Optimering av plockplatser Norrmejerier

En simuleringsbaserad studie av artikelplacering, plockrutter och produktivitet

Handledare

Per-Håkan Lundow

Student och skribenter

Jonatan Rehn – Rehn.jonatan@gmail.com

Elton Selin – elton.selin@gmail.com

17 juni 2026

Umeå Universitet

Sammanfattning

Denna studie undersöker hur artikelplaceringen i Norrmejeriers kyllager påverkar effektiviteten i den manuella plockprocessen. I kyllagret plockas kundordrar från fasta plockplatser med hjälp av Pick-by-Voice, vilket innebär att artikelplaceringen har direkt påverkan på gångsträcka, plocktid och risken för trängsel. Syftet med arbetet är därför att analysera dagens placering och undersöka om alternativa artikelplaceringar kan bidra till en mer effektiv plockprocess.

Problemet är komplext eftersom artiklarna inte enbart kan placeras utifrån kortast avstånd till startpunkten. Hänsyn måste även tas till stapelbarhet och sekundärförpackningar, där artiklar behöver plockas i en viss ordning för att pallar och vagnar ska kunna byggas stabilt. Dessutom kan flera plockare behöva besöka samma platser samtidigt, vilket kan skapa väntetider och flaskhalsar.

Arbetet genomförs i tre steg. Först används klusteranalys för att identifiera samplockningsmönster mellan artiklar. Därefter tas en initial artikelplacering fram med hjälp av en matematisk placeringsmodell som beaktar orderfrekvens, gångavstånd och sekundärförpackningar. Slutligen förbättras placeringen med simulated annealing, där målet är att minska den totala tiden bestående av gångtid, plocktid och väntetid. Layouterna utvärderas genom en simuleringsmodell baserad på tio veckors historisk orderdata.

Resultaten visar att nuläget har förbättringspotential. Dagens layout ger en produktivitet på 77.82 plockrader per timme och plockare, med en genomsnittlig gångtid på 145.20 sekunder per order och en genomsnittlig väntetid på 121.31 sekunder. Samtliga alternativa layouter ger högre produktivitet än nuläget, främst genom kortare gångtider och en mer kompakt artikelplacering. Den bästa lösningen är retur-plock efter simulated annealing, med en produktivitet på 88.82 plockrader per timme och plockare, vilket motsvarar en förbättring på 14.1 procent jämfört med nuläget. Scenarioanalysen visar även att den förbättrade layouten behåller ett högre plocksnitt än nuläget när antalet plockare ökar. Sammantaget visar studien att artikelplacering har en tydlig påverkan på plockprocessens effektivitet. Rekommendationen är därför att Norrmejerier implementerar den förbättrade layouten baserad på returpolicy, eftersom den ger högre produktivitet och kan införas utan större förändringar i dagens arbetssätt.

Abstract

This study examines how article placement in Norrmejerier's cold storage warehouse affects the efficiency of the manual picking process. In the warehouse, customer orders are picked from fixed picking locations using Pick-by-Voice, which means that article placement has a direct impact on walking distance, picking time, and the risk of congestion. The purpose of this study is therefore to analyze the current placement and investigate whether alternative article placements can contribute to a more efficient picking process.

The problem is complex since articles cannot be placed solely based on the shortest distance from the starting point. Consideration must also be given to stacking requirements and secondary packaging groups, where articles need to be picked in a specific order to ensure stable pallet and cart building. In addition, several pickers may need to visit the same locations at the same time, which can create waiting times and bottlenecks.

The work is carried out in three steps. First, cluster analysis is used to identify co-picking patterns between articles. An initial article placement is then developed using a mathematical placement model that considers order frequency, walking distance, and secondary packaging groups. Finally, the placement is improved using simulated annealing, where the objective is to reduce the total time consisting of walking time, picking time and waiting time. The layouts are evaluated through a simulation model based on ten weeks of historical order data.

The results show that the current layout has improvement potential. The current layout achieves a productivity of 77.82 pick rows per hour per picker, with an average walking time of 145.20 seconds per order and an average waiting time of 121.31 seconds. All alternative layouts result in higher productivity than the current layout, mainly due to shorter walking times and a more compact article placement. The best solution is return picking after simulated annealing, with a productivity of 88.82 pick rows per hour per picker, corresponding to an improvement of 14.1 percent compared to the current layout. The scenario analysis also shows that the improved layout maintains a higher picking rate than the current layout when the number of pickers increases. Overall, the study shows that article placement has a clear impact on the efficiency of the picking process. The recommendation is therefore that Norrmejerier implements the improved layout based on the return policy, since it provides higher productivity and can be introduced without major changes to the current working method.

Förord

Vi vill börja med att rikta ett stort tack till alla som har bidragit med hjälp och expertis till detta examensarbete.

Först och främst vill vi tacka Per-Håkan vid Umeå universitet för hans stöd genom projektet. Genom värdefulla diskussioner, idéer och vägledning har han hjälpt oss att driva arbetet framåt och hålla rätt riktning. Vi vill även rikta ett stort tack till Carolin Vesterlund på Norrmejerier för hennes stöd under arbetets gång. Hon har bidragit till att arbetet har kunnat genomföras smidigt genom att hjälpa oss med allt från teknisk utrustning till att agera bollplank för våra idéer. Vi vill också tacka övriga berörda personer på Norrmejerier som har hjälpt oss att komma i mål med arbetet, välkomnat oss med öppna armar och bidragit till en mycket trevlig arbetsmiljö. Sist men inte minst vill vi tacka våra familjer, vänner och partners för deras stöd under våra år som civilingenjörsstudenter.

Detta arbete har gett oss en värdefull inblick i arbetslivet, och vi ser fram emot de utmaningar som väntar efter examen.

Ordlista

- **Kyllager** - Lager för artiklar som plockas för hand av personal och som läggs på lastbärare för att skickas till kund. Används för ordrar av artiklar i mindre kvantiteter.
- **Plockplats** - Hyllplats för lagring av artiklar. En plockplats håller en specifik artikel, men populära artiklar kan kräva flera plockplatser.
- **Ställ** - Avser en hyllrad eller racksektion i lagret som består av flera plockplatser.
- **Plockrundor** - Bestämd rutt för manuell plock av artiklar från plockplats. En plockrunda motsvarar en order.
- **Pick-by-Voice** - Hörlurar som informerar personalen, via röstkommandon, om vilka plockplatser som ska besökas samt hur många av varje artikel som ska plockas. Instruktionerna baseras utifrån den order som ska plockas.

Innehåll

1 Introduktion **1**

1.1 Problemformulering . . . 2
1.2 Syfte och mål . . . 4
1.3 Motivering till vald metod och arbetssätt . . . 4
1.4 Företagsfakta . . . 5
1.5 Rapportens disposition och råd till läsaren . . . 5
1.6 Användning av AI . . . 5

2 Beskrivning av internlogistiken på kyllagret **6**

2.1 Artikelflöde . . . 6
2.2 Astro . . . 6
2.3 Artikelplaceringens roll i internlogistiken . . . 7

3 Teori **7**

3.1 Klusteranalys . . . 7
3.1.1 Hierarkisk klustring . . . 7
3.1.2 Avståndsmått . . . 7
3.1.3 Silhouette analys . . . 8
3.2 Rutteorier . . . 9
3.2.1 Returpolicy . . . 9
3.2.2 Z-plock . . . 10
3.2.3 Mittplock . . . 11
3.3 Tilldelningsproblemet . . . 12
3.4 Lagerplaceringsproblemet . . . 13
3.5 Simulated Annealing . . . 15

4 Metod **16**

4.1 Modellstruktur . . . 16
4.2 Datainsamling . . . 17
4.2.1 Databearbetning . . . 18
4.3 Klustringsanalys . . . 19
4.4 Modell initial placering . . . 21
4.4.1 Datainläsning . . . 21
4.4.2 Modelluppbyggnad . . . 21
4.5 Simuleringsmodell . . . 22
4.5.1 Simuleringsbeskrivning . . . 22
4.5.2 Bekränsningar med simuleringen . . . 23
4.6 Simulated annealing . . . 24

5 Verifiering av simuleringsmodell **25**

5.1 Plockrutter . . . 25
5.2 Artikelplacering . . . 26
5.3 Lösningskvalitet Simulated annealing . . . 26

6 Resultat **26**
6.1 Nulägesanalys . . . 26
6.2 Kluster . . . 28
6.3 Placeringsmodell . . . 28
6.4 Simulated annealing . . . 30
6.5 Scenarioanalys . . . 32

7 Diskussion **33**
7.1 Nuläge . . . 33
7.2 Klusteranalys . . . 34
7.3 Initial lagerlayout-modell . . . 34
7.4 Simulated annealing förbättring . . . 35
7.5 Scenario . . . 37
7.6 Slutsats . . . 37

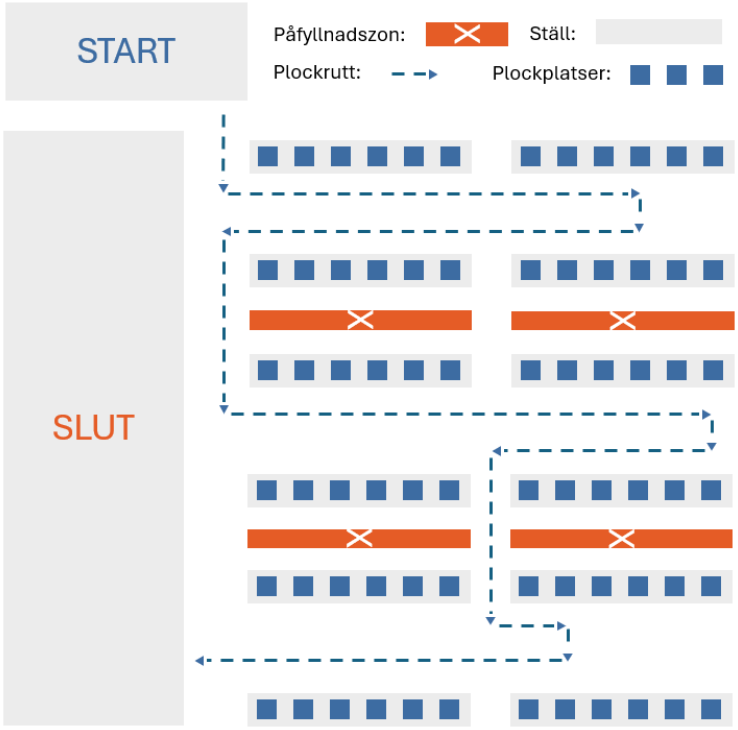
A Projektbeskrivning NM **40**

B Resultattabeller **41**

1 Introduktion

Norrmejerier har idag cirka 275 artiklar i sitt sortiment, och detta ger upphov till vissa logistiska problem. Ungefär hälften av dessa artiklar finns i deras kyllager, och i detta kyllager finns det plockplatser där personalen plockar artiklar för att sedan skicka dem till kunder. Dessa ordrar med artiklar som personalen plockar är en väsentlig del av Norrmejeriers ordrar och är därför viktig att analysera för att kunna förbättra internlogistiken. Plockplatserna är förutbestämda platser där artiklarna ska stå, och ett pick-by-voice system används för att styra personalen till rätt plats samt för att informera dem om hur många enheter som ska plockas på varje plats.

I Figur 1.1 illustreras en fiktiv plockrunda som börjar i startpunkt för att sedan besöka det plockplatser med artiklar som pick-by-voice systemet styr personal till för att sedan lämna ordern vid portarna som illustreras som slut.



Figur 1.1: Bilden av Norrmejeriers kyllager. Den grå rutan, med start, visar plockarnas utgångspunkt och den grå rutan, med slut, markerar lastbryggan och ruttens slutpunkt. De gråa rutorna med blå kvadrater representerar hyllplan, och kvadraterna motsvarar plockplatser med artiklar. De orangea rutorna mellan ställen är där påfyllningstruckarna kör, där får inte några plockare köra. Pilarna illustrerar en typisk plockrutt.

Projektet syftar på att analysera huruvida uppsättningen av plockplatser är effektiv idag eller om förbättringsområden indentifieras. Med uppsättning av plockplatser menas vilken artikel som ska vara placerad var i kyllagret.
Läs Norrmejeriers projektbeskrivning i Appendix A.

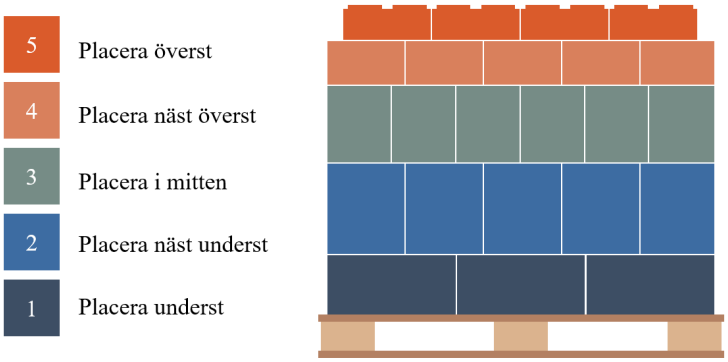
Problemet kan beskrivas som ett lagerplaceringsproblem (SLAP), men innehåller även inslag av rutter, orderbatchning och trängseleffekter mellan plockare. Detta gör att problemet inte direkt kan modelleras som ett enskilt standardiserat optimeringsproblem. Enligt litteraturöversikten som presenteras i Islam och

Uddin [1] framgår det att liknande problem inom lagerplaceringsproblemet (SLAP) i tidigare studier huvudsakligen har hanterats med klustringsbaserade heuristiker, ofta kompletterade med metaheuristiska metoder, medan exakta matematiska modeller främst används som jämförelse för mindre instanser.

1.1 Problemformulering

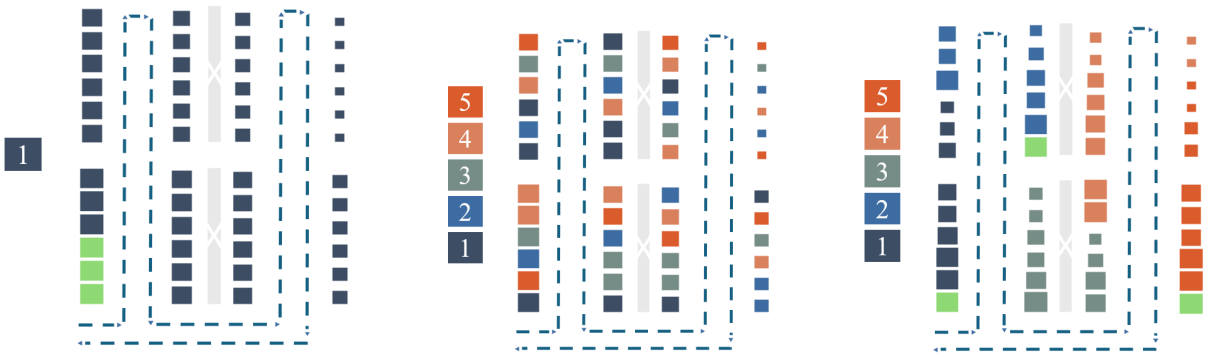
Plockprocessen i Norrmejeriers kyllager är en stor del av företagets internlogistik vilket påverkar både ledtider och arbetsbelastning för personalen. Hur artiklarna är placerade i lagret har en direkt påverkan på hur långa och effektiva plockrundorna blir. I dagsläget är plockplatserna fasta, men det saknas en analys av om den nuvarande placeringen av artiklar är optimal ur ett plockeffektivitetsperspektiv.

Problemet försvåras av att lagret har vissa praktiska begränsningar såsom fasta plockgångar samt fasta påfyllnadsytor där endast påfyllningstruckar får köra. Det finns även restriktioner kring vilka artiklar som inte får staplas på varandra för att säkerställa att pallar och vagnar byggs stabilt och inte riskerar att skadas under transport, se Figur 1.2.



Figur 1.2: Illustration av stapelbarhetsnivåer för artiklar vid plockning på pall. Varje artikel tilldelas ett värde mellan 1 och 5 som anger dess prioriterade placering på pallen, där 1 motsvarar underst och 5 överst. Stapelbarhetsnivån används för att säkerställa korrekt och stabil palluppbyggnad vid plock.

Stabelbarheten påverkar därav hur artiklar får placeras i lagret, då stapelbarhetsgrupperna måste följa en given ordning 1 till 5. Dessa grupper benämns framöver som sekundärförpackningar 1 till 5, där 1 kommer först och 5 sist. Hur det påverkar artikelplaceringen kan illustreras i Figur 1.3.



(a) Exempel på en lösning med en sekundärförpackning. De gröna rutorna motsvarar plockade artiklar i en order.

(b) Exempel på vad det resulterar i om man delar in det i 5 st sekundärförpackningar

(c) Exempel på hur problemet måste optimeras. De gröna rutorna motsvarar plockade artiklar i en order.

Figur 1.3: Illustration av hur stapelbarheten påverkar placering av artiklar i lagret. Kvadraterna representerar artiklar där dess färger visar i vilken ordning de ska plockas och storleken representerar orderfrekvens. Pilarna motsvarar plockrutten som plockarna följer. De gröna rutorna motsvarar plockade artiklar i en order.

Som framgår i Figur 1.3 måste sekundärförpackningarna placeras i en ordning som följer plockrutten, snarare än baserat på avståndet till startpunkten. Där (a) visar ett scenario i ett idealiskt scenario där alla artiklar tillhör samma sekundärförpackning, stapelbarheten inte spelar roll, och där artiklarna är placerade efter orderfrekvens. De gröna artiklarna motsvarar artiklar som ska plockas, tillhörande en order, och i en perfekt värld blir plockrutten kort och effektiv. (b) visar vad det skulle resultera i om man sen kollar vilka sekundärförpackningar varje artikel har, där man kan se hur sekundärförpackningarna hamnar i oordning. Därefter visar (c) hur de måste placeras i denna studie, indelat i sekundärförpackningar i ordning efter stapelbarhet och plockrutt. De gröna rutorna representerar samma artiklar som ingår i en order, samma order som i (a), och visar hur detta leder till betydligt längre plockrutter. Detta innebär att artikelplaceringen inte enbart kan optimeras utifrån närhet till start, utan även måste ta hänsyn till den ordning i plockrutten artiklarna hamnar baserat på dess sekundärförpackning.

Vidare kan flera plockare samtidigt behöva besöka samma plockplatser, vilket kan skapa trängsel och flaskhalsar i plockprocessen. Dessa förutsättningar innebär att en omplacering av artiklar inte enbart kan baseras på kortast möjliga gångavstånd eller Manhattan-distans, utan även måste ta hänsyn till faktisk plocktid, inklusive väntetider och interaktioner mellan plockare, för att på ett realistiskt sätt spegla lagrets operativa verklighet.

Problemformuleringen i denna uppsats är därför att undersöka huruvida den nuvarande uppsättningen av plockplatser är effektiva samt att analysera om alternativa placeringar av artiklar kan leda till snabbare plockrundor och förbättrad internlogistik. Den centrala frågeställningen som studeras är därför:

- Kan plockrundornas längd och effektivitet förbättras genom en förändrad placering av artiklar i kyllagret?

1.2 Syfte och mål

Syftet med uppsatsen är att analysera hur placering av artiklarna i Norrmejeriers kyllager påverkar effektiviteten för plockprocessen. Fokuset kommer att ligga på hur plockrundornas tidsåtgång påverkas av artikelplacering med hänsyn till både gångavstånd och andra faktorer såsom trängsel och flaskhalsar.

Målet med uppsatsen är att baserat på tillgänglig plockdata och modellering av kyllagrets plockprocess, utvärdera den nuvarande uppsättning av plockplatser samt analysera alternativa placeringar av artiklar. De alternativa plockplatserna ska utvärderas utifrån produktivitet, antalet plockrader i timmen per plockare, för att bedöma om det ger en förbättring eller inte. Målet med arbetet kan sammanfattas i följande delmål:

- Analysera hur nuvarande artikelplacering påverkar produktiviteten och plockrundor.
- Identifiera potentiell påverkan av flaskhalsar och trängsel i plockprocessen.
- Utvärdera alternativa artikelplaceringar med avseende på plocktid och effektivitet.

1.3 Motivering till vald metod och arbetssätt

Motiveringen till vald metod och arbetssätt grundar sig i problemet och de operativa restriktioner som råder i plockprocessen. Som det framgår i problemformuleringen så påverkas inte plockeffektiviteten endast av gångavstånd utan även av plocktid, trängsel och interaktioner mellan plockare. Detta gör att enbart distansbaserade modeller ger en begränsad bild av den riktiga effektiviteten.

Vidare visar litteraturen inom Lagerplaceringsproblem (SLAP) att exakta optimeringsmodeller kan vara svåra att tillämpa på realistiska lagerproblem, och främst används som jämförelse för mindre instanser [1]. I stället dominerar heuristiska, metaheuristiska och simuleringsbaserade angreppssätt i praktiska tillämpningar, där simulering används för att utvärdera olika artikelplaceringar med avseende på tidsbaserade prestationsmått och för att fånga effekter av trängsel och flaskhalsar [2]. Men eftersom Norrmejeriers kyllager inte består av alltför många artiklar, kan exakta optimeringsmodeller fungera och kommer därav, tillsammans med olika heuristiker, att utforskas.

Denna lösning förbättras därefter med simulated annealing, som valdes eftersom metoden är relativt enkel att implementera, kan hantera stora diskreta sökrymder och lämpar sig väl för iterativ förbättring av artikelplaceringar. Alternativa metaheuristiska metoder, såsom genetiska algoritmer och tabu search, hade också kunnat användas, men undersöks inte vidare inom ramen för denna studie.

Detta motiverar därför ett arbetssätt baserat på modellering och simulering av plockprocessen, för att kunna analysera och jämföra olika uppsättningar av plockplatser utifrån effektivitet och plocktid. Det skapar en realistisk och relevant utvärdering av kyllagrets interna logistik som är i linje med tidigare forskning och Norrmejeriers behov.

Vidare innebär detta arbetssätt att optimeringen genomförs i tre steg bestående av klustring, initial placering och heuristisk förbättring, där artikelplaceringar successivt justeras i lagret för att skapa kortare och mer effektiva plockrutter. Denna stegvisa uppdelning möjliggör att problemets komplexitet reduceras samtidigt som sökprocessen effektiviseras.

1.4 Företagsfakta

Norrmejerier är Sveriges största mejeriförening ägd av dess mjölkbönder i Norrbotten, Västerbotten samt delar av Jämtlands och Västernorrlands Län [3], vilket motsvarar stora delar av Sveriges yta. Norrmejerier tar in cirka två hundra miljoner kilo mjölkråvara årligen från dess cirka 300 aktiva mjölkbönder och förädlar den till olika mejeriprodukter [4]. Trots lokala bönder och produktion så tillhandahåller de mejeriartiklar för den regionala marknaden i Sverige samt delar av Europa. Norrmejerier har dessutom ytterligare varumärken under sig som Verum, Fjäll och Västerbottensost [5]. Som en ekonomisk förening och ett kooperativ, garanteras bönderna en ekonomisk avsättning för mjölken de producerar. Norrmejeriers mål är att med sina lokalproducerade mejeriartiklar, skapa utmärkta förutsättningar för en hållbar mjölkproduktion i Norrland [6].

I dagsläget har Norrmejerier två mejerier, ett i Umeå och ett i Burträsk. Mejeriet i Burträsk producerar enbart Västerbottensost. Osten får endast tillverkas där, på norrländsk komjölk, och följer originalreceptet från 1872 [7]. Mejeriet i Umeå står för all övrig produktion, allt från ost till mjölk och kvarg, vilket är unikt.

Logistiken på Norrmejerier är en komplex utmaning, dels på grund av den stora geografiska yta som måste täckas för både insamling av råvara och distribution av färdiga artiklar. Utöver detta sker all produktion, med undantag för Västerbottensosten, under samma tak på Umeå mejeri. Detta skapar komplexa försörjningskedjor och ställer höga krav på den interna logistiken. I detta sammanhang blir hanteringen av kyllagret en central fråga, då dess utformning och arbetssätt har stor påverkan på den övergripande effektiviteten i flödet.

1.5 Rapportens disposition och råd till läsaren

Rapporten är strukturerad enligt följande. Inledningsvis presenteras bakgrund, problemformulering samt syfte och mål för arbetet. Därefter följer en beskrivning av Norrmejerier och den interna logistiken i kyllagret, vilket ger läsaren en förståelse för de operativa förutsättningar som präglar studien.

I metodkapitlet redogörs för det valda metod- och arbetssättet, inklusive datainsamling, modellering och simulering av plockprocessen. Resultatkapitlet presenterar utfallet av analysen och jämförelsen mellan nuvarande och alternativa artikelplaceringar, med fokus på plocktid och effektivitet. Resultaten diskuteras därefter i ett separat diskussionskapitel, där de sätts i relation till problemformuleringen, studiens begränsningar och tidigare forskning. Slutligen sammanfattas arbetet i ett avslutande kapitel med slutsatser och förslag på vidare arbete. Läsare som främst är intresserade av de praktiska resultaten kan med fördel fokusera på metod-, resultat- och diskussionskapitlen, medan appendix innehåller kompletterande information och detaljer som stödjer analysen.

1.6 Användning av AI

Under arbetets gång har AI-baserade verktyg använts som stöd i flera delar av processen. AI har främst använts för att generera och felsöka kod, granska språk och grammatik samt ge förslag på formuleringar. Verktygen har även använts för stöd vid formatering av LaTeX-kod, exempelvis vid skapandet av figurer, tabeller och matematiska uttryck.

AI har endast använts som ett stödverktyg. Samtliga analyser, metodval, resultat, tolkningar och slutsatser har genomförts och granskats av författarna.

2 Beskrivning av internlogistiken på kyllagret

Detta avsnitt syftar på att beskriva internlogistiken i kyllagret på Mejeriet i Umeå för att bistå läsaren med en bättre förståelse av problemet.

2.1 Artikelflöde

Artikelflödet i kyllagret inleds med att dagens kundordrar registreras i lagerstyrningssystemet Astro. Utifrån dessa genereras plockordrar som tilldelas lagerpersonalen, där varje plockrutt startar från en fast utgångspunkt i lagret. Plock sker med truck alternativt gång och görs antingen på EU-pallar eller i KPV-vagnar, beroende på orderns innehåll. Under plockprocessen guidar Pick-by-Voice plockaren till rätt lagerplats och anger vilken artikel samt kvantitet som ska plockas. Efter varje plock bekräftas utförandet muntligt, varpå nya instruktioner ges tills hela ordern är färdigplockad. Plockordningen styrs av Astro WMS och följer en hierarkisk prioritering av lagerlayouten. I ett första steg prioriteras hyllställ/kolumner i lagret, där de närmast plockruttens startpunkt plockas före de mer avlägsna. Därefter prioriteras rader inom respektive kolumn, där plockplatser närmare lastbryggan plockas före platser längre in i lagret. Plockordningen följer alltså en Retur-policy, där kolumner i lagret prioriteras sekventiellt och plock sker längs hela kolumnens längd innan nästa kolumn bearbetas i motsatt riktning. Dock finns det möjlighet att vända mitt i en kolumn om inga fler artiklar ska plockas där, se Figur 1.1. Om en artikel finns på flera plockplatser prioriteras den med närmast utgångsdatum. När ordern är komplett plastas pallen in, i de fall ordern är på pall, och transporteras till korrekt utlastningsport varefter avslutas processen via Pick-by-Voicen. Ordern förvaras vid porten tills lastbil anländer och utleverans sker av chaufför.

Påfyllnad av plockplatser hanteras parallellt med plockprocessen. När lagersaldot på en plockplats når en viss nivå skickar Astro en påfyllnadsnotis till ansvarig lagerpersonal. Påfyllnad sker vanligtvis från ett buffertlager som är placerat direkt ovanför respektive plockplats. För artiklar med hög omsättning finns ofta utökade buffertlager, vilket innebär att kompletterande lagring sker på andra platser i kyllagret.

2.2 Astro

Norrmejeriers internlogistik stöds av lagerstyrningssystemet Astro WMS, ett Warehouse Management System som används för att planera och styra lagerprocesser såsom påfyllnad, lagersaldon, orderhantering och utleveranser. Systemet möjliggör struktur i artikelflödet och är särskilt anpassat för verksamheter med höga krav på effektivitet och kontroll, såsom livsmedelsproduktion med kyllager. Astro utgör därmed ett centralt beslutsstöd i den dagliga driften, där utformningen av kyllagret och placeringen av artiklar har stor påverkan på systemets effektivitet [8]. En välanpassad placering av artiklar kan minska körsträckor och förbättra plocksekvenser. Optimering av artikelplaceringen kan därmed ses som ett komplement till Astro, där den fysiska layouten anpassas för att förbättra utfallet av systemets styrlogik.

2.3 Artikelplaceringens roll i internlogistiken

Astro och Pick-by-Voice utgör tillsammans det tekniska stödet för internlogistiken i kyllagret, där Astro ansvarar för planering och styrning medan Pick-by-Voice stödjer lagerpersonalen. Den fysiska artikelplaceringen fungerar som en gemensam grund för båda systemen och blir därmed centralt för att förbättra utfallet av befintliga system och processer i kyllagret. Detta utgör grunden för det fortsatta arbetet i denna studie, där fokus ligger på att analysera och förbättra artikelplaceringen i syfte att effektivisera plockprocessen.

3 Teori

Denna sektion förklarar nödvändig teori för att skapa förståelse för metoden i senare avsnitt.

3.1 Klusteranalys

Klusteranalys är en metod för att identifiera grupper i data utan att dessa grupper är fördefinierade. Metoden delar in observationer i kluster så att likheten inom varje grupp är hög samtidigt som skillnaden mellan olika grupper är så stor som möjligt. Likhet definieras genom avståndsmått vilket bestäms efter problem. Därför påverkas resultatet av vilket avstånd man använder och vilken klustringsmetod som används.

3.1.1 Hierarkisk klustring

Hierarkisk klustring är en metod inom klusteranalys som syftar till att bygga upp en hierarki av kluster där observationerna grupperas utifrån avstånd. Det finns två huvudstrategier för hierakisk klustring:

- **Agglomerativ klustring** – en botten-upp-metod där varje observation initialt utgör sitt eget kluster. Kluster slås sedan samman två och två baserat på det minsta inbördes avståndet, tills ett enda kluster återstår eller ett förutbestämt antal kluster är uppnått.
- **Divisiv klustring** – en topp-ner-metod där alla observationer börjar i ett enda kluster som sedan delas upp i mindre kluster enligt någon uppdelningsregel.

För agglomerativ klustring beräknas avståndet mella kluster och det görs med olika länkningsmetoder:

- **Single-linkage**, där avståndet definieras av det minsta avståndet mellan två element i de två klustren.
- **Complete-linkage**, där avståndet baseras på det största parvisa avståndet.
- **Average linkage**, där avståndet är medelvärdet av alla parvisa avstånd mellan elementen i klustren.

Resultaten av hierarkisk klustring presenteras vanligtvis i dendrogram [9].

3.1.2 Avståndsmått

En avståndsfunktion genererar ett mått på hur långt ifrån varandra två objekt i en mängd befinner sig. Formellt definieras en avståndsfunktion d som en funktion som uppfyller följande egenskaper:

- **Icke-negativitet:**

$$d(x, y) \geq 0 \tag{3.1}$$

- **Identitet:**

$$d(x, y) = 0 \iff x = y \tag{3.2}$$

- **Symmetri:**

$$d(x, y) = d(x, y) \tag{3.3}$$

- **Triangelolikheten:**

$$d(x, y) \leq d(x, r) + d(r, y) \tag{3.4}$$

En funktion som uppfyller dessa villkor kallas ett *metriskt mått*. Nedan presenteras de avståndsfunktioner som utvärderas i detta projekt.

Euklidiskt avstånd:

Det euklidiska avståndet motsvarar det raka linjeavståndet mellan två punkter.

Låt X beteckna en datamängd med objekt som beskrivs av p numeriska attribut. Vidare låt $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{ip})$ och $x_j = (x_{j1}, x_{j2}, \ldots, x_{jp})$ vara två objekt i X. Det euklidiska avståndet mellan objekten x_i och x_j definieras som [10]

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{(x_{i1} - x_{j1})^2 + (x_{i2} - x_{j2})^2 + \cdots + (x_{ip} - x_{jp})^2}. \tag{3.5}$$

Manhattan-avstånd:

Manhattanavståndet motsvarar avståndet mellan två punkter mätt längs ett rutnätsmönster. [10]

$$d(x_i, x_j) = |x_{i1} - x_{j1}| + |x_{i2} - x_{j2}| + \cdots + |x_{ip} - x_{jp}| \tag{3.6}$$

Jaccard-index och Jaccard-avstånd: Jaccard-index (likhetsmått) mellan två mängder av punkter A och B definieras som [11]

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \tag{3.7}$$

Jaccard-avståndet definieras som

$$d_J(A, B) = 1 - \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \tag{3.8}$$

3.1.3 Silhouette analys

Silhouette-analys är ett mått som används för att utvärdera hur bra en klustringslösning passar på den data som den applicerats på. För varje observation beräknas ett silhouette-värde som kvantifierar hur nära observationen är sitt eget kluster jämfört med det närmaste grannklustret.
För en observation i i kluster C definieras:

- $c(i)$ som det genomsnittliga avståndet från i till övriga observationer i kluster C. Detta utgör ett mått på intra-klusteravstånd.

- $b(i)$ som det lägsta genomsnittliga avståndet från i till alla observationer i något annat kluster $D \neq C$. Detta fångar hur nära i ligger andra kluster, det vill säga inter-klusteravstånd.

Silhouette-värdet för observationen i definieras därefter som

$$s(i) = \frac{b(i) - c(i)}{\max\{c(i), b(i)\}} \tag{3.9}$$

Silhouette-värdet varierar mellan -1 och 1, där värden nära 1 visar att observationen är väl placerad i sitt kluster samt värden nära 0 indikerar att observationen ligger i gränszonen mellan två kluster, och negativa värden tyder på att observationen sannolikt är felaktigt tilldelad till sitt kluster. Genomsnittet av silhouettvärderna över samtliga observationer i ett dataset används ofta som ett mått på den övergripande klusterlösningens kvalitet och kan jämföras för olika antal kluster för att avgöra ett lämpligt val av k, där k är antalet kluster [12].

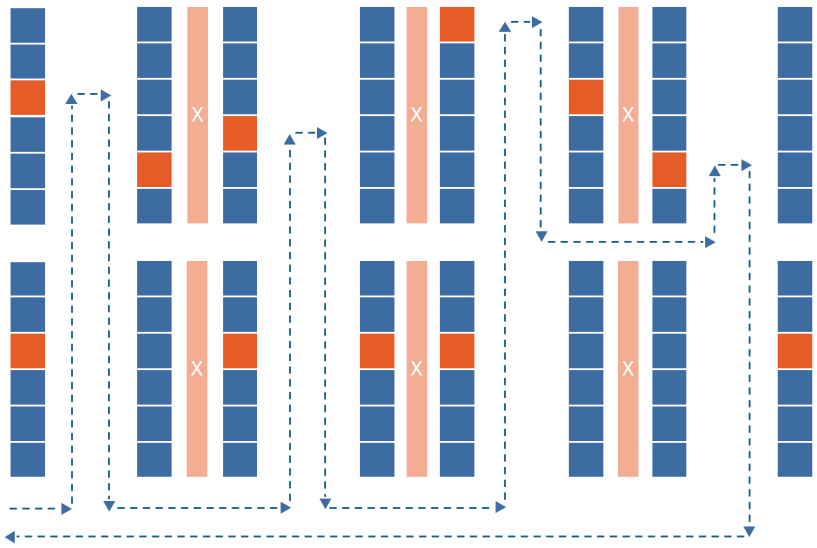
3.2 Rutteorier

Då plockarna på lagret bestämmer rutterna själva och styrs enbart till rätt plockplats så går det inte att genomföra en ruttoptimering. Däremot kan man till en viss grad styra rutterna genom att optimera artikelplaceringarna utifrån olika ruttpolicys. Därmed presenteras det i detta avsnitt olika teorier och strategier för plockrutter inom lagerverksamhet som sedan används i studien för att utforska om det finns effektivare sätt att plocka på.

3.2.1 Returpolicy

Returpolicy innebär att plockaren utgår från en tvärgång i början av lagret och går in i och ut ur respektive gång från den tvärgången. Plockaren går endast in i en gång om det finns artiklar att plocka där och går endast så djupt som den längst bort belägna artikeln som ska plockas [13].

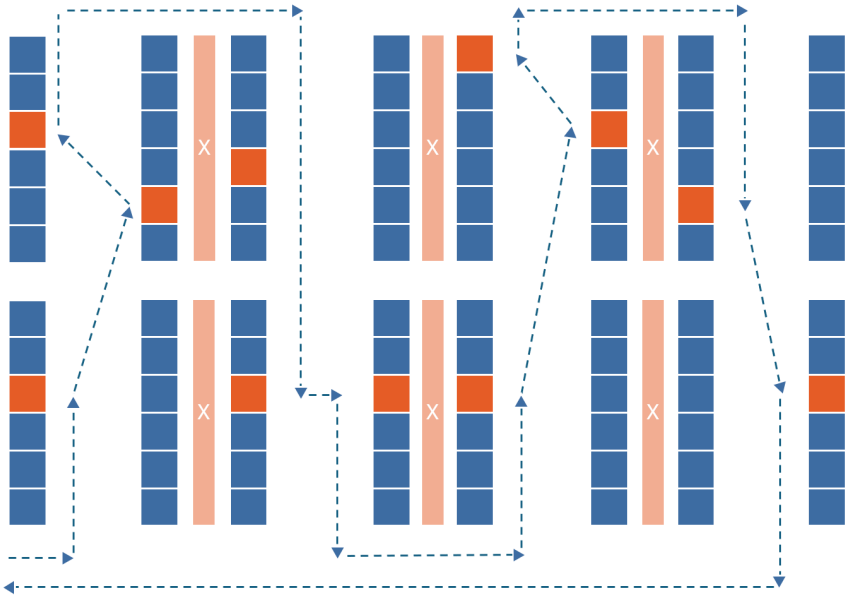
En liknande strategi tillämpas vid Norrmejerier i dagsläget. Skillnaden är att lagret även har en tvärgång i mitten samt en i slutet, vilka kan utnyttjas för att korta gångvägen när det är möjligt. Strategin kan därför beskrivas som en modifierad returpolicy där flera tvärgångar möjliggör kortare rutter genom lagret. Se Figur 3.1 för visualisering av en order som plockas med denna policy.



Figur 3.1: Figuren visar en schematisk bild över hur returpolicy fungerar på Norrmejerier. Kvadraterna visar artiklar på lagret där de orangea ingår i ordern som ska plockas, de blå inte. De streckade pilarna visar plockrutten för att plocka alla artiklar i ordern. Rätblocken som är markerade med ett X representerar påfyllnadsytor där plockarna inte får röra sig.

3.2.2 Z-plock

Z-plock är en plockstrategi inom manuell orderplockning för parallella plockställage. Strategin innebär att plockaren går igenom gångarna mellan ställagen i ett sicksackmönster eller Z-format för varje par av ställage. Till skillnad från vanlig returpolicy, där plockaren vänder tillbaka i samma gång, går Z-plock igenom gången endast en gång. Detta minskar antalet vändmoment och kan reducera den totala gångsträckan vid hög plockdensitet i gångarna enligt Hsieh och Tsai [14]. Z-plock är också särskilt effektivt i lager med tvärgångar eftersom detta möjliggör smidiga övergångar mellan de olika plockgångarna. Se Figur 3.2 för visualisering av en order som plockas med Z-plock.

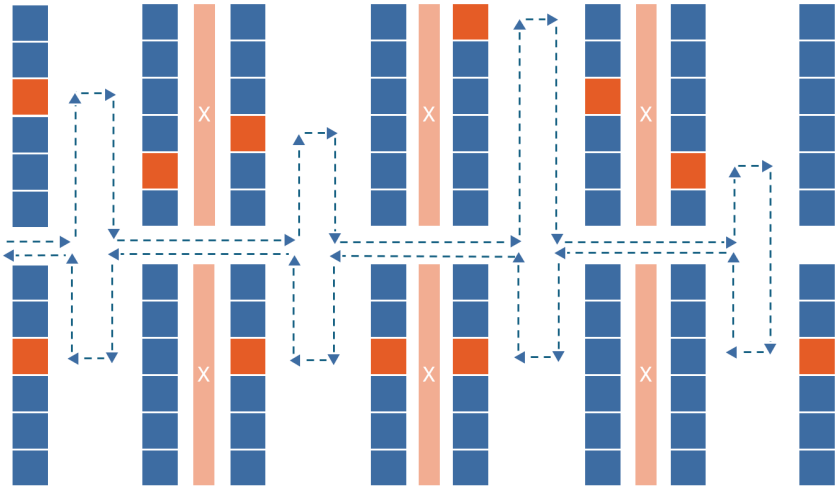


Figur 3.2: Figuren visar en schematisk bild över hur Z-plock skulle fungera på Norrmejerier. Kvadraterna visar artiklar på lagret där de orangea ingår i ordern som ska plockas, de blå inte. De streckade pilarna visar plockrutten för att plocka alla artiklar i ordern. Rätblocken som är markerade med ett X representerar påfyllnadsytor där plockarna inte får röra sig.

Vidare undersöks även en variant av Z-plock som i denna studie benämns KPV-batchning. KPV-batchning innebär att plockaren hanterar två KPV-vagnar under samma plockrunda, och därmed plockar två ordrar simultant. Detta är möjligt eftersom truckens gafflar rymmer två KPV-vagnar, en på vardera gaffel. Varianten utvärderas endast för Z-plock, eftersom plockaren vid batchning behöver kunna röra sig runt trucken för att lasta varor i den andra vagnen. Detta bedöms vara praktiskt genomförbart i ett enkelriktat plockflöde, såsom Z-plock, men inte i de tvåriktade ruttstrategierna returplock och mittgångsplock.

3.2.3 Mittplock

Ruttstrategin liknar en returpolicy men där utgångspunkten är flyttad till tvärgången i mitten av lagret, vilket delar upp rutten i två segment. Plockaren går in i en gång endast om en artikel i ordern finns där och återvänder därefter tillbaka till tvärgången. Plocket genomförs först i gångarna på den övre sidan av tvärgången, sedan vänder plockaren och fortsätter plocket i gångarna på den nedre sidan av lagret. Strategin gör det möjligt att utnyttja den centrala tvärgången som utgångspunkt för plocket och kan därmed minska onödiga gångsträckor i lagret, se Figur 3.3.



Figur 3.3: Figuren visar en schematisk bild över hur mittplock skulle fungera på Norrmejerier. Kvadraterna visar artiklar på lagret där de orangea ingår i ordern som ska plockas, de blå inte. De streckade pilarna visar plockrutten för att plocka alla artiklar i ordern. Rätblocken som är markerade med ett X representerar påfyllnadsytor där plockarna inte får röra sig.

3.3 Tilldelningsproblemet

Tilldelningsproblemet (TP) avser problemet att på ett optimalt sätt etablera en matchning mellan n agenter och n uppgifter. I sin ursprungliga formulering betraktas en ett-till-ett-tilldelning, där varje agent tilldelas exakt en uppgift, med målsättningen att minimera de totala kostnaderna som är associerade med tilldelningen.

För att formulera modellen introduceras följande notation:

Notation (TP)

Mängder

I: mängd agenter J: mängd uppgifter

Parametrar

c_{ij}: kostnad för att tilldela agent i till uppgift j

Beslutsvariabler

$x_{ij} \in \{0, 1\}$: 1 om agent i tilldelas uppgift j, annars 0

Tilldelningsproblemet kan formuleras på följande sätt:

$$\min \quad \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij} \tag{3.10}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1, \quad j = 1,\ldots,n, \tag{3.11}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1, \quad i = 1,\ldots,n, \tag{3.12}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad i,j = 1,...,n \tag{3.13}$$

Målfunktionen (3.10) minimerar den totala kostnaden för tilldelning av agenter i till uppgifter j. Bivillkoren (3.11) och (3.12) säkerställer att varje agent tilldelas exakt en uppgift och att varje uppgift tilldelas exakt en agent. Variabeln x_{ij} antar värdet 1 om agenten i tilldelas uppgiften j, annars 0, och c_{ij} betecknar kostnaden för denna tilldelning [15].

I denna studie har artiklarna rollen som agenter i och plockplatser rollen som uppgifter j. Dessutom har kyllagret på Norrmejerier för närvarande fler plockplaters än artiklar, vilket innebär att vissa plockplatser kan vara tomma. I detta sammanhang återspeglas det genom att varje artikel tilldelas exakt en plockplats, medan plockplatser inte nödvändigtvis behöver tilldelas någon artikel. Modellen modifieras därmed till n artiklar och m plockplatser, där $n \leq m$. Problemet omformuleras då enligt följande:

$$\min \quad \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}x_{ij} \tag{3.14}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{n} x_{ij} \leq 1, \quad j = 1,\ldots,m, \tag{3.15}$$

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij} = 1, \quad i = 1,\ldots,n, \tag{3.16}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad i = 1,...,n, \quad j = 1,...,m. \tag{3.17}$$

Här bevaras målfunktionen (3.14) som i tidigare problem samt bivillkor (3.16), vilket betyder att alla artiklar måste tilldelas en plats. Däremot ändras bivillkor (3.15) till att varje plockplats inte behöver tilldelas en artikel. Som tidigar så antar variabeln x_{ij} värdet 1 om artikeln i tilldelas platsen j, annars 0, och c_{ij} betecknar kostnaden för denna tilldelning.

3.4 Lagerplaceringsproblemet

Lagerplaceringsproblemet (SLAP) syftar till att effektivisera orderplockning genom att tilldela artiklar till plockplatser på ett sätt som minimerar operationskostnader, vanligtvis genom att reducera plockdistanser [16]. SLAP tillhör familjen av Tilldelningsproblem och bygger på formuleringen i Avsnitt 3.3, men utökas med ytterligare faktorer såsom plockfrekvenser, samplockningsmönster och lagerhållningskrav [17].

Enligt Pan, Shih och Wu [18] kan SLAP delas in i olika kategorier, där volymbaserad placering är en av de vanligaste. Denna princip innebär att artiklar tilldelas plockplatser baserat på deras orderfrekvens och

lagringsbehov, ofta uttryckt genom COI (Cube-Per-Order Index). Målet är att placera artiklar med lågt COI nära startpunkten. COI definieras som kvoten mellan en artikels lagringsutrymme och dess orderfrekvens [18]. I denna studie antas varje artikel uppta exakt en plockplats, vilket innebär att lagringsutrymmet är konstant för alla artiklar. Därmed reduceras COI till en rangordning baserad enbart på orderfrekvens, vilket innebär att artiklar med hög frekvens prioriteras nära startpunkten. Målfunktionen kan därmed formuleras som i (3.14), där kostnaden c_{ij} ersätts av produkten $f_i d_j$, det vill säga orderfrekvens f_i för artikel i multiplicerat med avstånd d_j från startpunkt till plats j.

I ett lagersammanhang innebär övergången från det klassiska tilldelningsproblemet till lagerplaceringsproblemet att modellen anpassas från en generell matematisk struktur till en mer verklighetsnära kontext. Vidare tillkommer strukturella begränsningar som inte finns i det klassiska tilldelningsproblemet. I denna studie inkluderas krav kopplade till sekundärförpackning, där artiklar grupperas och måste placeras i en förutbestämd ordning, se Figur 1.3. Det innebär att modellen inte enbart kan baseras på placering utifrån frekvens och avstånd till start utan dessutom måste se till att grupperna hålls ihop och kommer i rätt ordning enligt vald ruttstrategi. På begäran av Norrmejerier har sekundärförpackning 1 placerats avskilt från övriga sekundärförpackningar. Artiklar inom denna kategori är låsta till ställ 28, och inga andra sekundärförpackningar tillåts placeras där. Dessutom noterades ett stort överskott av plockplatser i förhållande till artiklar vilket ledde till beslutet att minska mängden tillåtna ställ genom att inte tillåta placeringar i de bortersta ställen 20 och 21. Dessa begränsningar gör att problemet inte längre enbart handlar om oberoende tilldelningar, utan även om att säkerställa en global struktur i lösningen.

Därav kan modellen ses som en utvidgning av tilldelningsproblemet där både målfunktion och bivillkor anpassas för att bättre representera de praktiska förutsättningarna i ett lager. Notationerna från tilldelningsproblemet i Avsnitt 3.3 används fortsatt. Nedan introduceras kompletterande notationer för den utökade modellen samt nya strukturella bivillkor.

Notation (SLAP)

Mängder

$G = \{1_1, 1_2, 2_1, 2_2, 3_1, 3_2, 4_1, 4_2, 5_1, 5_2\}$: Sekundärförpackningar indelat i kluster

$I_g \subseteq I$: artiklar i grupp g, $\quad g \in G$

$J_{20} \subseteq J$: platser i ställ 20, $\quad J_{21} \subseteq J$: platser i ställ 21, $\quad J_{28} \subseteq J$: platser i ställ 28

Parametrar

f_i: plockfrekvens för artikel i, $\quad d_j$: kostnad för plats j (baserad på avstånd till start)

o_j: platsens givna ordning i plockrutten, $\quad M$: stor konstant (Big-M)

Beslutsvariabler

e_g, l_g: första respektive sista position för grupp g

$x_{ij} \in \{0, 1\}$: 1 om artikel i tilldelas plockplats j, annars 0

Modellen kan därefter formuleras enligt följande:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_i \, d_j \, x_{ij} \tag{3.18}$$

Strukturbivillkor

$$l_g - e_g + 1 \geq |I_g|, \quad g \in G \tag{3.19}$$

$$e_g \leq o_j + M(1 - x_{ij}), \quad g \in G,\ i \in I_g,\ j \in J \tag{3.20}$$

$$l_g \geq o_j - M(1 - x_{ij}), \quad g \in G,\ i \in I_g,\ j \in J \tag{3.21}$$

$$l_g + 1 \leq e_{g+1}, \quad g = 1, \ldots, 5 \tag{3.22}$$

$$\sum_{j \in J_{28}} x_{ij} = 1, \quad i \in I_1 \tag{3.23}$$

$$\sum_{j \in J_{28}} x_{ij} = 0, \quad i \notin I_1 \tag{3.24}$$

$$\sum_{j \in J_{20}} x_{ij} = 0, \quad i \in I \tag{3.25}$$

$$\sum_{j \in J_{21}} x_{ij} = 0, \quad i \in I \tag{3.26}$$

Beskrivning av bivillkor

- (3.19) Säkerställer att varje grupp tilldelas ett sammanhängande intervall av platser i plockordningen som är tillräckligt stort för att rymma samtliga artiklar i gruppen.
- (3.20)–(3.21) Kopplar varje artikels placering till gruppens intervall i plockordningen. Om artikel i placeras på plats j, tvingas dess position ligga inom intervallet $[e_g, l_g]$.
- (3.22) Säkerställer att grupperna placeras i en strikt ordning i plockrutten, där varje grupp g föregår grupp $g + 1$.
- (3.23)–(3.24) Säkerställer att alla artiklar i grupp 1 placeras i ställ 28, samtidigt som andra artiklar förhindras från att placeras där.
- (3.25)–(3.26) Förhindrar att artiklar placeras i ställ 20 och 21.

I klassiska formuleringar syftar SLAP till att minimera den förväntade gångsträckan i en miljö med en plockare. I lager med flera plockare är dock minimering av gångsträcka inte tillräckligt, eftersom trängsel och blockering mellan plockare kan uppstå. I sådana miljöer ändras därför målfunktionen till att minimera den förväntade totala plockruttstiden [18]. SLAP tillhör klassen NP-svåra problem, vilket innebär att ingen känd algoritm kan garantera en optimal lösning i polynomiell tid för alla instanser. När modellen utökas till att inkludera beroenden mellan artiklar leder detta till en kraftigt ökad beräkningskomplexitet. Därför används ofta heuristiska och multi-stage heuristiker för att hantera problemet [17]. Med detta i åtanke hanteras problemet i denna studie med Simulated Annealing.

3.5 Simulated Annealing

I denna studie används simulated annealing (SA) som en metaheuristisk optimeringsmetod för att förbättra layouter i plocklagret genererade av tidigare teorier hos Norrmejerier. Metoden används för att söka efter en bättre artikelplacering i kyllagret som minimerar den total plocktiden givet de fasta restriktionerna och insamlad orderdata.

Algoritmen härstammar från den fysikaliska processen annealing inom metallurgi, där ett material hettas upp och sedan kyls ned långsamt för att nå ett stabilt energiminimum. Inom optimering så introducerades metoden av Kirkpatrick, Gelatt och Vecchi [19] som visade att en probabilistisk acceptansmekanism kan användas för att lösa diskreta optimeringsproblem.
Idén med SA är att tillåta försämringar av den nuvarande lösningen med en viss sannolikhet, speciellt i den tidigare fasen av sökprocessen. Detta gör att algoritmen kan undvika att fastna i lokala optimum vilket istället möjliggör sökning av större delar av lösningsrymden.

Nuvarande lösning är den aktuella layouten s med målfunktionsvärde $f(s)$ där målfunktionen definieras som den genomsnittliga totala plocktiden per order över alla simulerade ordrar. En grannlösning s' genereras genom en mindre förändring i layouten, exempelvis genom att två artiklar inom samma sekundärförpackning byter plats. Kostnadsförändringen definieras som

$$\Delta = f(s') - f(s). \tag{3.27}$$

Om $\Delta \leq 0$ accepteras den nya lösningen alltid. Om $\Delta > 0$ genereras ett slumptal $r \sim \mathcal{U}(0,1)$ och lösningen accepteras om

$$r \leq \exp\left(-\frac{\Delta}{\theta}\right), \tag{3.28}$$

där θ är temperaturparametern. Denna acceptansregel innebär att även sämre lösningar kan accepteras tidigt i processen, vilket möjliggör global utforskning. När temperaturen successivt kyls ner blir algoritmen mer fokuserad på lokal förbättring. Temperaturen uppdateras enligt ett geometriskt kylschema

$$\theta_{k+1} = \alpha\theta_k,$$

där $\alpha \in (0,1)$ styr nedkylningshastigheten. Parametrarna θ_0 och α påverkar balansen mellan utforskning och konvergenshastighet.

För att kunna tillämpa simulated annealing krävs en objektfunktion som kan kvantifiera lösningen. I detta projekt baseras objektfunktionen på den totala plocktiden, vilket tar hänsyn till både gångtid och väntetid som kan uppstå till följd av trängsel i kyllagret.
Objektfunktionen definieras enligt följande:

$$T = T_{\text{gång}}(x) + T_{\text{plock}}(x) + T_{\text{väntan}}(x) \tag{3.29}$$

där:

- $T_{\text{gång}}(x)$ betecknar den gångtid som genereras av gångsträckan i lagret,
- $T_{\text{plock}}(x)$ representerar den faktiska plocktiden,
- $T_{\text{väntan}}(x)$ beskriver väntetid till följd av trängsel.

4 Metod

4.1 Modellstruktur

Med utgångspunkt i SLAP:s komplexitet som presenterades i teorin tillämpas i denna studie en heuristisk metod uppdelad i flera steg. Metoden dekomponerar problemet i tre huvudsakliga steg: klustring

och sortering, initial placering samt simuleringsbaserad förbättring, vilka löses sekventiellt. Dessa innefattar strukturella beslutsfaser, där varje fas syftar till att reducera problemets komplexitet och etablera en genomförbar lösningsstruktur.

Steg 0: Datainsamling

Innan modellen konstrueras genomförs en systematisk datainsamling. Syftet med datainsamlingen är att samla in relevant information om plockordrar, tidsstudier samt faktiska mått och strukturer i lagret. Den insamlade datan bearbetas därefter genom filtrering och omstrukturering, så att endast den information som är nödvändig för modelleringen återstår. I det avslutande steget genomförs en klustringsanalys i syfte att identifiera mönster och grupperingar i plockorderdatan.

Steg 1: Klustring

I det första steget grupperas artiklar baserat på samplockfrekvens och artiklar klassificeras efter stapelbarhet. Syftet är att identifiera artiklar som ofta förekommer tillsammans i ordrar och därmed bör placeras geografiskt nära varandra.

Steg 2: Initial placering

Därefter genereras en initial lagerlayout där kluster, definierade i det tidigare steget, tilldelas specifika lagerzoner. Inom varje zon placeras artiklar genom att prioritera hög plockfrekvens och kort avstånd till startpunkten. På så sätt säkerställs att frekventa artiklar placeras i mer lättillgängliga positioner. Sekundärförpackningskrav och klasser implementeras som hårda restriktioner i modellen.

Steg 3: Metaheuristisk förbättring

I detta steg förbättras layouten genom att artiklars placering byts iterativt, där varje förändring utvärderas med avseende på den simulerade totala plocktiden enligt Ekvation 3.29.

Ruttmetoder och jämförelse

För att analysera hur val av ruttstrategi påverkar lagringsplanens effektivitet tillämpas modellen separat för olika ruttmetoder som presenterades i teorin.
Ruttmetoden påverkar artikelplaceringen samt beräkningen av gångtid och därmed den totala målfunktionen T. För varje ruttmetod genomförs den multi-stage heuristiska processen, exklusive klustring, alltså initial placering och metaheuristisk förbättring. Detta innebär att lagringslayouten optimeras med avseende på respektive ruttstrategi.

4.2 Datainsamling

Datainsamlingen har genomförts genom insamling av orderdata och artikelinformation från Norrmejeriers interna system. Dessa utgjordes utav två excelfiler *Artikelinfo* och *Orderdata*. Informationen har kompletterats med observationer av plockprocessen i kyllagret samt intervjuer med lagerpersonal.

Lager layout

För att möjliggöra modellering och simulering av kyllagret genomfördes manuella uppmätningar av lagrets layout. Dimensioner som gångar, hyllor och plockplatser mättes på plats i lagret, och antalet hyllställ och plockplatser räknades.

Tidsstudie
Tidsstudier genomfördes där följande tidskomponenter mättes:

- **Förflyttningstid:** Tid för gång mellan två plockpositioner längs lagrets gångar.
- **Stopp- och starttid:** Tidsförlust vid inbromsning och acceleration i samband med hinder eller förändringar i rörelseriktning.
- **Svängtid:** Extra tid som uppstår vid riktningsändringar i korsningar.
- **Plocktid:** Tid för att lokalisera artikeln, utföra plockmomentet och placera artikeln på pallen.
- **Tid mellan slut och start på order:** Tiden det tar från att en order har plockats färdigt tills en ny order påbörjas.

Under tidsstudien genomfördes upprepade tidtagningar för varje enskild tidskomponent. Detta gjordes för att minska inverkan av enskilda avvikelser och därigenom erhålla ett mer tillförlitligt och stabilt genomsnittligt mått.
Värt att notera är att tidsmätningarna baseras på ett begränsat antal observationer och syftar till att ge en rimlig approximation snarare än exakta tidsvärden. Denna information användes för att parametrisera lagermodellerna och skapa verklighetstrogna simuleringar.

4.2.1 Databearbetning

Efter datainsamlingen genomfördes databearbetning i syfte att säkerställa att materialet var korrekt strukturerat och anpassat för efterföljande analys och modellering. Eftersom datamaterialet utgjordes av Excelfiler utfördes bearbetningen direkt i detta format.

Filtrering och formatering
Inledningsvis filtrerades datamaterialet så att enbart de artiklar som omfattades av studiens avgränsningar inkluderades. Detta omfattade de artiklar som manuellt plockats och tillhandahålls i kyllagret. Därefter formaterades datan till enhetliga format, exempelvis genom att ta bort överflödiga mellanrum, konvertera till rätt datatyper och säkerställa konsekventa benämningar. Sen behövdes en artikels antal korrigeras då de hade 6 gånger för stora värden, de paketeras i 6-pack men stod som individuella förpackningar.

Komplettering av saknad data
Artikelinformationen kompletterades manuellt genom att saknade uppgifter om artikelplacering fylldes i, baserat på en inventering av aktuella artiklar i kyllagret. Därefter tillfördes en variabel i form av kolumnen ”sekundärförpackning”, vilken representerar artiklarnas stapelbarhet. Artiklarna rangordnades där från 1 till 5 utifrån i vilken ordning de får placeras på pall vid plockning. Värdet 1 indikerar att artikeln ska placeras underst, medan värdet 5 anger att den ska placeras överst, se Figur 1.2.

Tidsstudie
Ett aritmetiskt medelvärde beräknades utifrån observationerna från respektive tidsstudie för att användas

i modellerna och simuleringarna. Avsaknaden av variationsmått i modellerna motiverades av behovet av fasta parametrar för att möjliggöra en tydlig och jämförbar analys mellan de olika scenarierna.

4.3 Klustringsanalys

I klustringsanalysen representerades varje artikel som en binär vektor baserad på dess förekomst i plockrundor. Detta resulterade i en artikel–plockrunda-matris där värdet 1 indikerar att artikeln förekommer i en given plockrunda och 0 annars. Representationen möjliggör analys av samplockningsmönster mellan artiklar. Ett förenklat exempel på en sådan matris visas i Matris 4.1.

$$A = \begin{array}{c|cccccc} & R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & R_5 & \cdots R_M \\ \hline Artikel_1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots \\ Artikel_2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ Artikel_3 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & \cdots \\ Artikel_4 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & \cdots \\ Artikel_5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ Artikel_N & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{array} \tag{4.1}$$

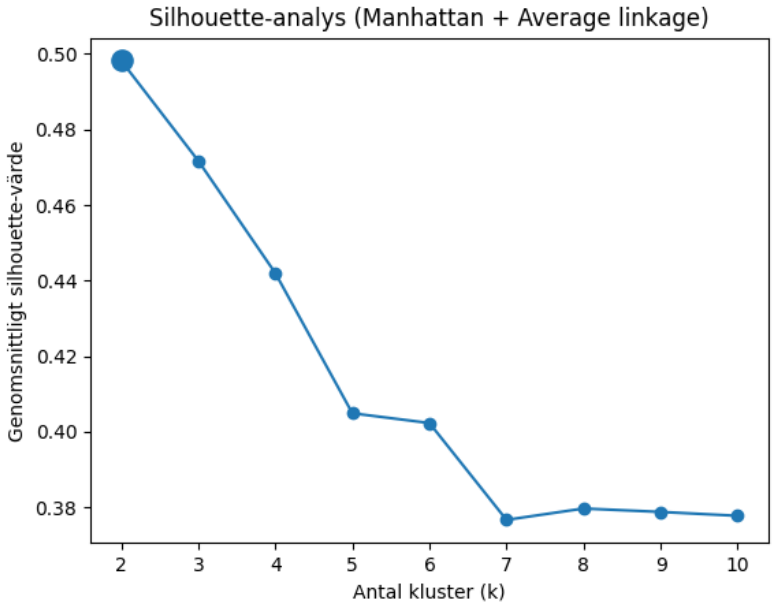
Här representerar raderna artiklar och kolumnerna plockrundor. En etta indikerar att artikeln förekommer i den aktuella plockrundan medan en nolla indikerar frånvaro. Matrisrepresentationen gör det möjligt att analysera vilka artiklar som ofta plockas tillsammans, vilket utgör grunden för klustringsanalysen.
Nästa steg var att undersöka hur valet av avståndsmått påverkar den resulterande klusterstrukturen. En empirisk jämförelse genomfördes mellan de tre avståndsmått som behandlats i teoridelen: Jaccard-, Manhattan- och Euklidiskt avstånd. För respektive avstånd testades agglomerativ hierarkisk klustring med länkningsmetoderna single, complete och average. Antalet kluster varierades inom intervallet $2 \leq k \leq 10$. Varje kombination av avståndsmått, länkningsmetod och antal kluster utvärderades med hjälp av det genomsnittliga silhouette-värdet.

Tabell 4.1 visar de fem klusterlösningar som uppvisade högst silhouette-värde. Samtliga toppresultat erhölls med Manhattan-avstånd, där kombinationen Manhattan och average linkage med $k = 2$ gav det högsta värdet (0.498).

Tabell 4.1: Topp 5 klusterlösningar enligt silhouette-värde

Avstånd	**Länkning**	k	**Silhouette**
Manhattan	Average	2	0.498
Manhattan	Average	3	0.472
Manhattan	Single	2	0.468
Manhattan	Single	3	0.455
Manhattan	Average	4	0.442

Figur 4.1 visar silhouette-värdet som funktion av antal kluster för Manhattan-avstånd med average linkage. Det framgår att värdet är maximalt vid $k = 2$ och därefter minskar monotont med ökande antal kluster. Detta indikerar att en tvåklusterlösning ger den tydligaste separationen enligt silhouette-kriteriet.



Figur 4.1: Silhouette-värde som funktion av antal kluster k för Manhattan-avstånd med average linkage.

Den klustringslösning som valdes för vidare analys var Manhattan-avstånd med average linkage och $k = 2$. Resultatet användes därefter för layoutgenerering för vidare användning. Klustringalgoritmerna implementerades i Python med hjälp av de befintliga biblioteket *scikit-learn* där funktionen `AgglomerativeClustering` användes för den hierarkiska klustringen och `silhouette_score` för utvärdering av kluster.

Eftersom stapelbarhet utgör en begränsning i plockordning och därmed lagerlayouten, genomfördes även en gruppvis klustringsanalys. Syftet med den var att undersöka om klusterstrukturen skiljer sig inom varje stapelbarhetsklassning/sekundärförpackning.

Den empiriska jämförelsen upprepades därför separat inom varje sekundärförpackningsgrupp med samma parametrisering: Jaccard-, Manhattan- och Euklidiskt avstånd i kombination med single, complete och average linkage samt $2 \leq k \leq 10$.

Tabell 4.2 visar den bästa klusterlösningen inom respektive sekundärförpackning enligt silhouette-kriteriet. Resultaten visar att Manhattan-avstånd gav högst silhouette-värde inom samtliga sekundärförpackningar. Med högst separation genomgående vid $k = 2$.

Tabell 4.2: Bästa klusterlösning per sekundärförpackning enligt silhouette-värde

Sekundärf	Avstånd	Länkning	k	Silhouette
1	Manhattan	Complete	2	0.339
2	Manhattan	Complete	2	0.501
3	Manhattan	Complete	2	0.261
4	Manhattan	Complete	2	0.373
5	Manhattan	Average	2	0.509

Silhouette-värdena varierade mellan cirka 0.26 och 0.51 beroende på sekundärförpackning, vilket indikerar att vissa grupper uppvisar en tydligare tvådelad struktur än andra. Vad gäller länkningsmetod observerades endast marginella skillnader i silhouette-värde mellan single, complete och average linkage inom respektive sekundärförpackning. I flera fall uppnåddes identiska eller nästintill identiska värden vid $k = 2$. Detta visar att valet av avståndsmått har större påverkan på klusterstrukturen än valet av länkningsmetod. Detta stärker valet av Manhattan-avstånd och $k = 2$ som grund för lagerlayouten.

Pseudokod

Algorithm 1 Artikelklustring för generering av initial lagerlayout

for varje sekundärförpackning g **do**
  Konstruera artikel–plockrunda-matris A_g
  for distansmått $d \in \{\text{Jaccard, Manhattan, Euclidean}\}$ **do**
    for länkningsmetod $l \in \{\text{single, complete, average}\}$ **do**
      for $k = 2, \ldots, 10$ **do**
        Utför hierarkisk klustring med (d, l, k)
        Beräkna silhouette score
      end for
    end for
  end for
  Välj parameterkombination (d^*, l^*, k^*) med högst silhouette score
  Tilldela artiklar i grupp g till kluster enligt (d^*, l^*, k^*)
end for
Generera lagerlayout s baserat på alla erhållna kluster
return initial layout s

4.4 Modell initial placering

Inledningsvis används de identifierade klustren från föregående steg för att placera ut artiklarna i lagret och därigenom generera en initial lagerlayout. Lagerlayouten formuleras som ett heltalsoptimeringsproblem baserat på SLAP-modellen i Avsnitt 3.4. Modellen implementeras i Python med hjälp av optimeringsbiblioteket PuLP och löses med CBC-solvern. CBC är en heltalsprogrammeringslösare som bygger på branch-and-bound och branch-and-cut, där problemet först löses som en linjär relaxation och därefter delas upp i delproblem [20].

4.4.1 Datainläsning

Indatan till placeringsmodellen består av två filer där den ena är klusterfilen, som innehåller stapelbarhet, kluster och frekvens, samt en platsfil som anger avstånden mellan de olika plockplatserna och i vilken ordning dessa plockplatser ska komma. Avstånden för plockplatserna är beräknade med Manhattan-avstånd.

4.4.2 Modelluppbyggnad

Vid implementeringen inkluderas även ett antal restriktioner som inte explicit beskrivs i teoriformuleringen. Dessa avser begränsningar i att endast sekundärförpackning 1 får placeras i ställ 28, med motiveringen

att Norrmejerier vill ha dem avskilt från övriga artiklar. Dessutom tillåts inga artiklar placeras i ställ 20 och 21 för att komprimera lösningen och är möjligt då artikelmängden är mindre än antalet plockplatser. Startpunkten har även flyttats i detta steg från ställ 20, plockplats 0 till ställ 28, plockplats 0. Detta gjordes på grund av att den dator som plockarna hämtar ordrar ifrån befinner sig vid ställ 28. Vidare säkerställs att den struktur som identifierats i klustringssteget beaktas i optimeringen, genom att artiklar inom samma grupp behandlas gemensamt i modellen.

Samtliga beslutsvariabler och bivillkor implementeras direkt i optimeringsverktyget, varefter modellen löses för att generera en initial tilldelning av artiklar till plockplatser. Givet problemets storlek och komplexitet garanteras inte optimalitet utan en tidsgräns på 24 000 sekunder som har satts. Resultatet struktureras sedan i en tabell där varje artikel, med tillhörande egenskaper, kopplas till sina tilldelade plockplatser.

Ingen efterallokering eller manuella justeringar av lösningen genomförs efter optimeringen. Detta innebär att den erhållna layouten direkt motsvarar lösningen från optimeringsmodellen. De genererade layouterna används som indata till den simuleringsmodell som beskrivs i senare avsnitt.

4.5 Simuleringsmodell

Simuleringsmodellen är uppbyggd utifrån den nuvarande layouten av Norrmejeriers kyllager och plockprocess, som beskrivs i Avsnitt 1.1, och har som mål att återspegla verkligheten så nära som möjligt. Simuleringen omfattar hela plockflödet, från att en medarbetare hämtar en order i datorn tills pallen är inslagen i plast och levererad till korrekt port. Kärnan i simuleringen är plockprocessen där anställda kör runt mellan ställen och plockar de artiklar som innefattas av en order. Den delen är baserad på en verklighetsförankrad graf med gångar, tider och avstånd som har mätts upp. Tiden utanför ställen fångas upp genom en overhead time. I simuleringen är ordrar genererade utifrån historisk orderdata. Modellen är skapad i Python, för att enkelt kunna överlämnas till Norrmejerier.

4.5.1 Simuleringsbeskrivning

Simuleringsmodellen bygger på en riktad graf som skapades utifrån kartläggningen och datainsamlingen som gjordes tidigare i projektet, se Avsnitt 4.2. Riktningen på grafens kanter anpassas efter vilken ruttpolicy som ska simuleras, och görs genom att användaren väljer i en meny vilken policy som ska användas, se Figur 3.1, 3.2 och 3.3 för de olika graferna. I simuleringen genereras ordrar efter historisk orderdata som matas in genom en excelfil, där artikelnummer, ordernummer och kvantiteter anges. Frekvensen på ordrar som genereras baseras på tillgängliga plockare och när en plockare har plockat klart en order startas nästa order. Antalet plockare är satt till X, men kan enkelt korrigeras i koden. Vid start av simulering startar plockarna på ett intervall av 15 sekunder, för att representera verkligheten. Simuleringen tar in en excellayoutfil, som väljs i menyn, som ska representera den önskade artikelplaceringen som ska utvärderas. Denna fil ska innehålla kolumnerna: *Artikel* som motsvarar artikelnr, *Ställ* som motsvarar plockställ, *Plock X* som motsvarar plockplats i plockställen och *Sekundärf* som motsvarar sekundärförpackningen som artikeln har.

När filerna och inställningarna är valda, startas simuleringen. Plockordningen styrs av grafen, vald plockpolicy och sekundärf. När plockordningen för en order skapas, kallar den på en funktion som först prio-

riterar efter sekundärf, 1-5 , där 1 är de artiklar som måste plockas först och 5 de som måste plockas sist, se Avsnitt 1.1. Därefter väljer funktionen prioritering inom dessa prioriteringar baserat på var artikeln är placerad i lagret, enligt vald ruttpolicy. Om retur-plock har valts, så prioriteras första stället högst, följt av andra stället i fallande ordning. Om Z-plock valts så följer prioriteringen ett sicksack-mönster mellan de parvisa ställen. Första och andra stället prioriteras först med plockplatser i en stigande ordning, sen det tredje och fjärde stället med plockplatser i en fallande ordning, osv. Se avsnitt 3.4.1, figur 4 och 5. Simuleringen kör sedan igenom alla ordrar i orderfilen.

Köbildning

Köbildning kan uppstå i kyllagret när flera plockare samtidigt efterfrågar samma artikel och har därför modellerats i simuleringen. Varje plockplats kan betjäna maximalt en plockare åt gången, om flera plockare anländer till samma plats innan den är ledig uppstår en kö. Kösystemet implementeras enligt principen First-In, First-Out (FIFO), vilket innebär att den plockare som anländer först också påbörjar plockningen först. Efterföljande plockare placeras i kö och deras plockstart fördröjs tills platsen blir tillgänglig, denna tid mäts och sparas som *Kötid*.

Eftersom gångarna i lagret är tillräckligt breda för att truckar ska kunna passera varandra modelleras ingen blockering i gångsystemet. En plockare som väntar vid en plockplats hindrar således inte andra plockare från att passera. Köbildning uppstår därmed enbart vid själva plockplatsen och inte i gångnätverket.

Utdata

Simuleringen kvantifierar genomloppstiden för orderplock, från det att en order initieras till dess att den är fullt plockad och transporterad till lastområdet. Den totala ordertiden delas upp i tre komponenter: gångtid, plocktid och väntetid. Dessa tidskomponenter registreras kontinuerligt under simuleringens körning och sammanställs efter avslutad körning som medelvärde, median, standardavvikelse samt olika percentiler.

Därutöver beräknas andelen ordrar som påverkas av väntetid, vilket ger en indikation på frekvensen av köbildning i systemet. Som produktivitetsindikatorer används vidare antalet plockrader per timme och plockare, beräknat utifrån totalt antal plockrader och makespantid (tid tills alla ordrar är klara). Samtliga nyckeltal rapporteras till användaren för vidare analys. Simuleringen har utförts för samtliga studerade layoutkonfigurationer och ruttpolicys.

4.5.2 Bekränsningar med simuleringen

Eftersom modellen avser att efterlikna en komplex lagerprocess som dessutom innefattar mänskliga beslut uppstår ett antal begränsningar. Simuleringen är deterministisk och statisk i den meningen att dess output enbart baseras på givna parameterinställningar och indatafiler. När dessa är fastställda, sker inga förändringar under körningens gång. Förändringar som kan uppstå i verkligheten fångas därmed inte upp av modellen.

Flera av modellens parametrar, exempelvis gång- och plocktider, baseras på manuella tidsstudier. Sådana mätningar innehåller en viss osäkerhet, vilket innebär att de använda parametrarna kan avvika från den

faktiska tidsåtgången som i sin tur kan påverka simuleringens tidsresultat. Eftersom plock sker med både truck och till fots, är hastigheten som personalen rör sig i endast ett snitt.

Vidare inkluderas enbart plocktruckar i gångsystemet. Påfyllnadstruckar modelleras inte som aktiva i simuleringen. I den faktiska lagerdriften kan dessa påverka plockprocessen på tre huvudsakliga sätt. För det första kan en plockplats temporärt vara otillgänglig under pågående påfyllnad. För det andra uppstår ytterligare trafik i lagret. Även om påfyllnad sker i separata gångar korsar dessa plockgångarna vid tvärgången i mitten av lagret, se Figur 1.1. Plocktruckar har vanligtvis företräde, men i praktiken kan avvikelser från denna prioritering leda till tillfälliga störningar. För det tredje inkluderas inte raster i modelleringen. Dessa effekter modelleras inte, vilket kan innebära att simuleringen underskattar den faktiska graden av störningar.

Den största begränsningen är dock den mänskliga faktorn. Plockare fattar kontinuerligt egna beslut baserat på olika situationer. Plockare går även på toaletten eller stannar för att prata med en kollega eller liknande, vilket inte modelleras i simuleringen. Observationer visar exempelvis att plockordningen och den fördefinierade rutten ibland frångås för att undvika köbildning. I vissa fall används även påfyllnadsgångar för att nå plockplatser, vilket avviker från den strikt implementerade plockpolicy som modellen bygger på. Sådana beteenden är svåra att formalisera och inkluderas därav inte i simuleringen.

Avslutningsvis bör det noteras att dessa begränsningar och antaganden är konstanta över samtliga simulerade scenarier, inklusive nulägesanalysen. De påverkar därmed prestationsnivån, men bedöms inte påverka jämförelsen mellan olika layoutlösningar.

4.6 Simulated annealing

I detta steg tillämpas Simulated Annealing som metaheuristisk förbättringsmetod för att optimera den initiala lagerlayouten som genererats av klustring.
En lösning x representeras av en fullständig tilldelning av artiklar till plockplatser i lagret. Varje artikel är kopplad till sin fysiska plats, som definieras av plockställ och plock x. Stapelbarhetsrestriktionen respekteras genom att endast omplaceringar inom samma sekundärförpackning tillåts.

En grannlösning genereras genom att två artiklar inom samma sekundärförpackning byter plats, med restriktionen att de hålls inom respektive sekundärförpacknings zon. Optimeringen genomförs därmed genom iterativa omplaceringar av artiklar i lagret, där syftet är att reducera den totala plocktiden genom att möjliggöra kortare och mer effektiva plockrutter. Om s betecknar nuvarande layout och s' den genererade grannlösningen definieras kostnadsförändringen som

$$\Delta = T(s') - T(s), \tag{4.2}$$

där T är den simulerade genomsnittliga totala plocktiden per order. Varje layout utvärderas med hjälp av simuleringsmodellen. Målfunktionen definieras enligt Ekvation 3.29, där samtliga komponenter beräknas genom simulering av ett givet antal plockare baserat på historiska orderdata. Detta innebär att interaktioner mellan plockare inkluderas i optimeringen, vilket möjliggör att trängsel och flaskhalsar beaktas.

Parametrisering och körning

Acceptansmekanismen och kylschemat följer den formulering som presenterats i teorikapitlet. I metodimplementeringen låg fokus därför på val av parametrar.
Initial temperatur sattes till $\theta_0 = 20$. Valet baserades på den observerade kostnadsförändringar mellan två närliggande layouter, vilka typiskt låg i intervallet 0.5–1 sekund. Med $\theta_0 = 20$ så accepteras mindre försämringar med hög sannolikhet i den inledande fasen av sökningen vilket ger en global sökning. Samtidigt är temperaturen inte så hög att algoritmen beter sig som en ren slumpmässig sökning.
Nedkylningsfaktorn sattes till $\alpha = 0.99$, vilket ger en gradvis och relativt långsam avkylning. Detta val gjordes för att successivt övergå från global utforskning till mer lokal förbättring utan att konvergensen sker för tidigt.
Algoritmen kördes under 10000 iterationer per optimeringsomgång. Vid varje iteration utvärderades en ny grannlösning genom full simulering av plockprocessen, vilket innebär att varje acceptansbeslut baserades på den simulerade genomsnittliga totala plocktiden.
Under körningen sparades den bästa hittills funna lösningen samt historik över målfunktionsvärdet per iteration för att möjliggöra analys av konvergens och stabilitet.

Algorithm 2 Simulated Annealing för optimering av lagerlayout

Initiera layout s, sätt $s_{\text{best}} \leftarrow s$, $T \leftarrow \theta_0$
for $k = 1, \ldots, N$ **do**
  Generera grannlösning s'
  swap(i, j) inom samma sekundärförpackning
  $\Delta \leftarrow T(s') - T(s)$ ▷ via simulering
  if $\Delta \leq 0$ **or** acceptera enligt SA regeln **then**
    $s \leftarrow s'$
  end if
  if $T(s) < T(s_{\text{best}})$ **then**
    $s_{\text{best}} \leftarrow s$
  end if
  $T \leftarrow \alpha T$
end for
return s_{best}

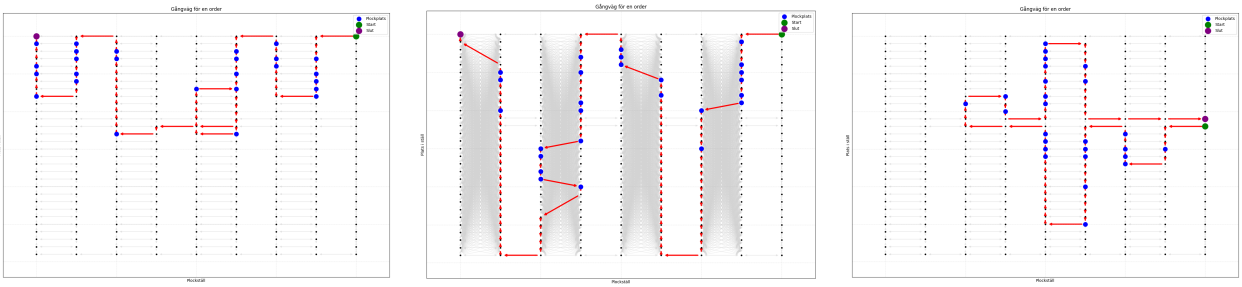
5 Verifiering av simuleringsmodell

I denna sektion kommer verifieringen av modellen att gås igenom systematiskt för att visa att modellen efterliknar verkligheten och de operativa restriktionerna.

5.1 Plockrutter

För att säkerställa att de genererade artikellayouterna ligger inom de operativa restriktionerna och att simuleringen fungerar korrekt, har ett antal verifieringssteg genomgåtts. Syftet med verifieringen är att kontrollera att modellens beteende överensstämmer med verkligheten samt att säkerställa att artikellayouterna är praktiskt användbara.

Först verifieras att de plockrutter som genereras av kluster, initial placering och SA-förbättring är rimliga och följer plockrestriktionerna. Denna verifiering sker genom att välja slumpmässiga ordrar från simuleringen för att sedan visualisera deras rutt i lagergrafen. Med hjälp av dessa visualiseringar kan det verifieras att plockpolicyn följs och att plockordningen respekterar begränsningar såsom stapelbarhet. Exempel på sådana visualiseringar visas i Figur 5.1.



(a) Exempel på plockrutt med retur-plock

(b) Exempel på plockrutt med modifierat Z-plock

(c) Exempel på plockrutt med mittgångsplock

Figur 5.1: Visualisering av plockrutter för en slumpmässigt vald order. Figuren används för att verifiera att simuleringen genererar rimliga rutter och att plockordningen följer den implementerade plockstrategin.

5.2 Artikelplacering

Ett andra verifieringssteg görs sedan, i detta steg analyseras artiklarnas placering i lagret för att bedöma om den givna layouten är rimlig ur ett operativt perspektiv. Detta görs genom att visualisera artikelpositionerna i form av bubble plot över lagrets plockplatser. I denna plot representeras varje bubbla som en artikelposition, där storleken varierar utifrån plockfrekvensen av artikeln.

5.3 Lösningskvalitet Simulated annealing

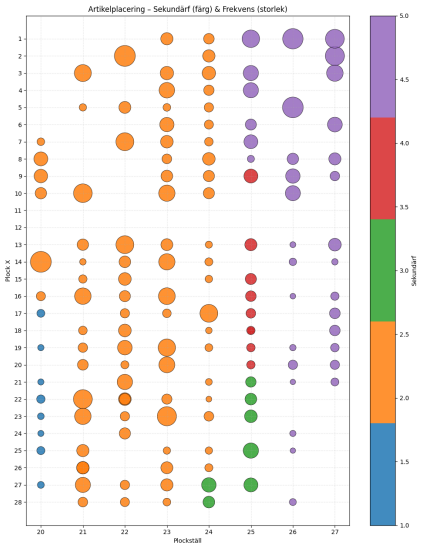
Slutligen analyseras optimeringsprocessen med SA genom att visualisera utvecklingen av lösningskvaliteten över iterationer, där X-axeln representerar iterationer och Y-axeln representerar medelvärdet av den totala tiden det tar att plocka en order.

6 Resultat

I detta avsnitt presenteras resultaten för denna uppsatt.

6.1 Nulägesanalys

Denna del analyserar dagslägets artikelplacering i kyllagret. Analysen omfattar både en kartläggning av placeringen samt simuleringsresultat baserade på tio veckors orderdata, vilka används som benchmark vid jämförelse med alternativa layouter. Figur 6.1 visar placeringar av artiklar i dagsläget.



Figur 6.1: Visualisering av dagslägets placeringar av artiklar på kyllagret. Färgerna motsvarar de olika sekundärförpackningarna.

Figuren 6.1 visar en relativt tydlig struktur i artikelplaceringen, där vissa grupper koncentreras till specifika områden. Samtidigt utnyttjas hela lagret och en stor spridning av artiklar kan observeras. Det framgår även att sekundärförpackning 1 delvis placeras inom området för sekundärförpackning 2, vilket indikerar en viss överlappning mellan grupperna. Denna layout utgår från att startpunkten är vid ställ 20, trots att plockarna i praktiken startar vid ställ 28. Detta tas i beaktande genom att öka overheadtiden för simuleringen med nuläges-layouten. Tabell 6.1 sammanfattar prestandamått för nuläget i lagret baserat på simulering av tio veckors orderdata.

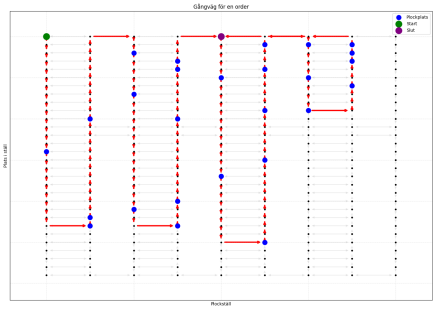
Tabell 6.1: Prestandamått för nuläget

	Gångtid (s)	**Plocktid (s)**	**Väntetid (s)**
Medelvärde	145.20	160.21	121.31
Median	123.30	81.60	0.00
Andel med väntetid		44.02%	
Median total tid		497.2 s	
Produktivitet		77.82 plockrader/timme/plockare	

Tabell 6.1 visar prestandamått för nuläget i lagret. Den genomsnittliga gångtiden uppgår till 145.20 sekunder per order, vilket utgör en betydande del av den totala ordertiden. Plocktiden har ett medelvärde på 160.21 sekunder. Väntetiden uppvisar en tydligt sned fördelning, där medianen är 0 sekunder samtidigt som medelvärdet uppgår till 121.31 sekunder. Detta indikerar att majoriteten av ordrarna inte påverkas av trängsel, medan en mindre andel utsätts för betydande köbildning. Att 44.02% av ordrarna har positiv väntetid bekräftar förekomsten av återkommande, men ojämnt fördelade köbildningar.

Medianen av den totala ordertiden uppgår till 497.2 sekunder, och produktiviteten är 77.82 plockrader per timme och plockare. Sammantaget tyder resultaten på att systemets effektivitet i nuläget i stor utsträckning begränsas av gångtid samt lokala trängselproblem.

För att illustrera hur den observerade spridningen påverkar plockprocessen visas i Figur 6.2 ett exempel på en slumpmässig order. Som framgår täcker plockrundan i princip hela lagret, vilket bekräftar den låga graden av koncentration av artiklar inom enskilda ordrar.



Figur 6.2: Visualisering av en slumpmässig order som plockas med dagslägets layout.

6.2 Kluster

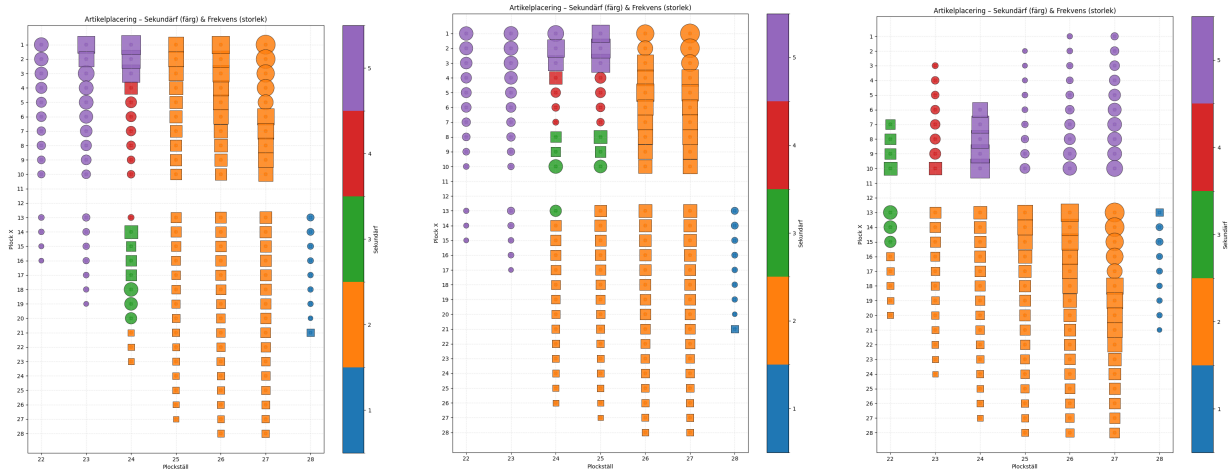
Sekundärförpackning	Kluster 1	Kluster 2
1	8	1
2	5	75
3	3	4
4	7	1
5	29	5

Tabell 6.2: Fördelning av sekundärförpackningar över kluster.

Tabell 6.2 visar fördelningen av artiklar mellan de två identifierade klustren, uppdelat efter sekundärförpackning. Det kan noteras att vissa kluster endast innehåller en artikel. Vidare framgår att sekundärförpackning 2 och 5 är stora, men har en mycket ojämn fördelning mellan klustren. Däremot är sekundärförpackning 3 jämnt fördelad.

6.3 Placeringsmodell

Placeringsmodellen genererade en initial lösning för respektive ruttpolicy, se Figur 6.3. Figuren visar (a) returplock, (b) Z-plock och (c) mittgångsplock, där cirklar och kvadrater representerar kluster 1 respektive 2, och färgerna motsvarar olika sekundärförpackningar. Jämfört med nuläget uppvisar samtliga layouter en tydligare struktur, där högfrekventa artiklar i större utsträckning koncentreras till mer lättillgängliga positioner. En spegling av lagret har skett där ställ 28 anses vara mer attraktivt än ställ 20, vilket beror på att plockarna alltid startar vid ställ 28. De första 10 plockplatserna på ställ 28 lämnas tomma till fördel för tomma pallar så de enkelt kan nås i starten av plockrundan.



(a) Initial placering Retur-plock **(b)** Initial placering Z-plock **(c)** Initial placering mittgångsplock

Figur 6.3: Visualisering av initial placering från placeringsmodellen för respektive rutt policy. Den visar de använda plockställen på lagret där figurerna motsvarar artiklar och dess placering. Cirklarna och kvadraterna är kluster 1 respektive 2 för varje sekundärförpackning. Färgerna motsvarar de olika sekundärförpackningarna.

Mittgångs- och returplock uppnår global optimalitet (gap = 0), medan Z-plock har ett kvarstående optimalitetsgap på 2%. Det är viktigt att notera att optimalitet i detta sammanhang avser modellens formulering. Även om vissa layouter uppnår global optimalitet (gap = 0) inom MILP-modellen, innebär detta inte att de nödvändigtvis är optimala i praktiken, då modellen utgör en förenkling av verkligheten.

Tabell 6.3 sammanfattar produktivitet och förbättring för de optimerade layouterna före simulated annealing.

Tabell 6.3: Sammanfattning av förbättring och produktivitet före simulated annealing

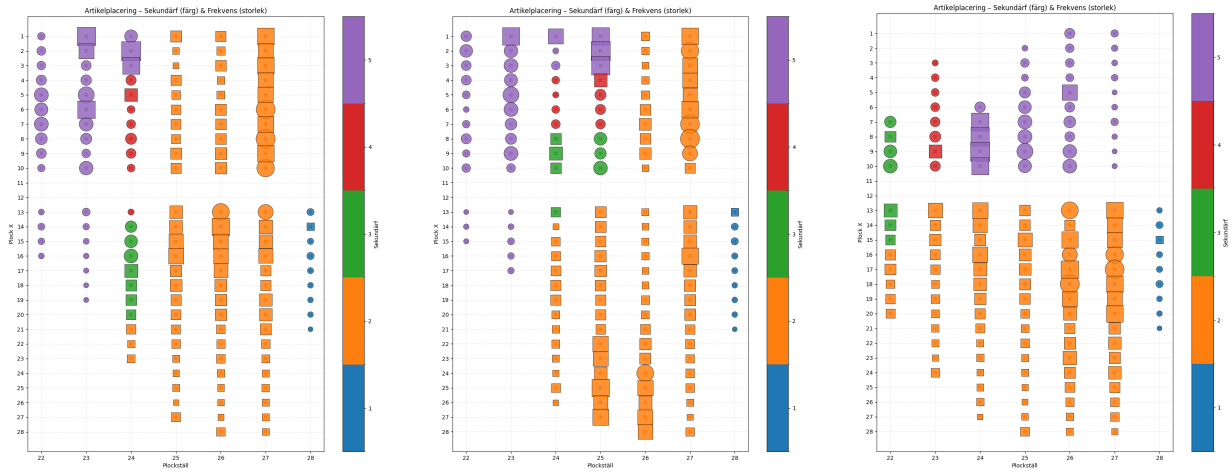
	Nuläge	Retur-plock	Z-plock	KPV-Batch (Z)	Mittgång-plock
Produktivitet	77.82	87.84	85.78	86,93	84.91
Förbättring (%)	–	**+12.9**	+10.2	+11.7	+9.1

Samtliga alternativa layouter ger en förbättring jämfört med nuläget, där retur-plock uppvisar den största förbättringen och högst produktivitet, en ökning på 12.9%. Resultaten indikerar att den initiala artikelplaceringen i sig bidrar till en mer effektiv plockprocess, men att utfallet varierar beroende på vald ruttstrategi. För fullständig resultatredovisning hänvisas till Tabell B.1 i bilagorna.

Resultaten visar att reducerad gångtid är den primära drivaren bakom ökad effektivitet, medan skillnader i väntetid i mindre utsträckning påverkar den totala prestationen. Men viktigt att ha i åtanke är att placeringsmodellens mål var att minimera gångsträckan och inte den totala tiden. I nästa steg med SA så byts målfunktionen till att minimera den totala tiden vilket förhoppningsvis kommer att påverka kötiden.

6.4 Simulated annealing

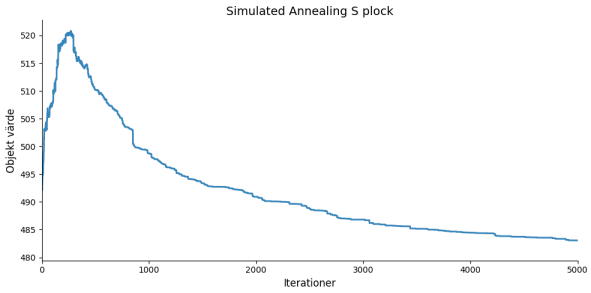
Simulated Annealing har körts för respektive initial placering och ruttpolicy. Se Figur 6.4 där (a) är placeringen för retur rutt, (b) för Z-plock och (c) för mittgångsplock.



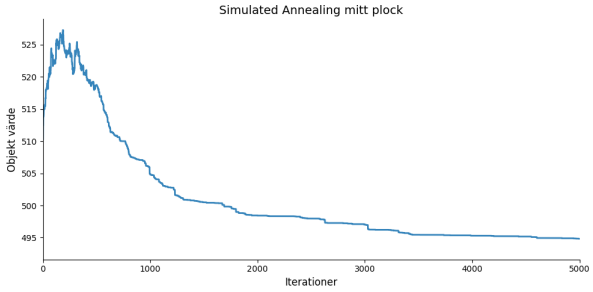
(a) Placering efter SA, Retur-plock **(b)** Placering efter SA, Z-plock **(c)** Placering efter SA, mittgångsplock

Figur 6.4: Visualisering av placering efter att SA körts för respektive initial placering och ruttpolicy. Den visar de använda plockställen på lagret där figurerna motsvarar artiklar och dess placering. Cirklarna och kvadraterna är kluster 1 respektive 2 för varje sekundärförpackning. Färgerna motsvarar de olika sekundärförpackningarna.

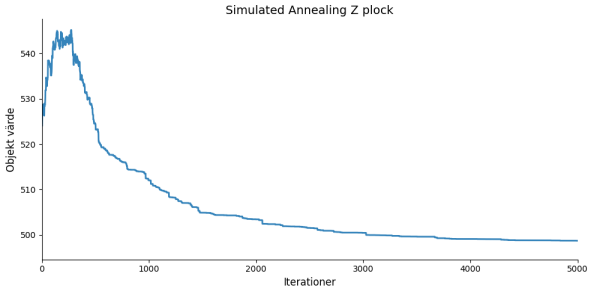
Det man kan observera efter SA är att det sker en ändring i spridningen för frekventa artiklar samt att klustren inte längre hålls ihop. För Figur 6.6a kan man tyda en tendens av att Ställ 25 och 26 får högfrekventa artiklar placerade efter tvärgången i mitten och tvärtom för ställ 22 och 23. För Figur 6.6b kan man se att modellen föredrar att placera frekventa artiklar längs ett ställ av ställparen istället för jämt sprida ut dem på platser i båda ställen, se ställ 26 och 27. För Figur 6.6c kan man se en förändring där högfrekventa artiklar tenderar att placeras mer utspritt på plockställen men mer centrerat längs tvärgången i mitten av lagret, snarare än närmare startpunkten (28,0). Man kan även notera en tydlig förflyttning av frekventa artiklar i sekundärförpackning 5 från ställ 28 till ställ 24 och 25.



(a) Simulated Annealing – S plock



(b) Simulated Annealing – mitt plock



(c) Simulated Annealing – Z plock

Figur 6.5: Konvergens för Simulated Annealing under tre olika plockstrategier

Figur 6.5 visar utvecklingen av objektvärdet, definierat som den simulerade totala plocktiden per order, under optimeringsprocessen med simulated annealing. Samtliga ruttstrategier uppvisar initialt en ökning i objektvärdet följt av en tydlig minskning, vilket indikerar att algoritmen först utforskar lösningsrymden innan den successivt förbättrar den initiala artikelplaceringen. Att objektvärdet därefter underskrider det initiala värdet visar att bättre lösningar identifieras.

Den inledande ökningen är i linje med den valda parametriseringens syfte, där en hög initial temperatur möjliggör acceptans av sämre lösningar för att undvika lokala optimum. När temperaturen sjunker fokuserar sökprocessen i stället på lokala förbättringar, vilket resulterar i en stabilisering av objektvärdet.

Vidare framgår av Figur 6.5 att mittgångsplock och Z-plock konvergerar snabbare mot stabila lösningar, medan retur-plock uppvisar en långsammare konvergens. De resulterade artikelplaceringarna för respektive strategi presenteras i Figur 6.4. Totalt genomfördes 10 000 iterationer av algoritmen, men endast de första 5 000 redovisas då konvergens uppnåddes tidigare.

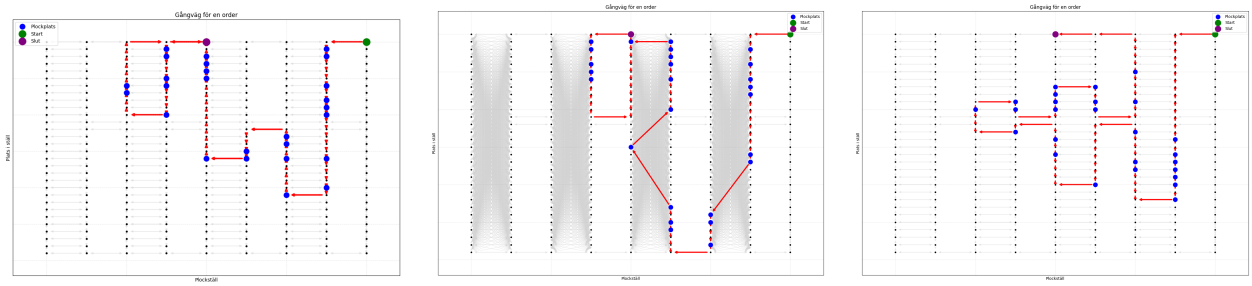
Eftersom objektfunktionen inkluderar både gångtid, plocktid och väntetid innebär detta att objektvärdet inte enbart beror på ruttlängd, utan även på interaktioner mellan plockare och uppkomsten av trängsel i lagret.

Tabell 6.4: Sammanfattning av förbättring och produktivitet för olika layouter

	Nuläge	Retur-plock	Z-plock	KPV-Batch (Z)	Mittgång-plock
Produktivitet	77.82	88.82	87.70	88.70	86.85
Förbättring (%)	–	**+14.1**	+12.7	+14.0	+11.6

Tabell 6.4 visar den relativa förbättringen jämfört med nuläget samt motsvarande produktivitet för respektive layout. Retur-plock uppvisar den största förbättringen, med KPV-batchning tätt därpå, medan samtliga alternativa strategier ger en högre produktivitet än nuläget. För fullständig resultatredovisning hänvisas till Tabell B.2 i bilagorna.

För att illustrera hur de olika layouterna påverkar plockrundorna visas i Figur 6.6 exempel på slumpmässiga ordrar för respektive strategi. Samma order har använts för samtliga layouts inklusive för nuläges layouten, Figur 6.2.



(a) Slumpmässig order Retur-plock **(b)** Slumpmässig order Z-plock **(c)** Slumpmässig order mittgångsplock

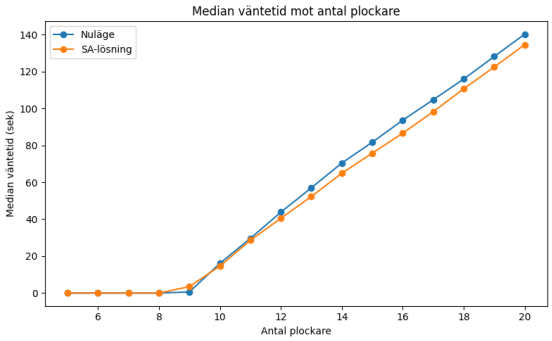
Figur 6.6: Visualisering av plockrundor för slumpmässiga ordrar under respektive layout. Figuren illustrerar hur en plockare rör sig på lagret vid plock av ordern.

Som framgår av Figur 6.6 är plockrundorna mer koncentrerade jämfört med nuläget, där plockaren i större utsträckning rör sig inom ett begränsat område av lagret. Detta indikerar kortare gångsträckor, vilket ligger i linje med den observerade reduktionen i gångtid för samtliga layouter.

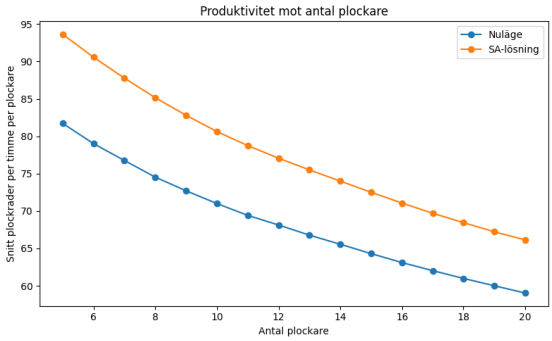
6.5 Scenarioanalys

Nu när den mest effektiva strategin och layouten har tagits fram är det dags att stresstesta dem. Det görs genom att se hur antalet plockare i systemet påverkar väntetiderna och därmed produktiviteten.

Figur 6.7 visar en känslighetsanalys där effekten av antalet plockare studeras för både nulägets layout och den optimerade layouten. Optimeringen har genomförts med utgångspunkt i 7 plockare, vilket motsvarar normalfallet i lagret, men analysen syftar till att undersöka hur lösningen presterar även vid andra bemanningsnivåer.



(a) Hur median-väntetiden ändras när antalet plockare ökas



(b) Hur produktiviteten ändras när antalet plockare ökas

Figur 6.7: Visar hur antal plockare påverkar väntetiderna och därmed produktiviteten, både för nulägets layout och för layouten i den bästa lösningen, returplock. Redovisar resultat för 5 till 20 plockare.

I Figur 6.7a kan det utläsas att väntetiderna ökar i takt med att antalet plockare blir fler, på grund av ökad trängsel, medan Figur 6.7b visar att detta leder till minskad produktivitet per plockare. Den optimerade layouten uppvisar emellertid genomgående lägre väntetider och högre produktivitet än nuläget för hela intervallet, med undantag för då antalet plockare är 9 stycken, vilket tyder på att lösningen är robust även vid förändringar i plockarantalet.

Den observerade förbättringen på cirka 14 % innebär att motsvarande produktivitetsnivå som uppnås med 7 plockare i nuläget kan uppnås med ungefär 6 plockare i den optimerade layouten. Detta belyser den praktiska betydelsen av layoutförbättringen, då samma kapacitet kan uppnås med färre resurser.

7 Diskussion

7.1 Nuläge

Resultaten från nulägesanalysen visar att dagens artikelplacering i kyllagret uppvisar en tydlig struktur. Sekundärförpackningarna är placerade i korrekt ordning enligt Figur 1.2 och 1.3, vilket möjliggör rätt placering på lastbäraren i den ordning artiklarna plockas längs plockrutten. Utöver detta är högfrekventa artiklar i nuläget utspridda inom respektive sekundärförpackning, vilket skapar längre plockrutter. Detta framgår vid en jämförelse mellan Figur 6.2 och Figur 6.6a, där samma order plockas.

En observation från prestandamåtten i nulägesanalysen, Tabell 6.1, är att medelväntetiden uppgår till 121.31 sekunder, samtidigt som medianen är 0 sekunder. Detta visar att väntetid inte uppstår i alla ordrar, men att det förekommer extrema fall som driver upp medelvärdet. Att 44.02% av ordrarna innehåller väntetid stärker denna tolkning och visar att trängsel i nuläget är ett relevant problem, även om det inte är jämnt fördelat över samtliga plockrundor.

Produktiviteten i nuläget uppgår till 77.82 plockrader per timme och plockare, vilket visar att det nuvarande systemet fungerar. Resultaten visar dock samtidigt att det finns egenskaper i layouten som begränsar effektiviteten. Detta märks framför allt genom artiklarnas spridning över lagret samt förekomsten av väntetider.

Det bör också noteras att nulägeslayouten i analysen utgår från en startpunkt vid ställ 20, trots att plockarna i praktiken startar vid ställ 28. Att plockarna behöver korsa alla ställ innan de börjar plocka ansågs som ineffektivt och modellerades därmed om så att starten flyttades till ställ 28 för övriga layoutförslag. För att hantera detta dras 10 sekunder bort från overheadtiden för de nya layouterna, så att modellen bättre representerar verkligheten. Detta innebär att tiden från att en order avslutas till att nästa påbörjas antas vara 10 sekunder kortare än för en layout med start vid ställ 20.

7.2 Klusteranalys

Resultaten från klusteranalysen indikerar att det finns en underliggande struktur i samplockningsdatan, men att klusterseparationen är begränsad. Den bästa klusterlösningen erhölls med Manhattan-avstånd, average linkage och $k = 2$, vilket gav ett silhouette-värde på 0.498, se Tabell 4.1. Enligt Shahapure och Nicholas [21] indikerar högre silhouette-värden bättre klusterkvalitet, där värden nära $+1$ tyder på att observationer ligger i rätt kluster, värden nära 0 tyder på överlappning mellan kluster och värden nära -1 kan indikera felaktig klustertilldelning. Det erhållna värdet på 0.498 tyder därmed på att klustringen fångar viss struktur i datan, men att klustren inte är tydligt separerade.

Att silhouette-värdet är som högst vid $k = 2$ och därefter minskar när antalet kluster ökar tyder på att datan främst stödjer en grov uppdelning snarare än en mer detaljerad segmentering, se Figur 4.1. Detta antyder att samplockmönstren inte är tillräckligt distinkta för att motivera fler kluster, vilket sannolikt beror på att samplocksrelationer överlappar varandra i hög utsträckning.

Den gruppvisa klustringsanalysen visar vidare att klusterstrukturen varierar mellan olika sekundärförpackningar. Även om samtliga grupper uppvisade bäst resultat med Manhattan-avstånd och $k = 2$, varierade silhouettevärdena mellan 0.261 och 0.509, se Tabell 4.2. Låga värden indikerar att artiklarna inom vissa grupper uppvisar mer heterogena samplockmönster, vilket försvårar en tydlig uppdelning i kluster. Detta innebär att klustringens relevans varierar mellan grupper, och att vissa sekundärförpackningar har mer uttalade samplocksstrukturer än andra.

Ur ett praktiskt perspektiv bidrar klustringen därmed främst med en initial struktur snarare än en fullständig lösning för hur artiklar bör grupperas i lagret. Dess huvudsakliga värde ligger i att reducera problemets komplexitet, fånga övergripande samplockningsmönster och skapa bättre förutsättningar för efterföljande optimering. Klustringen används således som ett första steg inför placeringsmodellen och den efterföljande metaheuristiska förbättringen med simulated annealing.

7.3 Initial lagerlayout-modell

Resultaten från placeringsmodellen visar att den initiala lagerlayouten ger en tydligare struktur än nuläget för samtliga studerade ruttpolicys. I jämförelse med nulägeslayouten framstår de genererade lösningarna som mer systematiska, där högfrekventa artiklar i större utsträckning koncentreras till mer lättillgängliga positioner i lagret. Detta visar att modellen lyckas omsätta logiken från SLAP-formuleringen till praktiska och rimliga artikelplaceringar, där både plockfrekvens och klusterstruktur tas i beaktning. En observation är att placeringsmodellen, till skillnad från nuläget, i högre grad skapar en sammanhållen och komprimerad struktur i lagret, vilket ligger i linje med modellens syfte. Att de initiala layouterna uppvisar en mer ordnad struktur än nuläget kan därför tolkas som att modellen lyckas reducera en del av den spridning

som observerades i nulägesanalysen, se Figur 6.3.

Resultaten visar dock att förbättringen inte enbart är visuell, utan även mätbar i termer av prestanda. Samtliga initiala layouter ger högre produktivitet än nuläget, se Tabell 6.3. Retur-plock uppnår en produktivitet på 87.84 plockrader per timme och plockare, vilket motsvarar en förbättring på 12.9 % jämfört med nuläget. För Z-plock, KPV-Batch (Z) och mittgång-plock uppgår produktiviteten till 85.78, 86.93 respektive 84.91, vilket motsvarar förbättringar på 10.2 %, 11.7 % och 9.1 %. Detta visar att den initiala placeringsmodellen i sig har en positiv effekt på plockprocessens effektivitet.

Vidare framgår att den största förändringen bakom förbättringen är den reducerade gångtiden. I nuläget uppgår den genomsnittliga gångtiden till 145,20 sekunder per order, se Tabell 6.1, medan den i de alternativa initiala layouterna tydligt reduceras. De övriga prestandamåtten, *Plocktid* och *Väntetid*, bevaras ungefär på samma nivå, med en mindre förbättring av väntetiden, se Tabell B.1 i bilagan. Detta tyder på att modellen i stor utsträckning lyckas placera artiklar på ett sätt som ger kortare och mer koncentrerade plockrundor. Det är också i linje med att placeringsmodellens målfunktion bygger på att minimera gångrelaterad kostnad snarare än total plocktid.

Resultaten visar att den valda ruttpolicyn påverkar hur den initiala layouten utformas. Eftersom placeringsmodellen genererar en separat lösning för varje ruttstrategi innebär det att artikelplaceringen inte är oberoende av hur plockrundorna utförs. Detta är en viktig punkt eftersom en och samma layout inte nödvändigtvis är lika lämplig för olika ruttpolicys. Resultaten indikerar därmed att det finns ett tydligt samband mellan ruttlogik och attraktiviteten hos olika plockplatser, vilket motiverar att placeringsmodellen korrekt anpassar layoutgenereringen efter respektive ruttpolicy.

Att lagret speglas så att ställ 28 framstår som mer attraktivt än ställ 20 är också en viktig förbättring i förhållande till nulägesanalysen, vilket går att se om man jämför Figur 6.1 och Figur 6.4. Eftersom plockarna i praktiken startar vid ställ 28 innebär detta att placeringsmodellen bättre överensstämmer med den faktiska situationen i lagret. Den initiala lagerlayouten blir därmed inte bara mer strukturerad i teoretisk mening, utan också bättre anpassad till det verkliga plockflödet.

Summerat visar resultaten att den initiala placeringsmodellen fyller en viktig funktion i den valda trestegsmetoden. I detta steg förbättras framför allt den spatiala effektiviteten, vilket syns genom kortare gångtider och en högre produktivitet jämfört med nuläget, se Tabell 6.3. Samtidigt förändras väntetiderna i mindre utsträckning än gångtiderna, vilket framgår av den fullständiga resultatredovisningen i Tabell B.1 i bilagan jämfört med nuläget i Tabell 6.1. Detta indikerar att en mer strukturerad artikelplacering skapar bättre förutsättningar för kortare rutter, men inte automatiskt eliminerar köbildning och interaktioner mellan plockare. Den initiala placeringsmodellen bör därför ses som en bra startlösning, medan ytterligare förbättring krävs för att hantera trängsel, väntetid och total plocktid, vilket hanteras med simulated annealing.

7.4 Simulated annealing förbättring

Resultaten från simulated annealing visar att den initiala lagerlayouten kan förbättras ytterligare när målfunktionen utvidgas från att främst beakta gångrelaterad kostnad till att istället minimera den si-

mulerade totala plocktiden. Samtliga layouter som förbättrats med simulated annealing uppvisar högre produktivitet än efter den initiala placeringen såväl som nuläget, se Tabell 6.4.

Retur-plock ger bäst utfall med en produktivitet på 88.82 plockrader per timme och plockare, vilket motsvarar en förbättring på 14.1 % jämfört med nuläget. Även KPV-batchning för Z-plock når för en ökad produktivitet på 14.0 %, med 88.70 plockrader per timme och plockare. För Z-plock och mittgång-plock noteras även tydliga förbättringar på 12,7 % respektive 11.6 %, se Tabell 6.4. Detta visar att den heuristiska förbättringen ger ett ytterligare bidrag utöver den förbättring som redan uppnåtts med placeringsmodellen.

Förbättringen från simulated annealing är mer begränsad än den som erhölls av det initiala placeringssteget. Jämförelsen mellan Tabell 6.3 och Tabell 6.4 visar att produktiviteten visserligen ökar ytterligare efter simulated annealing, men att merparten av den övergripande förbättringen redan har realiserats genom den initiala placeringsmodellen. Detta kan tolkas som att den placeringsmodellen fångar de största förbättringarna i layouten medans simulated annealing mest finjusterar när den tar hänsyn till väntetid. Finjusteringen går att notera vid jämförelse mellan Tabell B.1 och Tabell B.2, där man kan se att gångtiden inte ändras så mycket, medan det är en märkbar skillnad i väntetid.

Detta stöds i de fullständiga resultaten från Tabell B.2 i bilagan. Där framgår att förbättringarna efter simulated annealing inte enbart handlar om gångtid, utan också om att hitta en bättre balans mellan gångtid, plocktid och väntetid. Till skillnad från placeringsmodellen, vars mål främst var att reducera gångsträckan, utvärderar simulated annealing varje ny layout utifrån den simulerade totaltiden. Därmed får även trängsel och interaktioner mellan plockare en direkt påverkan på vilka artikelbyten som accepteras. Detta gör att metoden bättre speglar den operativa verkligheten i lagret än MILP-steget ensam.

Figur 6.5 visar att samtliga ruttstrategier uppvisar ett liknande optimeringsmönster, där objektvärdet först ökar och därefter successivt minskar. Detta är i linje med simulated annealings logik, där en hög initial temperatur möjliggör acceptans av sämre lösningar i syfte att undvika lokala optimum. Att objektvärdet därefter stabiliseras på en lägre nivå indikerar att algoritmen lyckas identifiera förbättrade layouter. Samtidigt skiljer sig konvergensmönstren mellan ruttstrategierna. Att mittgångsplock och Z-plock konvergerar snabbare än retur-plock kan tolkas som att deras lösningsrum är enklare att förbättra lokalt, medan retur-plock verkar ha ett större eller mer komplext förbättringsutrymme innan stabilisering uppnås, se Figur 6.5.

Resulterande layouterna i Figur 6.4 visar också att strukturen förändras efter simulated annealing jämfört med de initiala placeringarna. En tydlig observation är att klustren inte längre hålls lika strikt samman som tidigare. Detta är intressant, eftersom det antyder att en strikt klusterbaserad gruppering inte nödvändigtvis är optimal när den faktiska plocktiden simuleras. I stället verkar algoritmen i vissa fall föredra att bryta upp klusterstrukturen om detta leder till bättre totalprestanda. Detta stärker tolkningen att klustringen främst är ett användbart initialt hjälpmedel, men inte en struktur som nödvändigtvis bör bibehållas i den slutliga layouten.

För retur-plock kan man se en tendens till att de högst frekventa artiklarna kommer på de 10 första platserna på ställ 27 och sedan efter mittgången på ställ 25 och 26. Detta kan tolkas som att modellen vill positionera plockarna på andra sidan mittgången i ställ 25 och 26, så att de är nära sekundärförpackning 3

som kommer därnäst i plockordningen och även ligger på andra sidan mittgången. För Z-plock framträder en tendens att högfrekventa artiklar placeras längs ett av ställen i ett ställpar snarare än att fördelas jämnt över båda, vilket indikerar att det är effektivast att undvika att korsa mellan ställen, då det tillkommer en straffkostnad för att svänga och stanna. För mittgångs-plock syns i stället en rörelse mot att placera högfrekventa artiklar mer centrerat kring tvärgången i mitten av lagret. Dessa skillnader antyder att simulated annealing i högre grad anpassar layouten till de praktiska konsekvenserna av respektive ruttpolicy än vad den initiala placeringsmodellen gör, se Figur 6.4.

Även om simulated annealing förbättrar produktiviteten för alla ruttstrategier så är skillnaderna relativt små, se Tabell 6.4. Detta innebär att valet av bästa strategi inte enbart bör baseras på den observerade förbättringen i produktivitet, utan också på hur robust lösningen är och hur känslig den är för förändringar såsom antal plockare. Det är därför relevant att den bästa layouten också testas vidare i scenarioanalysen. Summerat så visar resultaten att simulated annealing fyller sin funktion som sista steg i den valda trestegsmetoden. Medan placeringsmodellen skapar en stark och strukturerad startlösning, bidrar simulated annealing med den finjustering som krävs för att bättre anpassa layouten till simulerad total plocktid och därmed till lagrets faktiska operativa förutsättningar. Resultaten i Tabell 6.4 och Tabell B.2 visar att detta ger ytterligare förbättringar jämfört med både nuläget i Tabell 6.1 och de initiala layouterna före simulated annealing.

7.5 Scenario

Scenarioanalysen visar att effekten av den optimerade layouten är beroende av belastningen i systemet. Enligt Figur 6.7a ökar medianväntetiden när antalet plockare ökar, vilket visar att trängsel fortsatt utgör en viktig begränsning i lagret. Det innebär att även en förbättrad artikelplacering inte kan eliminera de köeffekter som uppstår när många plockare arbetar samtidigt.

Samtidigt visar Figur 6.7b att produktiviteten påverkas negativt när belastningen blir högre. Det kan även noteras att kurvorna för nuläget och den förbättrade layouten i stort följer samma utveckling när antalet plockare ökar. Det tyder på att båda systemen påverkas på ett liknande sätt av ökad belastning. Den förbättrade layouten ligger dock genomgående på en högre produktivitetsnivå än nuläget, vilket visar att den optimerade artikelplaceringen fortsätter ge en förbättring även när systemet belastas hårdare.

Scenarioanalysen visar att den framtagna layouten är funktionell och förbättrar prestandan, men att den fortsätter påverkas av bemanningsnivån. Detta understryker att trängsel är en del av problemet och att framtida förbättringar därför kan behöva rikta in sig mot det för att hitta mer förbättringar.

7.6 Slutsats

Sammanfattningsvis visar studien att artikelplaceringen i Norrmejeriers kyllager har en tydlig påverkan på plockprocessens effektivitet. Resultaten visar att samtliga alternativa layouter ger högre produktivitet än nuläget. Den största delen av förbättringen uppnås redan genom en systematisk initial placering samt genom att lagret görs mer kompakt, vilket bidrar till kortare transportsträckor. Därefter finjusteras layouten med hjälp av simulated annealing för att även beakta trängsel, utöver gångtid och plocktid. Scenarioanalysen visar dessutom att den förbättrade layouten bibehåller ett högre plocksnitt än nuläget även när antalet plockare ökar, vilket innebär att layouten även presterar bättre under mer belastade förhållanden.

Utifrån observationerna i resultaten samt de iakttagelser som gjorts under studiens gång rekommenderas Norrmejerier att implementera den layout som identifierats som bästa lösning, returpolicyn. En viktig fördel med denna lösning är att samma ruttpolicy som används i nuläget kan behållas, samtidigt som den enda förändringen som krävs är artikelplaceringen. Trots att KPV-Batchning för Z-plock levererar ett likvärdigt resultat så rekommenderar vi inte denna lösning före retur-plock då det innebär större strukturella förändringar som kan ta tid och mycket arbete att genomföra samt att det blir en fråga om arbetsmiljösäkerhet då det kommer vara mer omkörningar i gångarna vilket skapar större chans för kollision.

Under arbetets gång har det även observerats att den exakta artikelplaceringen inom respektive sekundärförpackning inte verkar vara avgörande i sig, vilket innebär att viss omflyttning inom grupperna kan göras utan större påverkan på effektiviteten. Däremot visar resultaten att när artiklarna sprids ut och lagret blir mindre kompakt, försämras effektiviteten. Av denna anledning rekommenderas att lagret inte görs glesare, utan att artikelplaceringen i stället hålls så kompakt som möjligt. Att den exakta artikelplaceringen har relativt begränsad betydelse stöds även av skillnaden i resultat mellan den initiala lagerlayouten och den layout som vidare förbättrats med simulated annealing, där förbättringen endast är marginell. Däremot är förbättringen mellan nuläget och den initiala layouten betydligt större, vilket tyder på att den huvudsakliga effekten främst kommer av att lagret görs mer kompakt.

Referenser

[1] M. S. Islam och M. K. Uddin. ”Correlated Storage Assignment Approach in Warehouses: A Systematic Literature Review”. I: *Journal of Industrial Engineering and Management* 16.2 (2023), s. 294–318. ISSN: 2013-0953. DOI: 10.3926/jiem.4850.

[2] J. C. Rojas-Reyes, J. Smith och T. Vidal. ”The Storage Location Assignment Problem: A Literature Review”. I: *International Journal of Industrial Engineering Computations* 10.2 (2019), s. 199–224. DOI: 10.5267/j.ijiec.2018.12.001.

[3] Norrmejerier. *Om Norrmejerier*. URL: https://www.norrmejerier.se/om-norrmejerier (hämtad 2026-01-21).

[4] Norrmejerier. *Norrmejeriers historia*. 2025. URL: https://www.norrmejerier.se/om-norrmejerier/norrmejeriers-historia (hämtad 2026-02-02).

[5] Norrmejerier. *Produkter*. 2025. URL: https://www.norrmejerier.se/produkter (hämtad 2026-02-02).

[6] Norrmejerier. *Ett mejeri ägt av bönderna själva – en demokratisk förening*. URL: https://www.norrmejerier.se/om-norrmejerier/ett-mejeri-agt-av-bonderna-sjalva/en-demokratisk-forening (hämtad 2026-01-21).

[7] Visit Skellefteå. *Burträsk*. 2025. URL: https://www.visitskelleftea.se/sv/platser/burtrask/ (hämtad 2026-02-02).

[8] Explore WMS. *Astro WMS*. 2025. URL: https://www.explorewms.com/astro-wms.html (hämtad 2026-02-02).

[9] Wikipedia contributors. *Hierarchical clustering — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2026. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hierarchical_clustering (hämtad 2026-02-23).

[10] J. Han, M. Kamber och J. Pei. *Data Mining: Concepts and Techniques*. 3. utg. Morgan Kaufmann, 2012.

[11] Wikipedia contributors. *Jaccard index — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2026. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Jaccard_index (hämtad 2026-02-23).

[12] Wikipedia contributors. *Silhouette (clustering) — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2026. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Silhouette_(clustering) (hämtad 2026-02-23).

[13] J. A. Cano, A. A. Correa-Espinal och R. A. Gomez-Montoya. ”An evaluation of picking routing policies to improve warehouse efficiency”. I: *International Journal of Industrial Engineering and Management* 8.4 (2017), s. 229–238.

[14] L.-F. Hsieh och L. Tsai. ”The Optimum Design of a Warehouse System on Order Picking Efficiency”. I: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 28 (2006), s. 626–637. DOI: 10.1007/s00170-004-2404-0.

[15] D. W. Pentico. ”Assignment problems: A golden anniversary survey”. I: *European Journal of Operational Research* 176.2 (2007), s. 774–793. ISSN: 0377-2217. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.09.014. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221705007137.

[16] T. Prunet, N. Absi och D. Cattaruzza. ”The storage location assignment and picker routing problem: A generic branch-cut-and-price algorithm”. I: *European Journal of Operational Research* 327.3 (2025), s. 857–874. DOI: 10.1016/j.ejor.2025.05.041.

[17] J. Xiao och L. Zheng. ”A correlated storage location assignment problem in a single-block-multi-aisles warehouse considering BOM information”. I: *International Journal of Production Research* 48.5 (2010), s. 1321–1337.

[18] J. C.-H. Pan, P.-H. Shih och M.-H. Wu. ”Storage assignment problem with travel distance and blocking considerations for a picker-to-part order picking system”. I: *Computers & Industrial Engineering* 62.2 (2012), s. 527–535.

[19] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt och M. P. Vecchi. ”Optimization by Simulated Annealing”. I: *Science* 220.4598 (1983), s. 671–680. DOI: 10.1126/science.220.4598.671.

[20] COIN-OR Foundation. *CBC User's Guide*. Accessed: 2026-04-08. 2023. URL: https://coin-or.github.io/Cbc/.

[21] K. R. Shahapure och C. Nicholas. ”Cluster Quality Analysis Using Silhouette Score”. I: *2020 IEEE 7th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*. IEEE, 2020, s. 747–748. DOI: 10.1109/DSAA49011.2020.00096. URL: https://api.mdsoar.org/server/api/core/bitstreams/6eb26914-d4eb-49b2-ad2c-b137d18abe1f/content.

A Projektbeskrivning NM

På Norrmejerier i Umeå produceras en stor variation av olika artiklar. De lagras alla i kyllagret innan de levereras till kunder. Mycket av det som beställs av kunder plockas av kylpersonalen på olika typer av lastbärare. En beställning kan innehålla många olika artiklar, vilka alla är placerade på olika platser i kyllagret. För att göra varje plockrunda så effektiv som möjligt vill Norrmejerier se över hur artiklarna och deras lagerplatser kan placeras på ett så optimalt sätt som möjligt i kyllagret. Syftet med detta är att förbättra internlogistiken genom att göra plockrundorna så korta som möjligt, samtidigt som det ska möjliggöra att stabila pallar och vagnar kan konstrueras.

Målet med uppdraget är alltså att få ut en optimal placering av artiklar i kyllagret. Med optimal avses att plockrundorna ska vara så korta och snabba som möjligt, samtidigt som stabila pallar och vagnar kan byggas.

B Resultattabeller

Tabell B.1: Jämförelse av prestandamått för olika layouter

	Nuläge	**Retur-plock**	**Z-plock**	**KPV-Batch (Z)**	**Mittgång-plock**
Gångtid (s)					
Medelvärde	145.20	94.17	107.03	119.40	112.67
Median	120.00	79.00	88.64	116.98	98.80
Plocktid (s)					
Medelvärde	160.21	160.21	160.21	230.28	160.21
Median	81.60	81.60	81.60	163.80	81.60
Väntetid (s)					
Medelvärde	121.31	115.19	114.81	158.76	114.64
Median	0.00	0.00	0.00	10.95	0.00
Andel (%)	44.02	45.63	45.15	**52.33**	44.60
Median total tid (s)	497.20	**427.30**	429.70	551.84	438.45
Produktivitet	77.82	**87.84**	85.78	86.93	84.91
Förbättring från nuläge (%)	–	**+12.9**	+10,2	+11.7	+9.1

Tabell B.2: Jämförelse av prestandamått för olika layouter efter SA

	Nuläge	Retur-plock	Z-plock	KPV-Batch (Z)	Mittgång-plock
Gångtid (s)					
Medelvärde	145.20	92.22	100.48	111.73	105.12
Median	120.00	72.80	84.99	120.29	91.10
Plocktid (s)					
Medelvärde	160.21	160.21	160.21	230.28	160.21
Median	81.60	81.60	81.60	163.80	81.60
Väntetid (s)					
Medelvärde	121.31	111.37	109.66	153.23	110.15
Median	0.00	0.00	0.00	1.76	0.00
Andel (%)	44.02	44.09	43.09	50.41	43.48
Median total tid (s)	497.20	**417.40**	418.67	539.51	428.95
Produktivitet	77.82	**88.82**	87.70	88.70	86.85
Förbättring från nuläge(%)	–	**+14.1**	+12.7	+14.0	+11.6