Maps, autor]

Důležité je zmínit, že veškerá poskytnutá data jsou navýšena o 15 % a to hned z několika důvodů. Jedním z nich je nepřesnost manipulačních operací (palety nikdy nebudou umístěny vodorovně), nepřesnost v datech (nepřesnost měření) a také faktor dýchateľnosti skladu (100% utilizace skladové plochy není v praxi žádoucí). Data byla poskytnuta v Excelu, ze kterého jsou načítána do aplikace Jupyter Notebook.

Tabulka 3 – Vstupní data pro obaly, zdroj: [autor]

ID Obalu	Obrátkovost	Šířka [m]	Délka [m]
1	1996	1,200	138
2	1973	1,200	125
3	1877	1,240	122

4	1762	1,200	118
5	1403	1,200	113
6	1325	1,006	112
7	1288	1,600	105
8	1261	1,235	102
9	1163	1,800	97
10	1107	1,400	92
11	1026	1,005	90
12	999	1,205	88
13	924	1,006	67
14	906	1,600	64
15	882	1,600	62
16	707	1,500	60
17	555	1,205	88
18	457	1,205	86
19	397	1,610	58
20	381	1,800	64
21	325	2,100	50
22	297	1,970	46
23	240	1,200	45
24	147	1,000	38
25	135	1,200	32
26	126	1,205	30
27	88	1,200	24
28	79	1,205	23
29	78	1,200	22
30	68	1,610	15
31	55	1,210	12

*Poznámka: Obrátkovost je zde seřazena dle počtu manipulací za sledované období od 1 996 (nejvyšší počet manipulací) až do 55 (nejnižší počet manipulací).*

*Tabulka 4 - Slotová vstupní data, zdroj: [autor]*

ID Zóny	Délka [m]	Hloubka [m]	Přístup
1	4	19	4
2	30	23	3



3	34	23	2
4	30	23	1

Poznámka: Stupnice přístupnosti je zde od 1 (nejhůře přístupný) až do 4 (nejlépe přístupný).

#### 5.4. Matematický model pro dvoufázové lineární programování

Matematický model dvoufázového lineárního programování výpočtu se skládá z postupné optimalizace kritérií, jejichž výsledky jsou zhodnoceny v závěru diplomové práce. První fáze modelu se zaměřuje na maximalizaci počtu umístěných druhů obalového materiálu. Ve druhé fázi je cílem maximalizovat relativní úsporu manipulací při umístění obalů do zón na základě jejich obrátkovosti. Pod pojmem „relativní úspora manipulací“ si lze představit například časovou úsporu, nákladovou úsporu či úsporu pohonných hmot. Pro druhou fázi platí podmínka, že musí být umístěno alespoň 80 % obalů, které byly umístěny v první fázi. [4]

Tato 80% hodnota byla zvolena z důvodu, že obě optimalizační kritéria se vzájemně negativně ovlivňují. Pro efektivní výpočet a zhodnocení výsledků této metody s metodou STEM je nutné nastavit společný rámec pro obě fáze. Tímto nestandardním způsobem se zajistí, že 80 % obalů, které byly umístěny v první fázi, budou umístěny i ve fázi druhé, což umožňuje objektivní zhodnocení obou metod a hodnot. [4]

##### 5.4.1. Seznam množin, vstupních parametrů a proměnných

###### Seznam množin:

$I$  Množina obalů k uskladnění  $i \in I$

$J$  Množina slotů k uskladnění obalů  $j \in J$

###### Seznam vstupních parametrů:

$l_i$  Délka řady obalů  $i \in I$

$w_i$  Šířka řady obalů  $i \in I$

$D_j$  Šířka slotu  $j \in J$  k uskladnění

$L_j$  Délka slotu  $j \in J$  k uskladnění

$o_i$  Obrátkovost obalu  $i \in I$

$p_j$  Přístup slotu  $j \in J$

###### Seznam proměnných:

$x_{ij}$  Proměnná vyjadřující délku uskladněného typu obalu  $i \in I$  ve slotu  $j \in J$

$y_{ij}$  Celočíselná proměnná vyjadřující počet řad obalu  $i \in I$  ve slotu  $j \in J$

$z_{ij}$  Binární proměnná vyjadřující zastoupení obalu  $i \in I$  ve slotu  $j \in J$

$k_i$  Binární proměnná vyjadřující, zda bude obal  $i \in I$  uskladněn

#### 5.4.2. Model

##### První fáze:

Kriteriální funkce pro maximalizaci počtu umístěných obalů:

$$f(k, x, y, z) = \sum_{i \in I} k_i \rightarrow \max \quad (7)$$

Za podmínek:

$$k_i l_i = \sum_{j \in J} x_{ij} \quad i \in I \quad (8)$$

$$\frac{x_{ij}}{D_j} \leq y_{ij} \quad i \in I; j \in J \quad (9)$$

$$\sum_j z_{ij} \leq 1 \quad i \in I \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} y_{ij} w_i \leq L_j \quad j \in J \quad (11)$$

$$x_{ij} \leq M z_{ij} \quad i \in I; j \in J \quad (12)$$

$$y_{ij} \leq M z_{ij} \quad i \in I; j \in J \quad (13)$$

$$z_{ij} \leq M k_i \quad i \in I; j \in J \quad (14)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad i \in I; j \in J \quad (15)$$

$$y_{ij} \in Z_0^+ \quad i \in I; j \in J \quad (16)$$

$$z_{ij} \in \{0; 1\} \quad i \in I; j \in J \quad (17)$$

$$k_i \in \{0; 1\} \quad i \in I \quad (18)$$

Kriteriální funkce (7) reprezentuje maximalizaci optimalizačního kritéria – počtu druhů umístěných obalů. Skupina omezujících podmínek (8) zajistí, že pokud dojde k uskladnění obalu  $i \in I$ , budou uskladněny všechny příslušné palety. Skupina omezujících podmínek (9) definuje proměnnou  $y_{ij}$  a zároveň vytváří vazbu na proměnnou  $x_{ij}$ . Skupina omezujících podmínek (10) zajistí, že jeden druh obalu bude umístěn maximálně v jedné zóně. Skupina omezujících podmínek (11) zajistí nepřekročení prostoru dostupného ke skladování. Skupina omezujících podmínek (12), (13), (14) vytváří vazby mezi proměnnými modelu. Skupiny omezujících podmínek (15), (16), (17) a (18) určují definiční obory proměnných v modelu.

#### Druhá fáze:

V druhé fázi výpočtu dochází dle kriteriální funkce (19) k maximalizaci relativní úspory manipulací z důvodu umístění obalů do jednotlivých slotů dle jejich obrátkovosti. Zároveň oproti první výpočtové fázi zde přibyla podmínka (20) pro umístění alespoň 80 % obalů umístěných v první výpočtové fázi. Ve druhé fázi je tedy nově zavedena konstanta  $S$ , která nabývá hodnoty součtu umístěných druhů obalů z první výpočtové fáze, tedy  $S = \sum_{i \in I} k_i$ . Zbylé podmínky zůstávají zachovány.

Kriteriální funkce pro maximalizaci relativní úspory:

$$f(k, x, y, z) = \sum_i \sum_j z_{ij} o_i p_j \rightarrow \max \quad (19)$$

Za podmínek:

$$\sum_i k_i \geq 0,8 \cdot S \quad (20)$$

(8)-(18)

## 5.5. Matematický model pro metodu STEM

Matematický model metody STEM se skládá ze dvou fází – výpočtové a rozhodovací. Kriteriaální funkce (7), (19) zůstávají stejné jako v případě metody dvoufázového LP. Model metody STEM se liší pouze v absenci konstanty  $S$  a s ní související podmínkou (20), které jsou pro tento typ metody nežádoucí. Ve výpočtové fázi dojde k prvotnímu výpočtu kriteriaálních funkcí a ve fázi rozhodovací dojde k expertnímu posouzení zadavatelem, který určí následující kroky.

### 5.5.1. Seznam vstupních množin, vstupních parametrů a proměnných

Metoda STEM využívá stejné skupiny vstupních množin, vstupních parametrů a proměnných jako dvoufázová metoda. Nicméně, metoda STEM zavádí také novou množinu  $-M$ , kde  $|M| = 2$ , spolu s novou proměnnou  $d$ . Množina  $M$  a proměnná  $d$  slouží k transformaci modelu do pravidel metody STEM.

#### Seznam množin:

$M$  Množina kritérií  $m \in M$

#### Seznam proměnných:

$d$  Proměnná vyjadřující maximální váženou odchylku od ideálních hodnot

### 5.5.2. Model pro výpočetní část první fáze

Kriteriaální funkce pro maximalizaci počtu umístěných obalů:

$$f(k, x, y, z) = \sum_i k_i \rightarrow \max \quad (7)$$

Kriteriaální funkce pro maximalizaci relativní úspory:

$$f(k, x, y, z) = \sum_i \sum_j z_{ij} o_i p_j \rightarrow \max \quad (19)$$

Za podmínek:

(8) - (18)

**Výpočet vah:**

(2) - (3)

**Matematický model pro minimalizaci maximální vážené odchylky od ideální hodnoty:**

Kriteriální funkce:

$$d \rightarrow \min \quad (20)$$

Za podmínek:

$$d \geq w_1(\bar{z}_1 - \sum_{i \in I} k_i) \quad (21)$$

$$d \geq w_2(\bar{z}_2 - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} z_{ij} o_i p_j) \quad (22)$$

(8) - (18)

Rozhodovací část první fáze:

(4) - (5)

### 5.5.3. Model pro výpočetní část druhé fáze

Po získání preferencí zadavatele dojde k úpravě hodnot vah kriteriálních funkcí. Váhy kritérií, se kterými je zadavatelem spokojen budou nabývat hodnoty 0 dle vztahu (5), pro ostatní váhy platí vztahy (2) a (3). V druhé výpočetní fázi je zároveň důležité zajistit, aby hodnoty kriteriálních funkcí neklesly pod hodnoty  $q_m$ , které lze získat dle vztahu (4). Tato sada omezení

zajistí ve výpočtu, aby hodnoty kritériálních funkcí neklesly pod maximální možnou hodnotu, která je určena zadavatelem.

**Matematický model pro minimalizaci maximální vážené odchylky od ideální hodnoty:**

Kritériální funkce:

$$d \rightarrow \min \quad (20)$$

Za podmínek

$$d \geq w_1(\bar{z}_1 - \sum_{i \in I} k_i) \quad (21)$$

$$d \geq w_1(\bar{z}_1 - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} z_{ij} o_i p_j) \quad (22)$$

$$\sum_{i \in I} k_i \geq q_m \quad \text{pro } m, \text{ kde } \Delta f_m > 0 \quad (23)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} z_{ij} o_i p_j \geq q_m \quad \text{pro } m, \text{ kde } \Delta f_m > 0 \quad (24)$$

(8) - (18)

## 6. Výpočetní experiment

Tato kapitola je věnována výsledkům výpočetního experimentu pro obě sledované metody.

### 6.1. Výsledky dvoufázového lineárního programování

Model a výpočet dvoufázového lineárního programování byl vytvořen Ing. Karlem Ječmenem. Poskytnuté výsledky pro obě kritériální funkce výpočtu lze vidět v Tabulce 5.

Tabulka 5 - Výsledky dvoufázové metody, zdroj: [autor]

Kritérium	Výsledná hodnota
Počet umístěných druhů obalového materiálu	<b>25 obalů</b> (Relativní úspora manipulací v této fázi činila <b>30 422</b> ).
Relativní úspora manipulací	<b>44 754</b> (Počet umístěných obalů v této fázi činil <b>19 obalů</b> .)

### 6.2. Výsledky metody STEM

#### Výpočetní část první fáze:

Prvním krokem řešitelské fáze je nalezení ideálních hodnot sledovaných kritériálních funkcí. Výsledkem optimalizačních výpočtů je matice kritériálních funkcí  $z_{mn}$ , která nabyla následujících hodnot:

$$z_{mn} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25 & 19 \\ 28\ 311 & 44\ 856 \end{bmatrix}$$

*Poznámka: hodnota  $z_{11}$  reprezentuje hodnotu prvního kritéria při maximalizaci prvního kritéria a hodnota  $z_{12}$  reprezentuje hodnotu prvního kritéria při maximalizaci druhého kritéria.*

Informace o druzích obalů umístěných v jednotlivých zónách v závislosti na optimalizované kritériální funkci jsou zobrazeny na Obrázku 15, na Obrázku 16 a na Obrázku 17. Analýza vstupních hodnot a výsledná schémata ukazují, že software při optimalizaci první kritériální funkce umístil obaly podle jejich deklarovaných rozměrů. V případě optimalizace druhé kritériální funkce se software zaměřuje na umístění obalů dle počtu manipulací za sledované období, tím pádem se software snažil umístit obaly nejvyšší s hodnotou manipulací.

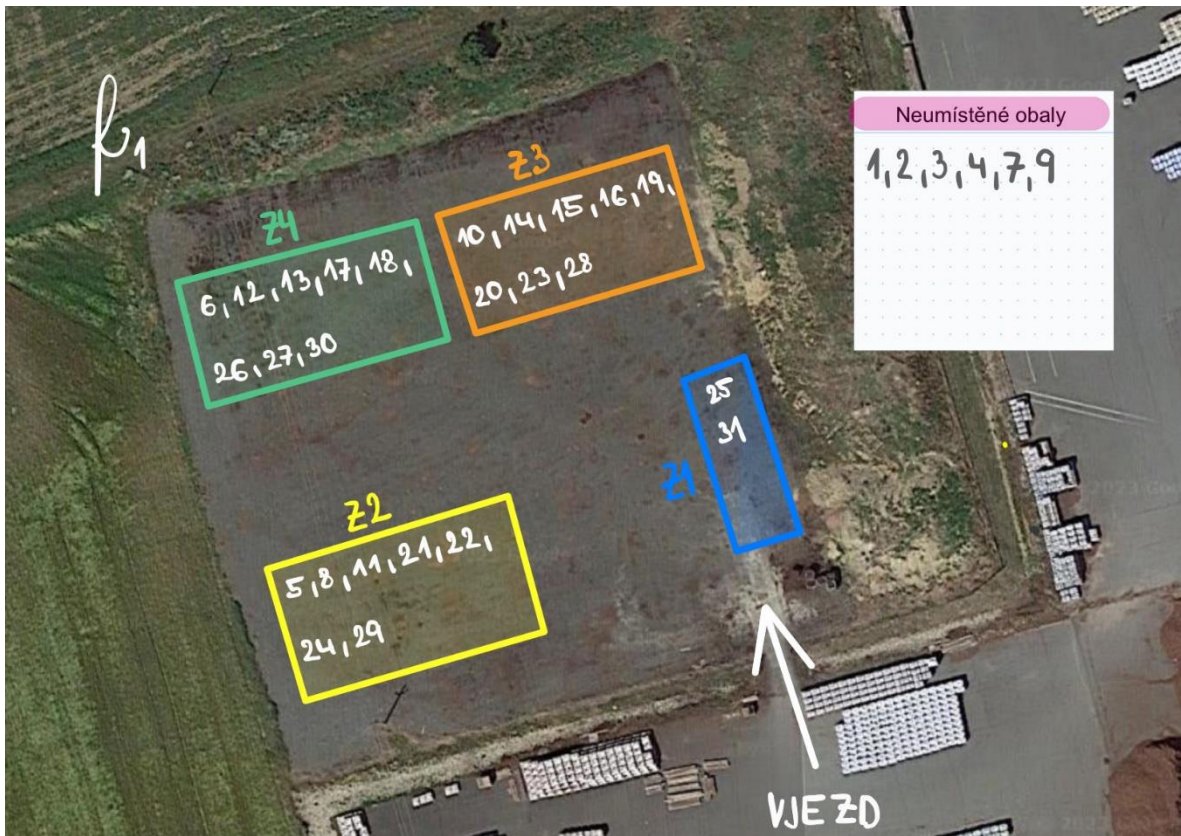
ID obalu	Model ideálních hodnot kritériálních funkcí	
	$f_1$	$f_2$
1	Neumístěný obal	Zóna 2
2	Neumístěný obal	Zóna 2
3	Neumístěný obal	Zóna 2
4	Neumístěný obal	Zóna 4
5	Zóna 2	Zóna 4
6	Zóna 4	Zóna 2
7	Neumístěný obal	Zóna 4
8	Zóna 2	Zóna 3
9	Neumístěný obal	Neumístěný obal
10	Zóna 3	Zóna 3
11	Zóna 2	Zóna 3
12	Zóna 4	Zóna 3
13	Zóna 4	Zóna 2
14	Zóna 3	Zóna 4
15	Zóna 3	Zóna 4
16	Zóna 3	Zóna 4
17	Zóna 4	Zóna 4
18	Zóna 4	Neumístěný obal
19	Zóna 3	Neumístěný obal
20	Zóna 3	Neumístěný obal
21	Zóna 2	Neumístěný obal
22	Zóna 2	Neumístěný obal
23	Zóna 3	Zóna 1
24	Zóna 2	Neumístěný obal
25	Zóna 1	Neumístěný obal
26	Zóna 4	Neumístěný obal
27	Zóna 4	Neumístěný obal
28	Zóna 3	Zóna 4
29	Zóna 2	Zóna 4
30	Zóna 4	Neumístěný obal
31	Zóna 1	Neumístěný obal

**Legenda:**

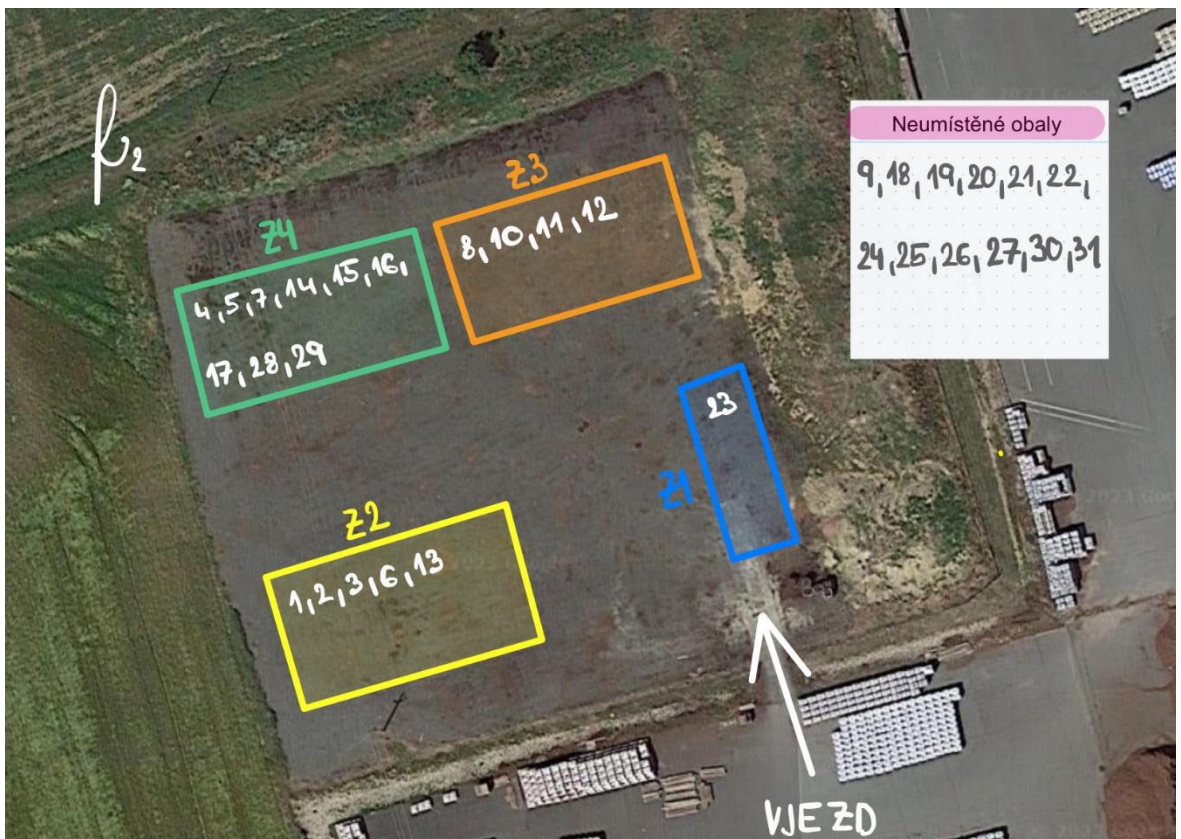
- Zóna 1
- Zóna 2
- Zóna 3
- Zóna 4
- Neumístěný obal

Obrázek 15 - Schéma umístěných druhů obalů při nalezení ideálních hodnot kritériálních funkcí, zdroj: [autor]





Obrázek 16 - Schéma umístění obalů pro první kritériální funkci, zdroj: [autor]



Obrázek 17 - Schéma umístění obalů pro druhou kritériální funkci, zdroj: [autor]

Na základě hodnot matice  $z_{mn}$  a hodnot matice koeficientů kriteriálních funkcí  $c_{mn}$  dochází k výpočtu váhy pro další výpočetní kroky dle vztahu (2). Výsledky hodnot vah pro jednotlivé kriteriální funkce jsou následující:

$$w_1 = \frac{25 - 19}{19} \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{31}} = \frac{6\alpha\sqrt{31}}{775}$$

$$w_2 = \frac{44\,856 - 28\,311}{44\,856} \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{906\,396\,090}} = \frac{1\,103\alpha\sqrt{101\,041\,010}}{906\,459\,108\,912}$$

Hodnotu  $\alpha$  lze pak dopočítat pomocí (3):

$$\frac{6\alpha\sqrt{31}}{775} + \frac{1\,103\alpha\sqrt{101\,041\,010}}{906\,459\,108\,912} = 1$$

Tedy:

$$w_1 \cong 0,9998$$

$$w_2 \cong 0,0002$$

Dalším krokem výpočtu je minimalizace maximální vážené odchylky, a to pro kriteriální funkci dle vztahu (20) a za podmínek (8) - (18) a (21) - (22). Výsledky optimalizačního výpočtu první fáze v Tabulce 6.

Tabulka 6 - Výsledky první výpočtové fáze, zdroj: [autor]

První výpočtová fáze	
Vážená odchylka $d$	0,9998
Hodnota první kriteriální funkce $f_1$	24
Hodnota druhé kriteriální funkce $f_2$	39 937

V případě, že výsledky uvedené v Tabulce 6 porovnáme s ideálními hodnotami kriteriálních funkcí v Tabulce 7, lze vidět, že u obou hodnot kriteriálních funkcí došlo ke snížení.

Tabulka 7 - Porovnání výsledných hodnot po první výpočtové fázi s hodnotami ideálními, zdroj: [autor]

První výpočtová fáze		
	Ideální hodnoty kriteriálních funkcí	Výsledky první výpočtové fáze
Hodnota první kriteriální funkce $f_1$	25	24

<b>Hodnota druhé kriteriální funkce <math>f_2</math></b>	44 856	39 937
--	--------	--------

Schématické zobrazení umístěných obalů v první výpočtové fázi Obrázek 18 a Obrázek 19.

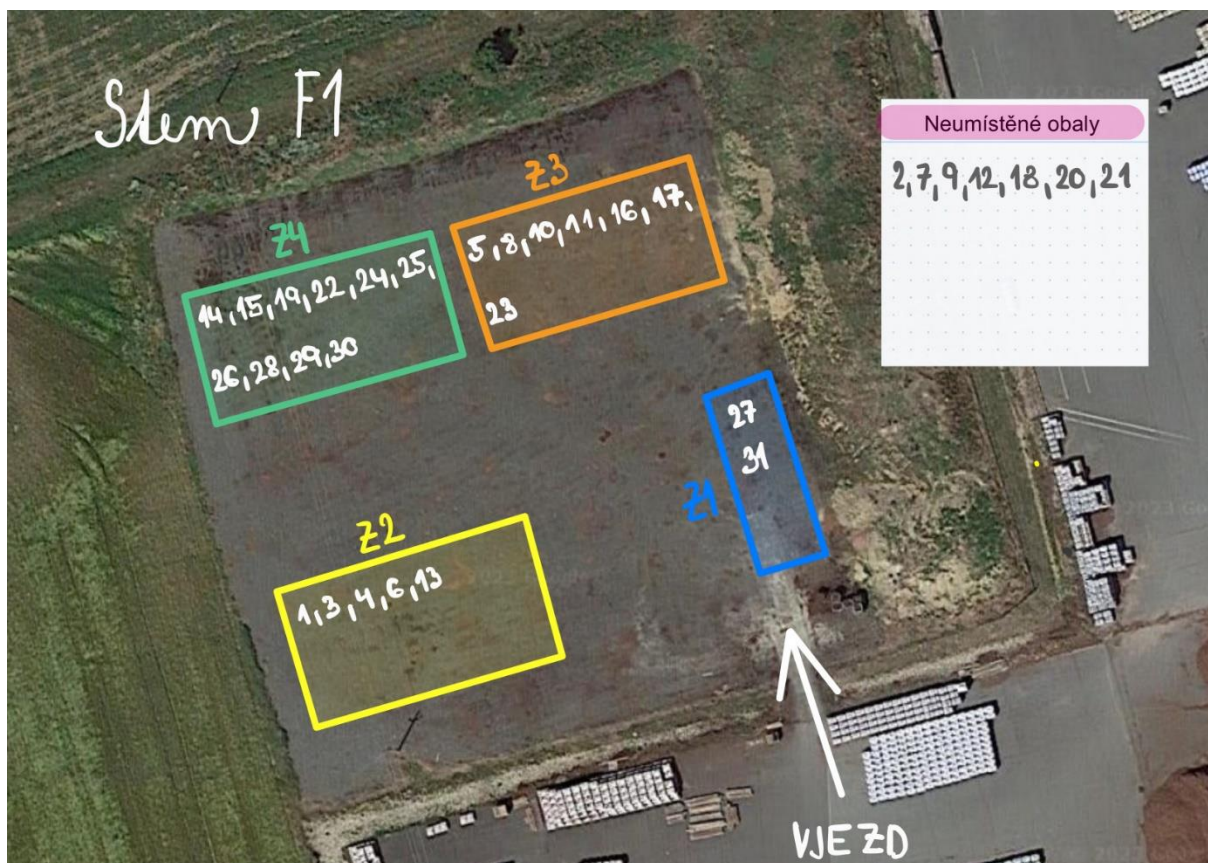
ID obalu	Rozmístění druhů obalů po první výpočtové fázi
1	Zóna 2
2	Neumístěný obal
3	Zóna 2
4	Zóna 2
5	Zóna 3
6	Zóna 2
7	Neumístěný obal
8	Zóna 3
9	Neumístěný obal
10	Zóna 3
11	Zóna 3
12	Neumístěný obal
13	Zóna 2
14	Zóna 4
15	Zóna 4
16	Zóna 3
17	Zóna 3
18	Neumístěný obal
19	Zóna 4
20	Neumístěný obal
21	Neumístěný obal
22	Zóna 4
23	Zóna 3
24	Zóna 4
25	Zóna 4
26	Zóna 4
27	Zóna 1
28	Zóna 4
29	Zóna 4
30	Zóna 4
31	Zóna 1

**Legenda:**

- Zóna 1
- Zóna 2
- Zóna 3
- Zóna 4
- Neumístěný obal

Obrázek 18 - Schéma umístěných druhů obalů po první výpočtové fázi, zdroj: [autor]





Obrázek 19 - Schéma umístění obalů po první výpočtové fázi, zdroj: [autor]

Lze tedy shrnout že po provedení optimalizačního výpočtu byla hodnota vážené odchylky stanovena na  $d \cong 0.9988$ . Hodnoty kritériálních hodnot nabývaly hodnot  $f_1 = 24$  a  $f_2 = 39\,937$ . Tyto výsledky byly předloženy zadavateli.

#### Rozhodovací část první fáze:

Zadavatel provedl expertní posouzení výsledků první výpočetní fáze a stanoví, že s hodnotou první kritériální funkce je spokojen. Zároveň umožnil její snížení, tj. snížení počtu umístěných druhů obalů, o  $\Delta f_2 = 2$ , za účelem získání vyšší relativní úspory manipulací. S hodnotou druhé kritériální funkce je zadavatel spokojen, ale stanovil, že hodnota relativní úspory manipulací by neměla klesnout pod hodnotu 42 000. Model přechází do druhé výpočtové fáze.

#### Výpočetní část druhé fáze:

Nejprve je nutné dle vztahu (4) určit hodnotu  $q_m$ , neboli hodnotu, pod kterou nesmí hodnoty kritériálních funkcí klesnout. Tato hodnota je určena pouze pro ty kritériální funkce, pro které platí, že  $\Delta f_i > 0$ . V případě tohoto modelu a výpočtu se jedná o kritériální funkci  $f_1$ .

$$q_1 = 24 - 2 = 22$$

Váhy kriteriálních funkcí budou nyní nabývat 0 (dle vztahu (5)) pro ty kriteriální funkce, s nimiž je zadavatel spokojen ( $w_1$ ). V tomto případě zbývá určit hodnotu váhy pro druhou kriteriální funkci, a to dle vztahů (3) a (4).

Tedy:

$$w_1 = 0$$

$$w_2 = 1$$

Následuje softwarový výpočet modelu pro minimalizaci maximální vážené odchylky dle vztahu (20) pro kriteriální funkci a za podmínek (21) - (24).

Tabulka 8 - Výsledky druhé výpočtové fáze, zdroj: [autor]

Druhá výpočtová fáze	
Vážená odchylka $d$	635
Hodnota první kriteriální funkce $f_1$	22
Hodnota druhé kriteriální funkce $f_2$	44 221

Z výsledků druhé výpočtové fáze v Tabulce 8 je zřejmé, že oba požadavky zadavatele byly splněny. Hodnota první kriteriální funkce  $f_1$  neklesla pod hodnotu 22. Hodnota druhé kriteriální funkce  $f_2$  je vyšší o 2 221, než byla požadovaná hodnota 42 000.

V případě, že výsledky uvedené v Tabulce 8 porovnáme s ideálními hodnotami kriteriálních funkcí v Tabulce 7, lze vidět, že u obou hodnot kriteriálních funkcí došlo ke snížení (Tabulka 9).

Tabulka 9 - Porovnání výsledných hodnot po druhé výpočtové fázi s hodnotami ideálními, zdroj: [autor]

Druhá výpočtová fáze		
	Ideální hodnoty kriteriálních funkcí	Výsledky druhé výpočtové fáze
Hodnota první kriteriální funkce $f_1$	25	22
Hodnota druhé kriteriální funkce $f_2$	44 856	44 221

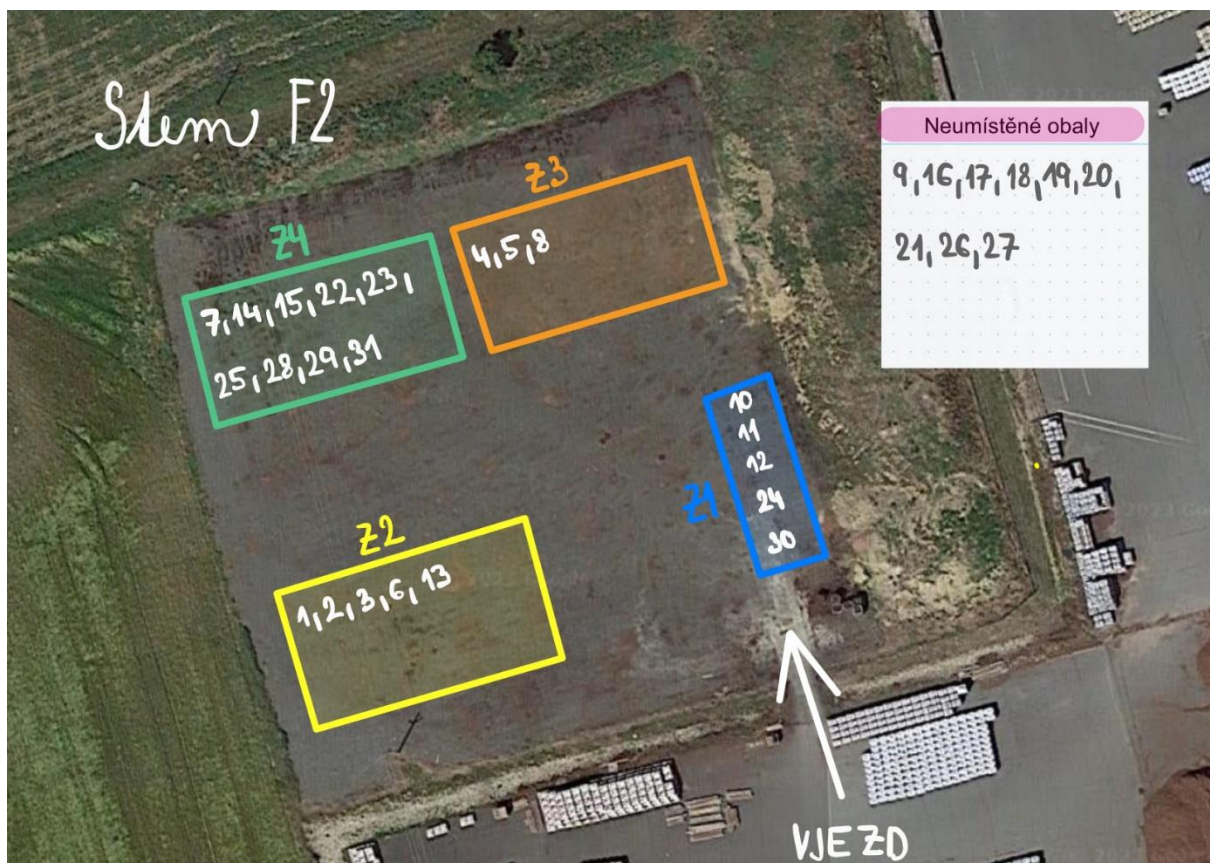
Schématické zobrazení umístěných obalů v první výpočtové fázi na Obrázku 20 a Obrázku 21.

ID obalu	Rozmístění druhů obalů po druhé výpočtové fázi
1	Zóna 2
2	Zóna 2
3	Zóna 2
4	Zóna 3
5	Zóna 3
6	Zóna 2
7	Zóna 4
8	Zóna 3
9	Neumístěný obal
10	Zóna 1
11	Zóna 1
12	Zóna 1
13	Zóna 2
14	Zóna 4
15	Zóna 4
16	Neumístěný obal
17	Neumístěný obal
18	Neumístěný obal
19	Neumístěný obal
20	Neumístěný obal
21	Neumístěný obal
22	Zóna 4
23	Zóna 4
24	Zóna 1
25	Zóna 4
26	Neumístěný obal
27	Neumístěný obal
28	Zóna 4
29	Zóna 4
30	Zóna 1
31	Zóna 4

**Legenda:**

- Zóna 1
- Zóna 2
- Zóna 3
- Zóna 4
- Neumístěný obal

Obrázek 20 - Schéma umístěných druhů obalů po druhé výpočtové fázi, zdroj: [autor]



Obrázek 21 - Schéma umístění obalů po druhé výpočtové fázi, zdroj: [autor]

### Rozhodovací část druhé výpočetní fáze:

Výsledky druhé výpočetní fáze byly předloženy zadavateli. Zadavatel je nyní spokojen se všemi hodnotami kriteriálních funkcí. Dosažené řešení je tedy možné považovat za kompromisní nedominované. Přehled výsledků první a druhé výpočtové fáze Tabulka 10.

Je třeba zdůraznit, že i přes neumístění ideální hodnoty počtu druhu obalů, se hodnota relativní úspory manipulací blíží k ideální hodnotě s 1,6 % odchylkou, což v případě, kdy zadavatel sleduje hodnoty manipulací, lze považovat za kvalitní řešení.

Tabulka 10 - Dosažené výsledky metody STEM, zdroj: [autor]

<b>Výsledky metody STEM</b>			
	<b>Ideální hodnoty kriteriálních funkcí</b>	<b>Výsledky první výpočtové fáze</b>	<b>Výsledky druhé výpočtové fáze</b>
<b>Hodnota první kriteriální funkce</b> $f_1$	<b>25</b>	24	22
<b>Hodnota druhé kriteriální funkce</b> $f_2$	<b>44 856</b>	39 937	44 221

#### 6.2.1. Zdrojový kód Pythonu pro metodu STEM

Zdrojové kódy využitě pro softwarový výpočet jednotlivých fází metody STEM jsou k nalezení v Příloze 1 diplomové práce.



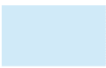




## 7. Zhodnocení dosažených výsledků

Po provedení optimalizačního výpočtu pro model dvoufázového lineárního programování a po provedení výpočtů pro modely metody STEM byly dosaženy výsledky (Tabulka 11).

Tabulka 11 - Výsledky výpočetního experiment, zdroj: [autor]

	Dvoufázová metoda lineárního programování	Metoda STEM	
		První výpočtová fáze	Druhá výpočtová fáze
	-		
Hodnota první kriteriální funkce $f_1$	<b>25 obalů</b> (Relativní úspora manipulací v této fázi činila <b>30 422</b> ).	24	22
Hodnota druhé kriteriální funkce $f_2$	<b>44 754</b> (Počet umístěných obalů v této fázi činil <b>19 obalů</b> .)	39 937	44 221

Schématické porovnání výsledků jednotlivých metod viz Obrázek 23 a legenda viz Obrázek 22.

Legenda:			
	Zóna 1		Zóna 4
	Zóna 2		Neumístěný obal
	Zóna 3		

Obrázek 22 - Legenda k Obrázku 23, zdroj: [autor]

ID obalu	Model ideálních hodnot kriteriálních funkcí		Rozmístění druhů obalů po první výpočtové fázi STEM	Rozmístění druhů obalů po druhé výpočtové fázi STEM
	$f_1$	$f_2$		
1	pink	yellow	yellow	yellow
2	pink	yellow	pink	yellow
3	pink	yellow	yellow	yellow
4	pink	green	yellow	orange
5	yellow	green	orange	orange
6	green	yellow	yellow	yellow
7	pink	green	pink	green
8	yellow	orange	orange	orange
9	pink	pink	pink	pink
10	orange	orange	orange	light blue
11	yellow	orange	orange	light blue
12	green	orange	pink	light blue
13	green	yellow	yellow	yellow
14	orange	green	green	green
15	orange	green	green	green
16	orange	green	orange	pink
17	green	green	orange	pink
18	green	pink	pink	pink
19	orange	pink	green	pink
20	orange	pink	pink	pink
21	yellow	pink	pink	pink
22	yellow	pink	green	green
23	orange	light blue	orange	green
24	yellow	pink	green	light blue
25	light blue	pink	green	green
26	green	pink	green	pink
27	green	pink	light blue	pink
28	orange	green	green	green
29	yellow	green	green	green
30	green	pink	green	light blue
31	light blue	pink	light blue	green

Obrázek 23 - Schématické zobrazení výsledků umístění druhů obalů pro obě metody, zdroj: [autor]

Hlavním cílem diplomové práce je optimalizace skladování obalového materiálu pomocí metody dvoufázového lineárního programování a metody STEM. Výsledkem nemá být samotná komparativní analýza jednotlivých metod, ale ozřejmění rozdílů jejich optimalizačního přístupu a přínosů odlišného přístupu u metody STEM.

Pokud se zaměříme na výsledky (Tabulka 11) dosažené metodou dvoufázového lineárního programování, vidíme, že při optimalizaci druhého kritéria je hodnota relativní úspory manipulací 44 754 a počet umístěných druhů obalů je 19. Oproti tomu v druhé výpočtové (výsledné) fázi STEMu se relativní úspora manipulací téměř shoduje s výsledky dvoufázové metody, avšak počet umístěných druhů obalů se zvýšil o 3. To představuje významnou úsporu i při zachování podobných hodnot relativní úspory manipulací.

Tento příklad jasně ilustruje přínosy zapojení zadavatele do řešení. Tradiční dvoufázové lineární programování je z hlediska výpočtové náročnosti rychlejší, její výsledky ovšem naznačují, že řešitel vykonává optimalizační výpočet na základě poskytnutých hrubých dat, které často nezahrnují informace o skutečných procesech, omezeních a aktuálních prioritách. Řešitel poté předá výsledky zadavateli a jeho úloha v procesu končí. Naopak při použití metody STEM řešitel předloží výsledky zadavateli s praktickými zkušenostmi a znalostí aktuálních potřeb, které se často mohou lišit od potřeb v době exportu vstupních dat. Zadavatel expertně posoudí, zda je či není s výsledky spokojen. Na základě toho pak určí další směřování výpočtu. V provedeném výpočetním experimentu se jednalo pouze o dvě fáze metody STEM, ale výpočet může pokračovat i do dalších fází až do plné spokojenosti zadavatele. Možná je i varianta, kdy zadavatel bude zcela spokojen nebo nespokojen se všemi hodnotami kritériálních funkcí již po první výpočetní fázi, pak může být výpočet ukončen ihned.

V našem konkrétním případě jsme se soustředili na zvýšení hodnoty relativní úspory manipulací na úkor počtu umístěných obalů, neboť pro zadavatele má tato hodnota větší přínos (například úsporu manipulačních nákladů, energetickou úsporu či efektivnější využití manipulační techniky a dalších zdrojů).

Dalším praktickým příkladem obdobného optimalizačního problému je situace, kdy zadavatel chce využít služeb externího skladování neboli fulfillmentu. Náklady na externí skladování se odvíjí primárně od počtu skladovaných jednotek a denního počtu manipulací. V případě, že využijeme obdobného postupu, jsme schopni lépe sledovat hodnoty obou těchto kritérií, tím následně i lépe určit finální hodnotu, jež by mohla mít zajímavý vliv na výsledné náklady.

Na základě provedeného experimentu a jeho výsledných hodnot se při použití uvedených vstupních dat a podmínek jeví metoda STEM jako vhodnější metoda pro optimalizaci skladování obalového materiálu. Výsledky ukázaly na její hlavní přidanou hodnotu v podobě zadavatele, což dokazuje její efektivitu a skutečný, nikoli pouze teoretický přínos v praxi.

## Závěr

Diplomová práce se zabývala „*Optimalizací skladování obalového materiálu*“. Skladování je proces, který je neoddělitelnou součástí logistického řetězce, má tedy zásadní dopad na účinnost a finanční výsledky podniku. Význam skladování je často podceňován a při nesprávném řízení může znamenat značné náklady a sníženou efektivitu celého procesu.

Optimalizace skladování je bezesporu složitá úloha, která vyžaduje komplexní přístup a aplikaci různých metod a přístupů. Hlavní ambicí diplomové práce byla aplikace dvou odlišných metod pro řešení vícekriteriální optimalizace na popsany specifický problém skladování. Práce spočívala v návrhu a aplikaci modelů těchto metod, ve kterých byly za daných podmínek sledovány počty umisťovaných obalů a relativní úspora z manipulací. Účelem bylo provést výpočet a zhodnotit výsledky těchto dvou rozdílných přístupů. Práce se zaměřila na identifikaci klíčového rozdílu mezi těmito dvěma metodami, který spočíval v roli zadavatele v průběhu řešení.

Diplomová práce byla strukturovaná do dvou hlavních částí: teoretické a praktické (návrhové). První kapitola se věnovala popisu a definování problematiky skladování a skladů, zahrnovala historický vývoj, přehled funkcí skladů a skladování či přehled jejich druhů.

Druhá kapitola byla zaměřena na obaly a manipulační jednotky, které byly definovány, legislativně rozděleny podle funkcí a také byly prezentovány různé druhy manipulačních jednotek.

Třetí kapitola se věnovala základnímu popisu procesu optimalizace a lineárního programování, které bylo využito pro formulaci a výpočet vybraného skladovacího problému. Všechny tyto tři kapitoly sloužily k pochopení a definování všech souvislostí, ze kterých vychází pravidla pro tvorbu modelu v praktické části.

Praktická část byla zahájena ve čtvrté kapitole, která se zabývala konkrétním popisem vybraného skladovacího problému. Je nutno poznamenat, že se nejednalo o standardní paletový nebo regálový skladovací problém, ale o skladování na volné ploše v rámci výrobního závodu. V této kapitole byla rovněž podrobně popsána dvoufázová metoda lineárního programování a metoda STEM. Hlavním a několikrát zmíněným rozdílem mezi zkoumanými metodami vícekriteriální optimalizace je úloha zadavatele v procesu a jeho vliv na výsledky řešení.

Pátá kapitola práce se zaměřila na formulaci problému, který je pro obě využití metody totožný. Následně byla popsána optimalizační aplikace, jež byla využita pro výpočet obou metod a také byla popsána poskytnutá vstupní data. Poté byly popsány jednotlivé matematické modely, ve kterých se projevuje rozdíl mezi metodami a jejich výpočetními postupy. Výpočetní

rozdíly jsou patrné zejména u metody STEM, která z jednokriteriální analýzy získává vstupní parametry pro výpočet vah. Na základě těchto vah pak dochází k minimalizaci maximální vážené odchylky. Při výpočtu získáváme nové hodnoty sledovaných kritérií, které porovnáme s ideálními hodnotami získanými při jednokriteriálním výpočtu. V této fázi výpočtu vstupuje do procesu zadavatel, který může výsledky ovlivnit několika způsoby. Zadavatel může být se všemi výsledky spokojen nebo nespokojen a výpočet tak ihned ukončit. Další možností je, že zadavatel bude spokojen pouze s určitými hodnotami kritériálních funkcí, jejichž hodnoty na úkor těch, se kterými není spokojen, sníží. V tom případě výpočet pokračuje

V šesté kapitole byl proveden experiment v podobě optimalizačního výpočtu pomocí webové aplikace Jupyter. Pro obě metody byla sledována dvě kritéria – počet umístěných druhů obalů a relativní úspora manipulací. Jednotlivé výsledky byly zobrazeny jak výpočetně, tak graficky.

Sedmá kapitola přináší detailní zhodnocení výsledků získaných z jednotlivých optimalizačních výpočtů. Z dosažených výsledků je jasně patrné, že hlavní sledovaný cíl této diplomové práce, tedy role zadavatele v rámci metody STEM, byl potvrzen. Z výsledků dvoufázového lineárního programování je zřejmé, že vždy je sledována pouze jedna hodnota kritériální funkce. Ačkoli je její konečný výsledek optimální z hlediska výpočtu, nemusí být však uspokojivý z hlediska reálného uplatnění. Metoda STEM se snaží tomuto fenoménu předejít tím, že umožňuje řešiteli na pokyn zadavatele ovlivnit hodnotu kritéria, s nímž zadavatel není spokojen. V případě metody STEM mluvíme o výsledném kompromisním nedominovaném řešení. Tímto způsobem je možno zahrnout reálné podmínky a omezení, jež v surových datech nemusí být zřejmé.

Na závěr je nutno zdůraznit, že ačkoli metoda STEM přináší řadu výhod, může mít v závislosti na konkrétních optimalizačních problémech různá omezení. V některých případech může být vhodnější využít jiné pokročilé metody optimalizačního aparátu. Vybranou optimalizační metodu je vždy nezbytné přizpůsobit danému problému, časovým požadavkům a dalším kritériím.

V kontextu problematiky zkoumané v rámci diplomové práce se metoda STEM jeví jako pokročilá metoda vícekritériální optimalizace, umožňující nalezení širokého uplatnění v praxi.

## Zdroje

- [1] JEČMEN, Karel, PILÁT, Daniel, et al. Optimalizace výběru portfolia investičních projektů dopravní infrastruktury pomocí metody STEM. Praha.
- [2] TEICHMANN, Dušan. Studijní podklady k přednáškám a cvičením předmětu Teorie zásob, obnovy a rozvrhy. Praha.
- [3] MOCKOVÁ, Denisa, TEICHMANN, Dušan. Studijní podklady k přednáškám a cvičením předmětu Kvantitativní metody v dopravě. Praha.
- [4] JEČMEN, Karel. Obaly. Praha.
- [5] JABLONSKÝ, Josef. Operační výzkum. 3. vydání. Praha: PROFESSIONAL PUBLISHING, 2007. ISBN 978-80-86946-44-3
- [6] LAMBERT, Douglas M. Logistika. 2. vydání. Brno: CP Books, 2005. ISBN: 80-251-0504-0
- [7] GROS, Ivan et al. Velká kniha logistiky. 1. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2016. ISBN 978-80-7080-952-5
- [8] PERNICA, Petr. Logistický management: teorie a podniková praxe. 1. vydání. Praha: RADIX, 1998. ISBN 80-86031-13-6
- [9] PERNICA, Petr. Logistika pro 21. století. 1. vydání. Praha: RADIX, 2005. ISBN 80-86031-59-4
- [10] SIXTA, Josef, ŽIŽKA, Miroslav. Logistika: metody používané pro řešení logistických projektů. 1. vydání. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-2563-2
- [11] SIXTA, Josef, MAČÁT, Václav. Logistika: teorie v praxi. 1. vydání. Brno: Computer Press. ISBN 80-251-0573-3
- [12] TOMEK, Gustav, VÁVROVÁ, Věra. Řízení výroby a nákupu. 1. vydání. Praha: Grada publishing, 2007. ISBN 978-80-247-1479-0
- [13] ČUJAN, Zdeněk. Obalová technika a identifikace. 1. vydání. Přerov: Vysoká škola logistiky, 2012. ISBN 978-80-87179-18-5
- [14] SUNIL, Chopra. Supply Chain Management. 5. vydání. New Jersey: Prentice Hall, 2013. ISBN 978-0-13-274395-2
- [15] SCHINDLEROVÁ, Vladimíra. Logistika – teorie. [online]. 2013 [cit.2023-04-15]. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/463/ucebniopory/978-80-248-3056-8.pdf>

- [16] JÍLKOVÁ, Karolína. Optimalizace zásob obalového materiálu ve společnosti Epcos s.r.o. [online]. 2015 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30287018.pdf>
- [17] WATERS, Donald. Logistics: An Introduction to Supply Chain Management [online]. 2013 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: [https://juancarlosvergaras.files.wordpress.com/2013/06/waters\\_d-\\_logisticsc\\_an\\_introduction\\_to\\_supply\\_chain\\_management\\_2003en354s.pdf](https://juancarlosvergaras.files.wordpress.com/2013/06/waters_d-_logisticsc_an_introduction_to_supply_chain_management_2003en354s.pdf)
- [18] We Buy Any Pallet Racking: The History of the Warehouse [online]. 2017 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://webuyanypallettracking.com/the-history-of-the-warehouse/>
- [19] inVia Robotics: A Brief History of Warehouses: Part I [online]. 2020 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://inviarobotics.com/blog/brief-history-warehouses-part-i/>
- [20] Hopstack: Evolution of Warehousing Systems: History and Timelines [online]. 2022 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.hopstack.io/blog/evolution-warehousing-systems-history-timelines>
- [21] Science Museum Group: Architect's model of S&J Watts' warehouse [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: [https://coimages.sciencemuseumgroup.org.uk/images/298/337/medium\\_Y1978\\_0034\\_0001\\_0001\\_.jpg](https://coimages.sciencemuseumgroup.org.uk/images/298/337/medium_Y1978_0034_0001_0001_.jpg)
- [22] Altaxo: Co jsou zkratky B2C, B2B, B2G, B2E [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.altaxo.cz/provoz-firmy/marketing/co-jsou-zkratky-b2c-b2b-b2g-b2e>
- [23] Pňakovič Jan: LinkedIn [online]. 2022 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: [https://www.linkedin.com/posts/jan-pnakovic\\_automatizace-technologie-autostore-activity-6996508378797604864-QLNw/?originalSubdomain=cz](https://www.linkedin.com/posts/jan-pnakovic_automatizace-technologie-autostore-activity-6996508378797604864-QLNw/?originalSubdomain=cz)
- [24] Informační systémy: Differences-between-JIT-and-JIS [online]. [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://informacne-systemy.sk/portfolio-view/jit-riesenie-just-in-time/differences-between-jit-and-jis/>
- [25] Wikipedie: Sklad [online]. 2022 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sklad>
- [26] Root: Jupyter Notebook [online]. 2020 [cit. 2023-05-04] Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/jupyter-notebook-nastroj-pro-programatory-vyzkumniky-i-lektory/#k01>
- [27] SafetyCulture: Functions of Warehouse [online]. 2022 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://safetyculture.com/topics/warehouse-management/functions-of-a-warehouse/>

- [28] Logistics Brew: 8 Major Functions of Warehouse [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://stockarea.io/blogs/8-major-functions-of-a-warehouse/>
- [29] indeed: What is the function of a warehouse? [online]. 2022 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://uk.indeed.com/career-advice/career-development/function-of-warehouse>
- [30] TECH portal: Manipulační jednotky [online]. 2021 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/manipulacni-jednotky-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EoSf6RcLfOnl01fg2EIPJ0/>
- [31] Ministerstvo životního prostředí: Obaly [online]. 2001 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/2E3A627D45671704C1257563004137A8/%24file/OL\\_477\\_2001.pdf](https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/2E3A627D45671704C1257563004137A8/%24file/OL_477_2001.pdf)
- [32] Normy: Třída 77 – Obaly a obalová technika – Seznam podtříd [online]. [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/trida/77>
- [33] Mecalux: Euro paleta (rozměry a vlastnosti) [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.mecalux.cz/technicka-prirucka-pro-skladovani/palety/euro-paleta>
- [34] HRUŠKA, Roman: Využití ABC analýzy v oblasti řízení zásob [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/70247/Vyuziti\\_ABC\\_analyzy.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/70247/Vyuziti_ABC_analyzy.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [35] Kardex: Warehouse Slotting Strategies and Best Practices [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://us.blog.kardex-remstar.com/warehouse-slotting-strategies-best-practices>
- [36] SOUKOPOVÁ, Jana: Vícekriteriální metody hodnocení [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1456/jaro2013/MKV\\_VZVP/um/33149329/Studijni\\_text\\_metody\\_vicekriterialniho\\_rozhodovani.pdf](https://is.muni.cz/el/1456/jaro2013/MKV_VZVP/um/33149329/Studijni_text_metody_vicekriterialniho_rozhodovani.pdf)
- [37] DOUBRAVOVÁ, Hana: Vícekriteriální analýza variant a její aplikace v praxi [online]. 2009 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: [https://theses.cz/id/6citbe/downloadPraceContent\\_adipldno\\_11361](https://theses.cz/id/6citbe/downloadPraceContent_adipldno_11361)
- [38] THIE, Paul R. a KEOUGH, Gerard E.: An Introduction to Linear Programming and Game Theory. [online]. 2008 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <http://zalamsyah.staff.unja.ac.id/wp-content/uploads/sites/286/2019/11/9-An-Introduction-to-Linear-Programming-and-Game-Theory-Thie-Kagouh.pdf>



[39] Toyota Material Handling: Ke stohování nepotřebujete regály. [online]. [cit. 2023-05-06].  
Dostupné z: <https://blog.toyota-forklifts.cz/ke-stohovani-nepotrebujete-regaly>

[40] MANAFI, Amina. Applying TSP Heuristics to Solve Warehouse Order Picking Problems. [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <file:///C:/Users/uzivatel/Downloads/ce14737299ba4b94aac942fe685d887c.pdf>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Architektonický model Watts' Warehouse, zdroj: [21].....	12
Obrázek 2 - AutoStore v Rohlík.cz v Chrášťanech, zdroj: [autor] .....	14
Obrázek 3 - Rozdíl mezi JIT a JIS, zdroj: [autor] .....	16
Obrázek 4 - Rozdíly mezi konsolidací a dekonsolidací, zdroj: [autor] .....	19
Obrázek 5 - Metoda FIFO vs. LIFO, zdroj: [autor] .....	22
Obrázek 6 - Normalizace rozměrů EUR paleta, zdroj: [30].....	29
Obrázek 7 - EURO palety, zdroj: [33].....	30
Obrázek 8 - Přehled manipulačních jednotek II. řádu, zdroj: [7] .....	30
Obrázek 9 - Řešení skladovacího problému pomocí úlohy TSP, zdroj: [40] .....	33
Obrázek 10 - Lorenzova křivka zobrazující princip ABC analýzy, zdroj: [34] .....	34
Obrázek 11 - Skladování na volné ploše, zdroj: [39] .....	38
Obrázek 12 - Schéma skladovací plochy, zdroj: [autor].....	43
Obrázek 13 - Uživatelské prostředí Jupyter Notebook, zdroj: [autor].....	44
Obrázek 14 - Ilustrativní způsob skladování na volné ploše, zdroj: [Google Maps, autor] ....	45
Obrázek 15 - Schéma umístěných druhů obalů při nalezení ideálních hodnot kritériálních funkcí, zdroj: [autor] .....	54
Obrázek 16 - Schéma umístění obalů pro první kritériální funkci, zdroj: [autor] .....	<b>Chyba!</b>
<b>Záložka není definována.</b>	
Obrázek 17 - Schéma umístění obalů pro druhou kritériální funkci, zdroj: [autor].....	55
Obrázek 18 - Schéma umístěných druhů obalů po první výpočtové fázi, zdroj: [autor].....	57
Obrázek 19 - Schéma umístění obalů po první výpočtové fázi, zdroj: [autor] .....	58
Obrázek 20 - Schéma umístěných druhů obalů po druhé výpočtové fázi, zdroj: [autor].....	60
Obrázek 21 - Schéma umístění obalů po druhé výpočtové fázi, zdroj: [autor] .....	61
Obrázek 22 - Legenda k Obrázku 23, zdroj: [autor].....	63
Obrázek 23 - Schématické zobrazení výsledků umístění druhů obalů pro obě metody, zdroj: [autor] .....	64

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Typy skladů, zdroj: [7], [15], [17].....	20
Tabulka 2 - Modifikace půdorysných ploch manipulačních jednotek I. řádu, zdroj [7].....	28
Tabulka 3 – Vstupní data pro obaly, zdroj: [autor] .....	45
Tabulka 4 - Slotová vstupní data, zdroj: [autor] .....	46
Tabulka 5 - Výsledky dvoufázové metody, zdroj: [autor] .....	53
Tabulka 6 - Výsledky první výpočtové fáze, zdroj: [autor].....	56
Tabulka 7 - Porovnání výsledných hodnot po první výpočtové fázi s hodnotami ideálními, zdroj: [autor] .....	56
Tabulka 8 - Výsledky druhé výpočtové fáze, zdroj: [autor] .....	59
Tabulka 9 - Porovnání výsledných hodnot po druhé výpočtové fázi s hodnotami ideálními, zdroj: [autor].....	59
Tabulka 10 - Dosažené výsledky metody STEM, zdroj: [autor] .....	62
Tabulka 11 - Výsledky výpočetního experiment, zdroj: [autor].....	63

## Seznam příloh

Příloha 1 – Zdrojový kód pro výpočty modelu pomocí metody STEM