

Torbjørn Øyan Sørdal

Identifisering av flaskehals i produksjonslinje ved hjelp av simulering

Et case-studie av Orkla Råbekken

Masteroppgave i Ingeniørvitenskap & IKT

Veileder: Jan Ola Strandhagen

Juni 2022

Torbjørn Øyan Sørdal

Identifisering av flaskehals i produksjonslinje ved hjelp av simulering

Et case-studie av Orkla Råbekken

Masteroppgave i Ingeniørvitenskap & IKT
Veileder: Jan Ola Strandhagen
Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon



Kunnskap for en bedre verden

Forord

Denne oppgaven ble utført våren 2022 på Institutt for maskinteknikk og produksjon ved NTNU. Med denne fullfører jeg min mastergrad i IKT & Produksjonsledelse.

Jeg vil rette en stor takk til case-bedriften for muligheten til å samarbeide på masteroppgaven, og jeg håper dere får noe nyttig ut av den. Ola fortjener også en takk for veiledningen det siste semesteret. Tusen takk til venner og familie som har støttet meg når det har stått på som verst, og spesielt takk til Elise for gjennomlesning og å være en diskusjonspartner.

God lesing!

Torbjørn Øyan SørDAL

Juni 2022

Sammendrag

For å oppnå mest mulig effektiv produksjon er arbeid med å identifisere og forbedre flaskehalsen viktig. Simulering gir muligheten til å skaffe ny innsikt i komplekse systemer, og til å teste endringer i systemer uten store utgifter og at det påvirker systemet direkte. Simulering egner seg derfor godt som et verktøy for å identifisere og finne forbedringer på flaskehalsen, men det krever teknisk kompetanse og dedikasjon for å lykkes med.

Denne masteroppgaven har som formål å finne flaskehalsen i pølseproduksjon hos Orkla Råbekken ved hjelp av simulering og gi en anbefaling på endringer som vil forbedre vareflyten i produksjonslinja. I tillegg tester den ut simulering som verktøy for arbeid med flaskehalsen, og gir Orkla Råbekken støtte i å avgjøre om simulering er aktuelt for dem. For å oppfylle formålet ble det skapt tre forskningsspørsmål som oppgaven besvarer:

1. Hvor ligger flaskehalsen i pølseproduksjon hos Orkla Råbekken?
2. Hvilke endringer vil være mest effektive i å forbedre vareflyten i pølseproduksjonen?
3. Hvilken nytte får fabrikken av å ha en digital simuleringsmodell av produksjonslinja?

Oppgaven er et case-studie av Orkla Råbekken og skaper en simuleringsmodell av deres pølseproduksjon. Oppgaven følger en overordnet strategi basert på begrensningsteorien, og benytter diskret-hendelse-simulering og to datadrevne metoder for flaskehalsidentifikasjon: aktiv periode-metoden og vendepunktsmetoden.

Resultatene har vist at flaskehalsen i pølseproduksjon hos Orkla Råbekken er ovnene. Videre viste simuleringen at en forbedring av ovnene kan øke total gjennomstrømning i systemet betraktelig. I tillegg ble det forslått endringer i produksjonslinja som vil øke gjennomstrømningen ytterligere. Til slutt ble det konkludert at simulering som verktøy kan være nyttig for case-bedriften dersom de investerer nok tid og ressurser i det, og vil bidra til å øke det teknologiske nivået deres.

Disse resultatene vil være nyttige for case-bedriften så vel som andre bedrifter som vurderer simulering som verktøy for flaskehalsidentifikasjon.

Abstract

In order to achieve the most efficient production, work to identify and improve bottlenecks is important. Simulation provides the opportunity to gain new insight into complex systems, and to test changes in systems without major expenses and directly affecting the system. Simulation is therefore well suited as a tool for identifying and finding improvements on bottlenecks, but it requires technical expertise and dedication to succeed.

The purpose of this master's thesis is to find the bottleneck in sausage production at Orkla Råbekken by means of simulation, and to give a recommendation for changes that will improve material flow in the production line. In addition, it tests simulation as a tool for working with bottlenecks, and gives Orkla Råbekken support in deciding whether simulation is relevant for them. To fulfill this purpose, three research questions were created:

1. Where is the bottleneck in sausage production at Orkla Råbekken?
2. What changes will be most effective in improving material flow in the sausage production?
3. What benefits can the factory get from having a digital simulation model of the production line?

The thesis is a case study of Orkla Råbekken and creates a simulation model of their sausage production. It follows a strategy based on the Theory of Constraints and uses discrete-event simulation and two data-driven methods for bottleneck identification: Active Period Method and Turning Point Method.

The results have shown that the bottleneck in sausage production at Orkla Råbekken is the ovens. Furthermore, the simulation showed that an improvement of the furnaces can increase throughput in the system considerably. In addition, changes were proposed that will further increase throughput. Finally, it was concluded that simulation as a tool can be useful for the case company if they invest enough time and resources, and will help increase their technological maturity.

These results will be useful for the case company as well as other companies considering simulation as a tool for bottleneck identification

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
Innhold	viii
Figurer	ix
Tabeller	xi
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon	1
1.2 Formål og forskningsspørsmål	2
1.3 Avgrensning av oppgaven	3
1.4 Oppgavens struktur	4
2 Teori	5
2.1 Vareflyt i produksjon	5
2.1.1 Vareflytanalyse	5
2.1.2 Begrensningsteorien	6
2.1.3 Mål på vareflyt	7
2.1.4 Flaskehalsidentifisering	7
2.2 Simulering	9
2.2.1 Modelleringsmetoder for simulering	10
2.2.2 Diskret-hendelse-modellering	12
2.2.3 Abstraksjonsnivå	13
2.3 Sammendrag av teori	14
3 Forskningsmetode	17
3.1 Litteratursøk	17
3.2 Kartlegging av case-studiet	18
3.3 Modellering- og simuleringsstrategi	21
4 Pølseproduksjon hos Orkla Råbekken	27
4.1 Styringsmodell	27
4.2 Prosessbeskrivelser	30

4.3	Potensielle flaskehalsar	34
5	Output fra simulering	35
5.1	Simulering av dagens system	35
5.2	Simuleringsscenarioer	37
5.2.1	Scenario 1: Ekstra ovn	37
5.2.2	Scenario 2: Flere hekker	38
5.2.3	Scenario 3: Økt effektivitet i frysetunnel	39
5.2.4	Scenario 4: Økt effektivitet i pakkemaskin	40
5.2.5	Scenario 5: Ekstra blander	42
5.2.6	Scenario 6: Større blander	44
5.2.7	Scenario 7: Økt output fra kvern	45
5.2.8	Scenario 8: Økt effektivitet i stoppere	46
5.2.9	Scenario 9: Optimaliseringssimulering	47
5.2.10	Oppsummering	50
6	Besvarelse av forskningsspørsmål	51
6.1	Hvor ligger flaskehalsen i pølseproduksjon hos Orkla Råbekken?	51
6.2	Hvilke endringer vil være mest nyttige i å forbedre vareflyt i pølseproduksjonen?	53
6.3	Hvilken nytte får fabrikkene av å ha en digital simuleringmodell av produksjonslinja?	55
7	Diskusjon	57
7.1	Er resultatene troverdige?	57
7.2	Er simuleringmodellen troverdig?	58
7.3	Var metoden god?	59
7.4	Videre arbeid	61
8	Konklusjon	63
	Referanser	66

Figurer

1	Plan for oppgaven inkludert hvor problemstillingene blir adressert.	3
2	Eksempel på bruk av vendepunktsmetoden for å identifisere flaskehals hentet fra Lai mfl. (2021).	8
3	Viser tetthetsfunksjonen til de to sannsynlighetsfordelingene.	13
4	Applikasjoner av simulering med abstraksjonsnivå (Borshchev, 2013).	14
5	Plan for oppgaven, hvor problemstillingene blir adressert og hvilke metoder som vil bli tatt i bruk.	25
6	Skisse over layout for grillpølseproduksjon.	28
7	Styringsmodell over pølseproduksjon hos Orkla Råbekken.	29
8	Viser bilde av en hekk og en stett.	30
9	Flytskjema over arbeidsflyten på råvareavdelingen.	31
10	Flytskjema over arbeidsflyten på pølseavdelingen.	32
11	Flytskjema over arbeidsflyten på pakkeavdelingen.	33
12	Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simulering av grunntilfelle. Grønn er aktiv og rød er inaktiv.	35
13	Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i grunntilfellet.	36
14	Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 1.	37
15	Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 1.	38
16	Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 2.	38
17	Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 2.	39
18	Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 3.	39
19	Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 3.	40
20	Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 4.	40
21	Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 4.	41
22	Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 5.	42
23	Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 5.	43
24	Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 6.	44

25	Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 6.	44
26	Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 7.	45
27	Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 7.	45
28	Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 8.	46
29	Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 8.	46
30	Aktive og inaktive perioder for hver maskin i optimaliseringssimuleringen.	48
31	Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i optimaliseringssimuleringen.	49

Tabeller

1	Oppgavestruktur.	4
2	Regler som legger føringer for arbeid med forbedringer av flaskehals, hentet fra E. M. Goldratt og Fox (1986).	6
3	Fordeler og ulemper ved simulering omgjort fra Banks mfl. (2010).	10
4	Søkeord brukt i litteratursøk.	18
5	Oversikt over nøkkelperson og informasjon mottatt fra hver av dem.	20
6	Egenskaper ved Anylogic og Automod.	22
7	Oversikt over modellerte entiteter, ressurser og aktiviteter.	23
8	Eksempel på tabell for å presentere nøkkeltall fra simuleringsscenarier.	25
9	Nøkkeltall fra simulering av grunntilfellet.	35
10	Nøkkeltall fra scenario 1.	37
11	Nøkkeltall fra scenario 2.	38
12	Nøkkeltall fra scenario 3.	39
13	Nøkkeltall fra scenario 4.	40
14	Nøkkeltall fra scenario 5.	42
15	Nøkkeltall fra scenario 6.	44
16	Nøkkeltall fra scenario 7.	45
17	Nøkkeltall fra scenario 8.	46
18	Variabler og mulige verdier brukt i optimaliseringssimuleringen. Originale verdier tilsvarende grunntilfellet.	47
19	Nøkkeltall fra scenario 9 med ekstra blander.	48
20	Nøkkeltall fra scenario 9 uten ekstra blander.	48
21	En sammenfatning av nøkkeltall fra alle simuleringsscenarier.	50

1 Introduksjon

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for Maskinteknikk og Produksjon på NTNU våren 2022. Den bruker simulering som verktøy for flaskehalsdeteksjon. Mer spesifikt er Orkla Råbekken brukt som case, og det er flaskehalsen i pølseproduksjon hos dem som blir identifisert. I tillegg blir nytten av simulering som verktøy for flaskehalsidentifikasjon kommentert. I dette kapitlet vil oppgavens mål og omfang bli presentert.

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Industriell produksjon handler om å produsere varer mest mulig effektivt innenfor de rammene man har. Dette gjør man ved å skape et best mulig samspill mellom mennesker og maskiner. Dagens produksjonssystemer er ofte svært komplekse og sammensatt av en lang rekke prosesser. Å finne ut hva det er som hindrer produksjonen fra å fungere enda bedre blir mer intrikat desto mer komplekst systemet er. Analytiske metoder har lenge blitt brukt til dette formålet, men lider av at utregninger fort blir for krevende. Dataverktøy som Excel er mye brukt og kan gi rask og enkel analyse av ei produksjonslinje, men simulering åpner opp for analyse av enda mer komplekse systemer og kan gi enda mer verdifull innsikt.

Shannon (1975) definerte simulering slik: "*Simulering er prosessen i å designe en modell av et reelt system og gjennomføringen av eksperimenter med denne modellen med formål om enten å forstå oppførselen til systemet bedre eller å evaluere diverse strategier for drift av systemet.*" Systemene som omtales i definisjonen kan være alt fra små komponenter i maskiner til handelsmønstre hos større menneskemasser. Med andre ord kan simulering anvendes i en rekke fagfelt som økonomi, maskinteknikk, medisin eller produksjonsledelse (Hoppensteadt & Peskin, 2012; Meier mfl., 1969; Mourtzis mfl., 2014). Eksperimentene som blir omtalt kalles ofte *scenarier*, og kan gå ut på å optimalisere, teste, opplære i, trene på eller øke forståelse av det modellerte systemet (Pedgen mfl., 1995). Innen produksjon er simulering et verktøy for å oppnå innsikt i komplekse systemer, for å teste nye drifts- og ressursrutiner før de implementeres, eller å samle informasjon uten å forstyrre systemet (Pedgen mfl., 1995).

Vareflyt er et bredt begrep som omhandler varers reise fra råvare til ferdig produkt og er en sentral del av en produksjonsbedrift. Det overordnede målet innenfor styring av vareflyt er å forflytte varer mellom aktører og operasjoner på den mest hensiktsmessige måten basert på kvalitet, produktivitet og kostnad. Hvor raskt varer forflyttes gjennom et system begrenses av *flaskehals* fordi gjennomstrømmingen av varer i systemet aldri kan være større enn gjennomstrømmingen i flaskehalsen (Chapman mfl., 2016). "APICS dictionary" (2013) definerer flaskehals slik: "*a facility, function, department, or resource whose capacity is less than the demand placed upon it*". Altså er det den komponenten i et system med kapasitet som begrenser gjennomstrømmingen. Som sagt er målet med industriell produksjon å produsere mest

mulig effektivt innenfor de rammene man har. Måten man øker effektiviteten til en produksjon er gjennom forbedring av flaskehalsene.

Historisk har det vært mye fokus på identifisering og forbedring av flaskehals. Lenge fantes det to typer metoder for identifisering av flaskehals: simuleringsbaserte og analytiske metoder. Simuleringsbaserte metoder kan i større grad identifisere flaskehals i komplekse miljøer (Li mfl., 2009). I nyere tid har også en tredje oppstått, nemlig datadrevne metoder, som er raskere å sette opp og har muligheten til å analysere data i sanntid (Lai mfl., 2021). Alle tre kategorier har styrker og svakheter som vil presenteres i kapittel 2, og det skjer for tiden mye utvikling innen hver av de. Huang mfl. (2019) kombinerer Internet-of-Things-teknologi med maskinlæring for å skape en proaktiv oppgavefordeler som detekterer og motarbeider flytende flaskehals i en smart fabrikk. Subramaniyan mfl. (2020) foreslår et robust verktøy for flaskehalsdeteksjon basert på ikke-veiledet maskinlæring som er kapabelt til å håndtere de store mengdene data produsert i et moderne produksjonsanlegg. Tang (2019) legger frem en ny metode for flaskehalsdeteksjon basert på OEE. Kahraman mfl. (2020) har skapt en metode for rangering av flaskehals i perspektiv av en helhetlig verdikjede i sanntid.

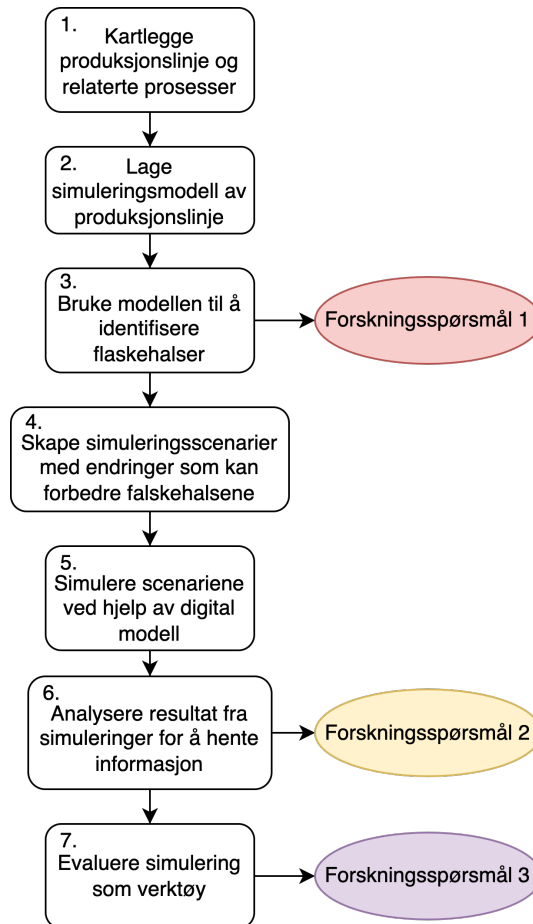
Orkla Råbekken er en bedrift som holder til på Råbekken i Fredrikstad og produserer en rekke hermetikk- og kjøttprodukter. Fabrikken har lenge drevet inkrementell forbedring og automatisering av produksjonsanlegget, men mye av utviklingsarbeidet må vike for den daglige driften. Nå ønsker de å teste ut dataverktøy for å støtte dem i denne prosessen. Denne oppgaven vil anvende simulering og simuleringsanalyse for å identifisere flaskehals i pølseproduksjonen på fabrikken. Den vil også teste mulige forbedringer av flaskehalsene og derunder bygge en digital simuleringsmodell. Det vil analyseres hvordan de mulige forbedringene vil påvirke vareflyt og gjennomstrømming.

1.2 Formål og forskningsspørsmål

Oppgaven har som formål å identifisere flaskehals i pølseproduksjonen hos Orkla Råbekken og gi en anbefaling på endringer i linja som vil lønne seg for å forbedre vareflyten. I tillegg vil den kommentere hvilken nytte case-bedriften kan få av å anvende simulering som verktøy for dette formålet. Det er skapt en simuleringsmodell som blir benyttet på to måter: 1. For å identifisere flaskehals og si noe om hvilke effekter endringer i linja vil gi. Oppgaven håper på å gi ny innsikt i hvilke endringer som vil være mest lønnsomme for fabrikken å gjennomføre. 2. Simulering som verktøy blir testet ut slik at fabrikken kan ta stilling til om dette er noe som bør satses på eller ikke. Oppgaven er altså også en konseptutprøving av simulering. Innsikten denne rapporten gir vil også kunne være nyttig for andre produksjonsbedrifter i lik situasjon som Orkla Råbekken. For å oppnå dette målet er det konkretisert forskningsspørsmål som vil bli besvart:

1. Hvor ligger flaskehalsen i pølseproduksjon hos Orkla Råbekken?
2. Hvilke endringer vil være mest effektive i å forbedre vareflyten i pølseproduksjonen?
3. Hvilken nytte får fabrikken av å ha en digital simuleringsmodell av produksjonslinja?

Forskningsspørsmål 2 spør etter å “forbedre vareflyt”. Dette kan gjøres på flere måter. Ofte vil det bestå av å øke effektivitet, korte ned tiden varer tilbringer i systemet eller redusere beholdningen i produksjonslinja. Figur 1 viser en plan for modellerings- og simuleringsdelen av oppgaven. I tillegg viser den hvor problemstillingene vil bli adressert.



Figur 1: Plan for oppgaven inkludert hvor problemstillingene blir adressert.

1.3 Avgrensning av oppgaven

I arbeidet med å forbedre vareflyt fokuserer denne oppgaven på den fysiske flyten av varer gjennom produksjonslinja når linja er i drift. Den ser bort fra andre prosesser som planlegging og vedlikehold som også er viktige i å forbedre gjennomstrømning, da de tar høyde for faktorer som omstilling, tilgjengelighet av råvarer, kapasitet på arbeidskraft og slitasje på maskineri. Oppgaven ser også bort fra menneskelige faktorer som moral og engasjement i arbeidet.

Gjennom forskningsspørsmål 2 besvarer oppgaven hvilke endringer i produksjonen som forbedrer vareflyt. Den ser bort fra kostnader forbundet med disse endringene. Selv om de foreslåtte endringene forbedrer vareflyt vil de derfor ikke nødvendigvis være de beste å gjennomføre i det reelle systemet.

For å begrense modellen er det valgt å fokusere på én produksjonslinje og ett ferdig produkt, nemlig

grillpølser. Fabrikken Orkla Råbekken er svært kompleks, og i det begrensede tidsrommet oppgaven skulle gjennomføres ville det ikke vært tid til å modellere hele fabrikken. Grillpølser produseres i et stort volum, og informasjon om produksjon av denne vil være overførbart til andre produkter i den samme linja.

1.4 Oppgavens struktur

Tabell 1: Oppgavestruktur.

Kapittel 1 Introduksjon	Presenterer tema og oppgaven, og legger føringer for oppgavens avgrensninger.
Kapittel 2 Teori	Legger frem relevant teori rundt vareflyt og simulering. Beskriver teori rundt analyse- og simuleringsmetodene som benyttes.
Kapittel 3 Metode	Legger frem strategiene og metodene brukt for å kartlegge, modellere og simulere case-bedriften, samt utførelsen av litteratursøket.
Kapittel 4 Case-studie: Orkla Råbekken	Presenterer case-bedriften. Beskriver bedriften generelt og produksjonslinjen som blir simulert i detalj.
Kapittel 5 Output fra simulering	Først presenteres output fra simuleringen av dagens system. Deretter output fra de forskjellige simuleringsscenariene som tar for seg endringer i systemet.
Kapittel 6 Besvarelse av forsknings- spørsmål	Forskningsspørsmålene besvares med utgangspunkt i output fra simuleringen og fra kartleggingen av case-bedriften.
Kapittel 7 Diskusjon	Evaluerer resultater, simuleringsmodell og forskningsmetoden. Foreskår forbedringer av disse og videre arbeid.
Kapittel 8 Konklusjon	Konkluderer arbeidet og trekker frem nøkkelfunn.

2 Teori

Formålet med dette kapitlet er å etablere et teoretisk grunnlag for oppgaven, metodene brukt og diskusjon av forskningsspørsmålene. Siden oppgaven handler om å forbedre vareflyt i produksjon vil det i delkapittel 2.1 bli presentert teori rundt dette. Vareflytanalyse (Material Flow Analysis) introduserer vokabularet brukt videre i oppgaven. Begrensningsteorien (Theory of Constraints) legger føringer for den overordnede strategien for å identifisere flaskehals i forskningsspørsmål 1. Videre defineres målene på vareflyt som brukes i oppgaven, og metodene brukt for flaskehalsidentifikasjon. Delkapittel 2.2 tar for seg teori rundt simulering. Først er fokus på hvilke situasjoner simulering er nyttig og fordeler og ulemper ved simulering som verktøy. Deretter beskrives de tre metodene som fins for simuleringmodellering. Diskret-hendelse-modellering, som er brukt i denne oppgaven, beskrives i dybden. Til slutt introduseres begrepet abstraksjonsnivå, som er sentralt når man skal modellere et fysisk system.

2.1 Vareflyt i produksjon

2.1.1 Vareflytanalyse

All informasjon i 2.1.1 er hentet fra Brunner og Rechberger (2017), der hvor annet ikke er oppgitt.

Varer kan være hva som helst som har verdi. I forbindelse med vareflytanalyse pleier man å se bort fra varer uten fysisk masse som elektrisitet og informasjon, og heller fokusere på fysiske materialer. Verdien på varer kan være både positiv og negativ. I produksjonssammenheng ser man typisk på varene som går inn i produksjonen og ender opp med å bli et ferdig produkt. En *prosess* er transport, forandring eller lagring av varer. Prosessene kan være både naturlige og menneskeskapte som for eksempel oksidering eller støping. Prosessene i et system er sammenkoblet av *flyt*, og et *system* er definert som et sett med flere flyt og prosesser innenfor en gitt avgrensing i tid og sted. *Lager* er også viktig i systemer. Lager er en oppsamling av varer i systemet og en type prosess. Det er sentralt i forklaringen på hvordan et system oppfører seg. Starbek og Menart (2000) hevder at varer i et system tilbringer mesteparten av tiden i lagerprosesser.

Vareflytanalyse er en systematisk evaluering av tilstanden til og forandringer av flyt og lager av materialer i et system. Vareflyt i bedrifter kan analyseres på forskjellige nivå, i og med at varer går på kryss og tvers av verdikjeder, så vel som fra maskin til maskin i ei produksjonslinje. Det overordnede målet med vareflytanalyse er å oppnå innsikt i en vares reise gjennom kartlegging og analyser av vareflyten. Ofte gjøres dette for å kutte produksjonskostnader, ledetid eller mengden varer holdt i produksjon.

2.1.2 Begrensningsteorien

Begrensningsteorien ble først presentert av E. G. Goldratt (1984). Goldratt har selv sagt at det er en overordnet teori for å drive en hel organisasjon. Den tar utgangspunkt i to grunnleggende ideer:

- *Ethvert system må ha en begrensning.* Uten begrensninger ville man kunne tjent eller produsert uendelig. En begrensning er dermed hva enn som hindrer et system fra å prestere bedre. Begrensningene som blir sett på i denne oppgaven er flaskehalsar.
- *At begrensninger eksisterer betyr at det fins mulighet for forbedring.* Siden begrensninger er det som hindrer systemet fra å prestere bedre, vil forbedring av begrensningene føre til økt prestasjon.

Videre består teorien av to komponenter: en filosofi for hvordan man jobber med begrensninger og en planleggingsmetode kalt drum-buffer-rope (DBR). Filosofien om arbeidsmåte er en kontinuerlig syklus som består av fire steg: 1. Identifisere begrensninger. 2. Finne ut hvordan man kan utnytte dem. 3. Optimalisere det begrensede leddet ved hjelp av andre komponenter i systemet. 4. Forbedre begrensningene direkte. Deretter går man tilbake til steg 1. DBR baserer seg på takten (drum) som begrensninger opererer i, kommunikasjon mellom kritiske punkter for å holde punktene synkroniserte (rope) og strategisk plasserte lager (buffer) for å skjerme systemets leveranse fra variasjoner innad i systemet. En vanlig taktikk er å plassere lager både før og etter en begrensning slik at den kan operere så mye som mulig av tiden. På grunn av lageret før vil den ha en kontinuerlig tilflyt av varer slik at den ikke står å venter. På grunn av lageret etter vil den ikke bli blokkert av at den ikke kan kvitte seg med varer som den er ferdig med. Samtidig må man være sparsom med å ha for mange lager i linja, da både lager og varer i linja er en kostnad. I tabell 2 er det en oversikt over regler utviklet for å guide arbeidet med å forbedre flaskehalsar. Disse illustrerer vanlige fallgruver i slikt arbeid.

Tabell 2: Regler som legger føringer for arbeid med forbedringer av flaskehalsar, hentet fra E. M. Goldratt og Fox (1986).

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Balansér flyt, ikke kapasitet.2. Utnyttelsen av en ikke-flaskehals bestemmes av en begrensning i systemet, ikke dens eget potensial.3. Utnyttelse og aktivering av en ressurs er ikke det samme.4. Én time tapt i en flaskehals, er én time tapt for systemet.5. En time spart i en ikke-flaskehals betyr ikke noe.6. Flaskehalsar styrer både gjennomstrømning og lagerbeholdninger.7. En batch som forlyttes bør ofte ikke være lik en batch som prosesseres.8. En batch som prosesseres bør være variabel, ikke fastsatt.9. Under planlegging bør man ta høyde for alle begrensninger samtidig. Ledetider er et resultat av planlegging og kan ikke forutbestemmes. |
|---|

2.1.3 Mål på vareflyt

Begrensningsteorien sier at å forbedre flyt og flaskehals er sentralt i forbedringen av et system. I et slikt arbeid vil man gjøre målinger på vareflyten for å vurdere den. Å sette mål på vareflyt er ikke nødvendigvis en enkel oppgave. I tillegg blir det mer komplisert av at hva som er optimal vareflyt varierer fra system til system, slik at hva som måles også bør variere. I denne oppgaven benyttes hovedsaklig to mål på vareflyt. Det ene er *gjennomstrømning* (throughput) som er antall enheter som kommer ut av systemet. Det andre er *gjennomsnittlig beholdning* (average inventory) som sier hvor mange enheter som gjennomsnittlig befinner seg i systemet. Hvor mye man får produsert og hvor mye lager som befinner seg i systemet er sentralt når man ser på vareflyt, og disse målene gir innblikk i begge deler. (Cox & Schleier, 2010)

2.1.4 Flaskehalsidentifisering

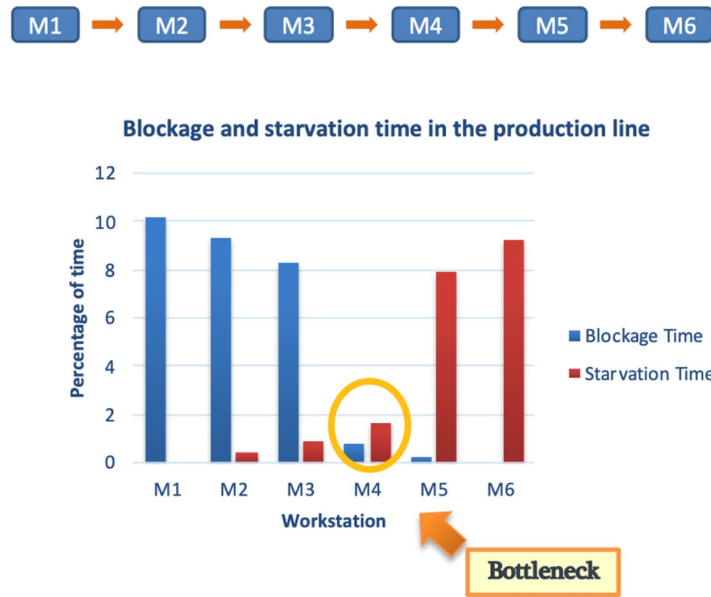
Begrensningsteorien argumenterer for at flaskehals alltid vil fins, og viktigheten av å arbeide med å forbedre de. Som nevnt i innledningen har det historisk vært mye fokus på å identifisere og forbedre dem. Metodene for å identifisere dem deles inn i tre grupper: simuleringsbaserte, analytiske og datadrevne metoder. Disse vil nå forklares og all informasjon er hentet fra Lai mfl. (2021) og Li mfl. (2009).

Analytiske metoder baserer seg på matematiske modeller hvor man antar at maskineriets attributter, for eksempel nedetid, følger en sannsynlighetsfordeling. Disse modellene forsøker så å tilnærme gjennomstrømningen til det fysiske systemet. Analytiske metoder belager seg på foreklinger og antakelser og egner seg dermed til å identifisere statiske flaskehals over lengre tidsrom. Når systemene blir komplekse vil utregningen av matematiske modeller også bli svært omfattende.

Simuleringsbaserte metoder, på den andre siden, vil i større grad kunne håndtere komplekse systemer. I slike metoder skaper man en simuleringsmodell hvor man kan kjøre simuleringer for å identifisere flaskehals og approksimere gjennomstrømning. Baksiden med simuleringsbaserte metoder er at utviklingen av den digitale modellen ofte tar lang tid og innebærer tilnærminger og antakelser, noe som svekker metodenes evne til å identifisere reelle flaskehals. I tillegg må modellen oppdateres når systemet endres, altså kan det være tungvint å identifisere dynamiske flaskehals.

Datadrevne metoder analyserer sanntidsdata fra produksjonssystemene. Fordelen med slike metoder er at man slipper antakelser og tilnærminger, og analyserer faktiske data fra systemet. På denne måten er det større sannsynlighet at man identifiserer reelle flaskehals siden man er ett steg nærmere det faktiske systemet. Sammenlignet med simuleringsbaserte metoder krever de også mindre tid på å settes opp. To eksempler på databaserte metoder er Vendepunktsmetoden (Turning Point Method) og aktiv periode-metoden (Active Period Method). Disse vil nå beskrives mer detaljert fordi de benyttes i oppgaven.

Vendepunktsmetoden antar at flaskehalsprosessen vil skape ventetid for prosessene etter den i sys-



Figur 2: Eksempel på bruk av vendepunktsmetoden for å identifisere flaskehals hentet fra Lai mfl. (2021).

temet. Da sies det at prosessene “sulter”. For prosessene før den i systemet vil flaskehalsprosessen skape kø og “blokkere” dem fra å gjennomføre sine oppgaver. I vendepunktsmetoden ser man på trender i tid sultet og blokkert for hver prosess. Vendepunktet i trendene, altså hvor prosesser går fra å være blokkert mer av tiden til å heller sulte mer av tiden, vil peke på flaskehalsprosessen. Se figur 2. Svakheten med denne metoden er at den ble skapt for bruk på linjeproduksjon, og lite arbeid har blitt gjort for å tilpasse den til mer komplekse systemer. Matematisk er vendepunktsmetoden definert som følger (Li mfl., 2009). Prosess j er vendepunktet i et system med n prosesser, hvor B_j er tid blokkert og S_j er tid sultet for prosessen, hvis:

$$\text{For } j \neq 1, j \neq n : \begin{cases} (B_i - S_i) > 0 : i \in [1, \dots, j - 1] \\ (B_i - S_i) < 0 : i \in [j + 1, \dots, n] \\ B_j + S_j < T_{j-1} + S_{j-1} \\ B_j + S_j < T_{j+1} + S_{j+1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{For } j = 1 : \begin{cases} (B_1 - S_1) > 0 \\ (B_2 - S_2) < 0 \\ B_1 + S_1 < B_2 + S_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{For } j = n : \begin{cases} (B_{n-1} - S_{n-1}) > 0 \\ B_n + S_n < B_{n-1} + S_{n-1} \\ (B_n - S_n) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Aktiv periode-metoden definerer flaskehalsprosessen som den prosessen med lengst kontinuerlig aktivitet. Den underliggende antakelsen er at andre prosesser vil "vente" på flaskehalsprosessen isteden for å være aktive selv. I aktiv periode-metoden tildeles hver maskin fem forskjellige tilstander: "i arbeid", "venter", "blokkert", "i omstilling" eller "under reparasjon". Her telles "venter" og "blokkert" som inaktive tilstander, hvor prosessene venter på at varer skal henholdsvis ankomme fra eller flyttes til andre prosesser. De andre tilstandene regnes som aktive. For å identifisere flaskehalsen finner man den prosessen med lengst uavbrutte aktive periode, siden det er nettopp denne prosessen som har størst sjanse for å begrense systemets gjennomstrømning. En svakhet ved denne metoden er at den kun ser på aktiv periode, og ingen andre tall fra prosessene.

2.2 Simulering

På grunn av de mangfoldige anvendelsesområdene er simulering vanskelig å definere konkret. I introduksjonskapittelet ble definisjonen fra Shannon (1975) brukt: *"Simulering er prosessessen i å designe en modell av et reelt system og gjennomføringen av eksperimenter med denne modellen med formål om enten å forstå oppførselen til systemet bedre eller å evaluere diverse strategier for drift av systemet."* Denne definisjonen er fremtredende i produksjonssammenheng, sammen med den fra Banks mfl. (2010) (Mourtzis mfl., 2014): *"Simulering er imitasjon av driften av en virkelig prosess eller system over tid. Simulering inkluderer generering av en kunstig historie til systemet, samt observasjon av denne kunstige historien for å trekke slutninger vedrørende driftsegenskapene til det reelle systemet representert."*

Å bestemme om simulering er den riktige fremgangsmåten for et prosjekt kan være en kompleks oppgave. Banks mfl. (2010) ser på formålet til prosjektet for å avgjøre dette. Formål hvor simulering kan lønne seg er når man skal studere og eksperimentere med et komplekst system, simulere endringer i systemet og se på effekten av dem, verifisere analytiske løsninger eller se på hvordan variabler i systemet henger sammen. Forhold som derimot gjør at simulering *ikke* vil lønne seg er:

- Når problemet kan løses med sunn fornuft.
- Når problemet kan løses analytisk.
- Når det er billigere å bare utføre eksperimenter i det faktiske systemet.
- Når kostnadene ved simulering overgår besparelsene av å løse problemet.
- Når tid og ressurser ikke er tilgjengelige.

Fordeler og ulemper med simulering kan sees i tabell 3. For å oppsummere tabellen gir simulering muligheten til å skaffe seg innsikt i dagens system eller i konsekvenser av endringer i systemet uten at det påvirker det reelle systemet. På den andre siden er resultatene avhengig av tid, penger og spesialkompetanse, og hvor mye man er villig til å bruke på disse.

Tabell 3: Fordeler og ulemper ved simulering omgjort fra Banks mfl. (2010).

Fordeler	Ulemper
Nye rutiner, regler, normer eller flytmønster kan utforskes uten å forstyrre det fysiske systemet.	Modellering krever spesialtrening lært gjennom erfaring.
Nytt utstyr, nye organiseringer, transportsystemer og lignende kan testes uten å binde seg til å kjøpe dem.	Modeller bærer stort preg av personen som har modellert den.
Hypoteser kan testes ut.	Resultatene fra en simuleringsmodell kan være vanskelig og tolke og upålitelige siden de kun bygger på statistiske fordelinger.
Tidsenheten kan endres både opp og ned.	Modellering og simulering kan være dyrt og tidkrevende, og å spare på disse kan føre til utilstrekkelige resultater.
Man kan få innsikt i samspill mellom og viktigheten av variabler i systemet.	
Flaskehalsanalyse kan gjennomføres.	
Kan hjelpe til å forstå hvordan systemet faktisk fungerer, isteden for hvordan enkeltpersoner tror det fungerer.	
“Hva om?”-spørsmål kan besvares, noe som er spesielt nyttig i designprosesser.	

2.2.1 Modelleringsmetoder for simulering

Når man skal simulere er man nødt til å ha en simuleringsmodell. Denne modellens egenskaper bør tilpasses simuleringens natur. For å gjøre modelleringen enklere er det skapt spesifikke metoder for skape simuleringsmodeller. Disse vil presenteres for å legge grunnlaget for valget av metode i oppgaven.

Det fins det tre metoder for å kartlegge et reelt system til en simuleringsmodell: systemdynamisk (system dynamics), diskret-hendelse- (discrete event modelling) og agent-basert modellering (agent based modelling) (Borshchev, 2013). Disse metodene er rammeverk for hvordan det fysiske systemet kartlegges for modellering, og foreslår hvilke avgrensninger som skal settes. Det som skiller metodene er hovedsaklig hvor fokuset i modelleringen ligger, altså hvor man ønsker å gjøre det så korrekt og detaljrikt som mulig. Modelleringsmetoden bør tilpasses systemet som skal modelleres og formålet med simuleringen. De tre modelleringsmetodene vil nå beskrives nærmere. Beskrivelsene er utarbeidet fra Borshchev (2013).

I *systemdynamisk modellering* ligger fokuset på dynamikken i systemet, altså hvordan prosesser påvirker hverandre. Den vil egne seg godt for å modellere dynamiske systemer med sirkulære avhengigheter. En sirkulær avhengighet er når utfallet av en prosess vil ha betydning for den samme prosessen neste gang den gjennomføres. Med andre ord blir output fra prosessen til input i den samme prosessen. For å beskrive prosesser med en sirkulær avhengighet på en lesbar måte brukes noe som kalles responsløkker (feedback loops). Et eksempel for å illustrere metoden er en simuleringsmodell av en kø med mennesker. Lengden av denne køen er avhengig av ankomstraten av mennesker. Etterhvert som køen vokser vil noen velge å ikke gå i køen i det hele tatt og bare dra, mens andre vil forlate køen etterhvert siden det tok lengre tid enn de trodde. Da er vekstraten til køen avhengig av lengden til køen, altså en sirkulær avhengighet. En simuleringsmodell vil ikke gi nøyaktige resultater uten å ta høyde for slike sirkulære avhengigheter, noe som enkelt kan gjøre ved hjelp av responsløkker. Dette illustrerer også den største fordelene med systemdynamikk som modelleringsmetode.

I *agent-basert modellering* er hovedfokuset på objektene som beveger seg i systemet, kalt agenter. Typisk modellerer man oppførselen til agentene individuelt først, og lar summen av mange agenter som interagerer representere oppførselen til systemet som helhet. Dette kan være nyttig når systemet er svært komplekst eller når man rett og slett ikke kjenner til oppførselen til systemet som helhet. I tillegg vil det være nyttig når agentene kan ha forskjellige tilstander som bestemmer oppførselen deres. Da benytter man gjerne tilstandsdiagrammer for hver enkelt agent. I Borshchev (2013) brukes et eksempel hvor man simulerer smittespredning i en populasjon og agentene er personer. Smitteraten fra person til person er kjent, og alle agenter kan ha en av fire forskjellige tilstander (mottakelig, utsatt, infisert, immun) som styrer deres handlingsmønster. Her har man skapt en simuleringsmodell som kan gi gode resultater og som samtidig er enkel å skape og modifisere. Det kan være vanskelig å trekke slutninger fra det reelle helhetlige systemet, men på individuelt nivå er det rett frem å modellere.

Diskret-hendelse-modellering ser på systemet som en prosess, altså en rekke med operasjoner, hvor entiteter beveger seg gjennom. Med en sterk tilknytning til prosesser illustreres modellene ved hjelp av flytskjema, et velkjent verktøy. Denne tilknytningen er en av grunnene til at diskret-hendelse-simulering er så mye brukt som det er. En diskret-hendelse-modell består av *entiteter*, eksempelvis produkter, personer, ordre eller prosjekter, og *ressurser*. Ressurser er det som kreves for å utføre operasjonene i prosessen, som for eksempel operatører, leger, datamaskiner eller transport. Modellen har som formål å etterligne den fysiske prosessen, og typisk output fra en slik simuleringsmodell kan være kapasitetsutnyttelse av ressurser, tid tilbragt i systemet av en entitet, køtid, kølengde, gjennomstrømning, flaskehals eller kostnaden av prosessering. Felles for entiteter og ressurser er at de er passive i motsetning til en agent i en agent-basert modell.

De tre modelleringsmetodene for simulering er kort sagt de forskjellige synsvinklene man kan ha når man skal modellere et system. Noen ganger er det ikke tilstrekkelig å benytte seg av kun én av disse. Da kan man bruke en kombinasjon av metodene. For eksempel kan man bruke en systemdynamikk for å styre logikken hos en agent i en agent-basert modell som etterligner agents individuelle

beslutningstaking. Eller man kan kombinere diskret-hendelse- med agent-basert modellering ved å gi entitetene forskjellige tilstander som påvirker oppførselen deres. Valget av metode eller metoder må tilpasses egenskapene til systemet som skal modelleres, formålet med simuleringen og tilgjengelige data.

2.2.2 Diskret-hendelse-modellering

Siden diskret-hendelse-modellering blir brukt i denne oppgaven vil det nå bli beskrevet i mer detalj basert på Ingalls (2011). En diskret-hendelse-modell vil være bygd opp av disse komponentene: *entiteter, aktiviteter, ressurser, en generator av tilfeldig tall, en kalender, variabler og statistiksamlere.*

Som nevnt er *entiteter* det som beveger seg gjennom systemet. I tillegg er det entiteter som får ting til å skje. Uten aktive entiteter regnes simuleringen som stoppet. De er passive i den forstand at de ikke har noen atferd på egenhånd, og alt som skjer med dem bestemmes av prosessflyten. Det de gjør er å bære data. Entiteter har nemlig attributter. Dette er karakteristikk som er spesielle for akkurat den typen entiteter. Typiske entiteter i en simuleringsmodell av en produksjonslinje vil være råvarene og produktene som produseres. Attributter til entitetene kan da være størrelse, vekt, starttid og lignende.

Aktiviteter er prosessene og logikken i simuleringsmodellen. Entitetene interagerer med aktivitetene, noe som fører til forandring i systemet. Det er tre typer aktiviteter i diskret-hendelse-modellering: *vent, kø og logikk* (delay, queue, logic). Vent-aktiviteten holder igjen en eller flere entiteter i en gitt tid. I en kø-aktivitet venter entiteter i en ikke-bestemt tid. Der vil de vente til en gitt ressurs blir tilgjengelig eller til en betingelse er oppfylt. Logikk-aktivitetene avgjør ulike utfall for entitetene ut fra tilstandsvariabler eller vanlig logikk.

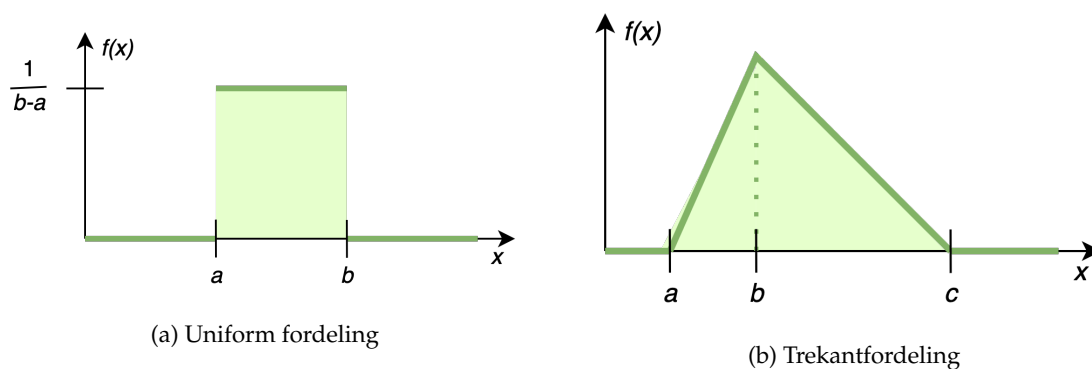
Ressurser er det som kreves for å utføre aktivitetene og har begrenset kapasitet. Vanligvis vil en ressurs bli holdt opptatt når den utfører en aktivitet, og aktiviteten er avhengig av den gitte ressursen for å bli utført. I likhet med entiteter er også ressurser passive. Eksempler på informasjon man samler fra ressurser er kapasitetsutnyttelse og kostnader. I eksemplet med en produksjonslinje kan ressurser være arbeiderne i linja.

En *generator av tilfeldige tall* gir simuleringsmodellen tilfeldige tall for å best mulig etterligne det reelle systemet og dets variasjoner. Et sofistikert simuleringsprogram vil kunne ta inn en rekke sannsynlighetsfordelinger og gi tilbake tilfeldige tall som følger den fordelingen. Optimalt sett vil man se på historiske tall fra det reelle systemet for å bestemme sannsynlighetsfordelinger. Når lite data fra det reelle systemet er tilgjengelig vil man gjerne ta i bruk uniform eller trekantfordeling. En uniform fordeling tar inn to verdier: minimum a og maksimum b . Alle tall mellom a og b vil ha like stor sannsynlighet for å bli generert. For det kontinuerlige tilfellet kan tetthetsfunksjon sees i figur 3a. Den er definert slik:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{hvis } a < x < b \\ 0 & \text{ellers} \end{cases}$$

En trekantfordeling vil ta inn tre tall: minimum a , mode (mest sannsynlige verdi) b og maksimum c . Genererte tall vil altså fordele seg mellom a og c på en måte slik at b er det mest sannsynlig. Den er trolig en svak tilnærming av et datasett, men brukes fordi den er så enkel å bruke. Tetthetsfunksjonen til en trekantfordeling kan sees i figur 3b, og er definert slik:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{for } a \leq x \leq b \\ \frac{2(c-x)}{(c-b)(c-a)} & \text{for } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{ellers} \end{cases}$$

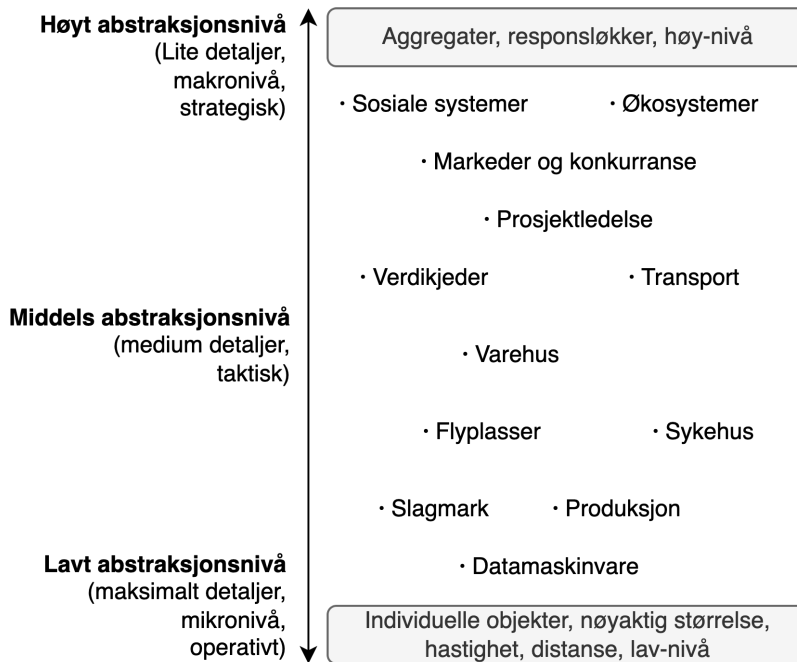


Figur 3: Viser tetthetsfunksjonen til de to sannsynlighetsfordelingene.

En kalender er den delen av simuleringmodellen som holder styr på tiden og planlagte aktiviteter. Det er hovedsaklig to typer variabler: *globale variabler* og *tilstandsvariabler*. Globale variabler er variabler i oppsettet av modellen. De kan sees på som parametre, da man har muligheten til å endre disse for å se hvordan modellen oppfører seg under forskjellige vilkår. Tilstandsvariabler er variabler som handler om det praktiske rundt simuleringen. Et eksempel på en tilstandsvariabel er nåværende tid. *Statistikksamlere* er rett og slett definerte funksjoner som samler statistikk fra simuleringen slik at man sitter igjen med output.

2.2.3 Abstraksjonsnivå

For å gi et inntrykk av abstraksjonsnivå er det i figur 4 bruksområder for simulering sortert etter abstraksjonsnivå. I bruksområdene øverst vil man ikke bry seg om detaljer og stort sett alt vil være tilnærminger. Formålene hos disse vil også være å finne trender i større mengder. Man vil muligens ikke bry seg om individer i det hele tatt og kun fokusere på grupperinger isteden. Etterhvert som



Figur 4: Applikasjoner av simulering med abstraksjonsnivå (Borshchev, 2013).

man går nedover i figuren vil mengden detaljer og nøyaktighet øke. På bunnen vil man strekke seg langt for å unngå tilnærminger og isteden bruke reelle størrelser. Typisk simuleres intrikate systemer med høy nøyaktighet. Systemene vil også være fysisk mindre, da det vil ta for lang tid om man for eksempel skal modellere en hel verdikjede på et slikt detaljnivå. Abstraksjonsnivå er altså hvilket detaljnivå man modellerer og hvor mange tilnærminger man tolererer. Å velge riktig abstraksjonsnivå er nødvendig for å lykkes med et modelleringsprosjekt (Borshchev, 2013). De legger føringer for hvilken modelleringsmetode som bør brukes og hvilken informasjon som er nødvendig og ikke.

2.3 Sammendrag av teori

Gjennom kapitlet har det blitt beskrevet en rekke begreper, teorier og metoder. Nå vil det komme en oppsummering som beskriver hvordan disse vil bli brukt i oppgaven.

Vareflytanalyse introduserte et vokabular for diskutere vareflyt. Vokabularet inkluderer sentrale begreper som varer, flyt og systemer som vil brukes gjennom hele oppgaven. Gjennom begrensningsteorien beskrives hvorfor og hvordan man jobber med å forbedre flaskehalsen. Denne er sentral i den overordnede strategien i oppgaven, og vil trekkes inn for å besvare forskningsspørsmålene i kapittel 6 og diskusjonen i kapittel 7. I tillegg ble planleggingmetoden drum-buffer-rope beskrevet som også brukes i kapittel 6. Diverse mål på vareflyt og to metoder for å identifisere flaskehalsen ble introdusert. Disse blir brukt som output fra simuleringen som presenteres i kapittel 5, og brukes til å besvare forskningsspørsmål 1 og 2.

Når det kommer til simulering ble det først beskrevet fordeler og ulemper med simulering som metode, samt i hvilke tilfeller det lønner seg å bruke det. Dette er relevant teori for å begrunne valget av simulering som metode. Videre ble de tre modelleringsmetodene for simulering beskrevet kort. Dette skal gi forståelse for valget som ble tatt da det i metode-kapitlet, kapittel 3, ble bestemt å bruke diskret-hendelse-modellering som modelleringsmetode. Diskret-hendelse-modellering ble så beskrevet i mer detalj. Dette sees igjen i kapittel 3. Til slutt ble begrepet abstraksjonsnivå introdusert slik at det er med forståelig hva som menes med det i kapittel 3.

3 Forskningsmetode

Dette kapitlet gjør rede for forskningsmetodene brukt i oppgaven. Dette innebærer et litteratursøk, kartlegging av case-bedriften, valg av modellerings- og simuleringsstrategi, samt gjennomføring av simuleringen. Bakgrunnsinformasjon om en del av metodene er allerede lagt frem i kapittel 2.

I oppgaven benyttes det både kvalitative og kvantitative forskningsmetoder. Kvantitative forskningsmetoder baserer seg på håndfaste og målbare resultater. Ofte benyttes matematiske og statistiske metoder i disse, og man benytter seg av tall. Kvalitative forskningsmetoder derimot handler derimot mer om subjektiv tolkning. Man ser på beskrivelser, bilder eller lignende for å forstå hvordan noe fungerer. (Karlsson, 2009)

Litteratursøk og case-studiet bidrar til den kvalitative delen av oppgaven. Resultatet fra litteratursøket er spredd utover oppgaven der hvor det er relevant og vil spesielt bidra i teorien i kapittel 2 og diskusjonen i kapittel 7. Case-bedriften presenteres i kapittel 4. Simuleringsmodellen bygger på denne.

Simulering er en kvantitativ metode som genererer data som skal analyseres. Output fra simulering presenteres i kapittel 5, og vil brukes til å besvare forskningsspørsmål 1 og 2. En del av case-studiet vil altså bestå av å samle inn kvantitative data. Metodene vil nå beskrives i mer detalj.

3.1 Litteratursøk

For et forskningsprosjekt vil et litteratursøk gi historisk bakgrunn, et overblikk over dagens situasjon innen litteraturen og introdusere relevant terminologi og teori (Karlsson mfl., 2016).

Denne oppgaven utforsker et tema som allerede er godt dokumentert innenfor litteraturen, men som fremdeles gjør fremskritt. Dermed er det hensiktsmessig å ta i bruk både publikasjoner fra nyere og eldre forskning, samt bøker for etablert kunnskap. Flesteparten av bøkene ble hentet fra tidligere pensum i studiet, men det ble også supplert med relevante bøker fra NTNUs bibliotek og NTNU-bibliotekenes nettplattform, Oria. Artikler og andre publikasjoner ble funnet på følgende nettsider: Google Scholar, NTNU Open og ScienceDirect. Der det er relevant ble det gjenbrukt kilder fra prosjektoppgaven som ble gjennomført i faget TPK4530 høsten 2021.

Formålet med litteratursøket var å utforske hvordan simulering brukes i nylig forskning, samt å legge grunnlaget for teorien. I hovedsak ble litteratursøket gjennomført usystematisk. Først ble to hovedtema definert ut fra oppgaveteksten. Deretter ble disse utforsket hver for seg. Typisk ville utforskingen starte med innledende søk på Google Scholar for å bli kjent med terminologi og anvendelsesområder. Videre gikk den over til å finne relevante bøker eller mer spesifiserte søk på relevante og relaterte undertema. I videre søk ble forskjellig sortering brukt ut fra formål, for eksempel ble kun artikler publisert de siste tre år utforsket når formålet var å finne ut hvordan dagens forskning på området

ser ut. I arbeidet med å danne det teoretiske grunnlaget for oppgaven ble også referanser i sentrale artikler fulgt. Hovedtema og relaterte undertema kan sees i tabell 4. Hovedtema ble også utforsket i sammenheng med hverandre og på kryss og tvers av undertema.

Tabell 4: Søkeord brukt i litteratursøk.

Hovedtema	Undertema
Production	Bottleneck
	Material flow
	Analysis
	Production Flow
	Smart manufacturing
	Big data
	Theory of Constraints
Simulation	Modelling
	Discrete event
	Digital shadow
	Digital twin
	Automatic data collection

3.2 Kartlegging av case-studiet

Holweg mfl. (2015) argumenterer for at oppdagelse og observasjon er like viktig som litteratursøk når man skal skape et meningsfullt bidrag til teorien. Oppdagelse og observasjon blir tilført denne oppgaven gjennom et case-studie av Orkla Råbekken. Formålet med dette var først og fremst å kartlegge nok informasjon til å skape en digital simuleringsmodell som kan gi realistisk innsikt i bedriften. Dette kapitlet vil beskrive hvordan case-studiet ble gjennomført og verktøyene som ble brukt: prosesskartlegging og styringsmodell. Case-bedriften presenteres i kapittel 4.

Case-studier er ofte brukt når man skal teste komplekse, reelle situasjoner, som for eksempel organisatoriske eller ledelsesmessige prosesser. Man kan enten gjøre et case-studie av mange forskjellige caser for å finne trender eller gå i dybden i én case, som til gjengjeld er bedre for utforskning og teoribygging. I tillegg er det to forskjellige typer tilnærminger til caser: kvalitative og kvantitative. Sistnevnte er typisk best for å bygge forståelse og for tolkning. Denne oppgaven ønsker å kartlegge og foreslå forbedringer i et kompleks, reelt produksjonsmiljø. Det ble valgt å gjøre et dyptgående case-studie av én enkelt case med en blanding av et kvalitativt og kvantitativt fokus. Fordi simuleringsmodellen må bygges på både de kvalitative og kvantitative egenskapene til det reelle systemet. (Karlsson mfl., 2016)

Det praktiske rundt case-studiet summeres opp i to deler: et besøk og etterarbeid. Besøket foregikk 3. og 4. mars 2022. Formålet var å bli kjent med produksjonslinja og vareflyten, samt å komme i kontakt med

nøkkelpersoner og få et visuelt overblikk over linja. Det besto av vandring ute i produksjonslokalet og møter med nøkkelpersoner. Under etterarbeidet har kommunikasjon foregått over e-post og digitale møter. Først ble informasjon samlet, kokt ned, og noe av det visualisert i figurer. Dette ble sendt til fabrikken for validering. Deretter ble det utformet en liste over informasjon som var nødvendig for å lage den digitale simuleringsmodellen. Den etterspurte informasjonen besto hovedsaklig av tidsbruk og kapasitet til de forskjellige maskinene og stasjonene på linja, og ble besvart av nøkkelpersonene.

For å kartlegge informasjonen som trengtes for å ordne en simuleringsmodell ble det brukt to verktøy: prosesskartlegging og styringsmodell. En prosesskartlegging går ut på å definere prosesser, hvem som er ansvarlige og hvilke standarder de følger. Her ble det fokusert på prosesser som ble utført av arbeidere på linja under standard produksjon. Det ble kun kartlagt prosesser som skulle bli del av den digitale simuleringsmodellen. Det ble sett bort fra vedlikeholdsarbeid, omstilling og uforutsette hendelser som stopp i linja. De kartlagte prosessene ble visualisert i flytskjema. En styringsmodell er en abstraksjon av en bedrift med fokus på produksjon og logistikk, og styring av disse (Strandhagen, 2015). Det brukes ofte under rekonstruksjon av produksjons- og logistikksystemer, men ble i denne oppgaven brukt for å skaffe en helhetlig forståelse av case-bedriften og dens drift. Dermed ble det kun skapt en AS-IS-modell, og i resten av oppgaven er den kun snakk om en AS-IS-modell når det er snakk om styringsmodellen. Figuren som er del av styringsmodellen gir et oversiktlig bilde over vare- og informasjonsflyt og styring.

Tabell 5 viser en oversikt over nøkkelpersoner og hvilken informasjon som er mottatt fra hver av de.

Tabell 5: Oversikt over nøkkelperson og informasjon mottatt fra hver av dem.

Stilling	Kvalitativ informasjon	Kvantitativ informasjon
Kvalitetsleder	Generell layout og vareflyt, introdusere nøkkelpersoner, utfordringer i produksjonslinja, potensielle falskehalsar.	Størrelse på stetter, størrelse og antall hekker, kapasitet og tidsbruk for blandemaskiner, kapasitet og tidsbruk i kokeskap, størrelse på pølser, tid i kjøling og antall pølser i pakking.
Produksjonsleder, råvareavdeling		Output fra ORM-linje og kvern.
Logistikksjef	Relevante problemstillinger.	Produksjonsordre og masterdata.
Planleggingsansvarlig	Hvordan planlegging foregår og hvilken informasjon som benyttes.	
Produksjonssjef		Hastighet og stopptid for pakkemaskiner
Kvalitetsleder, pakkeavdeling	Logikk på pakkeavdeling	
Teknisk sjef		Plantegning og tekniske tegninger

3.3 Modellering- og simuleringstrategi

Å teste endringer kan være både tidkrevende og dyrt, spesielt dersom det krever investeringer i nytt utstyr eller store endringer. Simulering gir muligheten til testing i trygge omgivelser, hvor man kan gjøre feil, gå tilbake i tid og begynne fra starten igjen (Borshchev, 2013). For å kjøre en simulering er man avhengig av en modell. Dette delkapittelet vil beskrive metoden for modellering og simulering brukt i oppgaven.

Analytisk modellering er den eldste formen for modellering (Borshchev, 2013). Dessverre blir fysiske systemer ofte for komplekse til at det i det hele tatt er mulig å finne analytiske løsninger på deres problemer. Denne oppgaven tar for seg en produksjonslinje, som raskt kan bli et svært komplekst system bestående av en rekke aktiviteter og ressurser. Her er simulering et mye mer passende verktøy for å løse problemer på grunn av dets evne til å håndtere mer komplekse systemer. Borshchev (2013) nevner en rekke fordeler ved simulering, dette er noen av de mest relevante for denne oppgaven:

- Simuleringsmodeller lar deg analysere og finne løsninger hvor andre metoder, som analytiske kalkulasjoner eller lineærprogrammering, feiler.
- Når man har valgt korrekt abstraksjonsnivå er utviklingen av en simuleringsmodell enklere enn analytisk modellering. Det krever typisk mindre intellektuell innsats, er skalerbart, inkrementelt og modulært.
- Strukturen til simuleringsmodellen gjenspeiler det virkelige systemet. Siden simuleringsmodeller stort sett blir utviklet med visuelle verktøy er det enkelt å formidle modellens funksjonalitet til andre.
- I en simuleringsmodell kan man måle hvilken som helst verdi eller spore hvilket som helst entitet som ikke er under abstraksjonsnivået. Målinger og statistisk analyse kan bli lagt til når som helst.

Programvare

Når man skal modellere og simulere komplekse systemer er det nyttig å bruke en simuleringsprogramvare. Det fins en mengde slike programmer, og for å velge det riktige må det passe med oppgavens formål og modelleringsmetode. For å velge riktig program for denne oppgaven ble det identifisert hvilke krav som stilles til programvare:

- Må støtte diskret-hendelse-simulering.
- Må ha mulighet til å utvide funksjonalitet gjennom programmering, helst ved et kjent programmeringsspråk.
- Må ha støtte og dokumentasjon tilgjengelig på nett.
- Må fungere på Mac.

- Erfaring med programmet på instituttet er et pluss slik at konsultasjon er mulig ved behov.
- I oppgavebeskrivelsen ble det lagt frem ønske om å skape en 3D-modell. Programmet må ha mulighet for dette, og enkel implementasjon vil være en fordel.

Professor Fabio Sgarbossa ble konsultert og kom med to forslag: Anylogic og Automod. Det ble gjort et internettsøk rundt disse, hvor funn kan sees i tabell 6. Begge programmer støtter de fleste krav, men med hovedargument at dokumentasjonen for Automod var vanskelig å finne og at Anylogic bygger på Java, ble Anylogic valgt. Nyeste versjon, altså versjon 8, ble tatt i bruk. I tillegg har Anylogic en rekke kurs og materiell tilgjengelig på nett som er skapt for at det skal være raskt og enkelt å lære.

Tabell 6: Egenskaper ved Anylogic og Automod.

Krav	Anylogic	Automod
Støtter diskret-hendelse-simulering	Ja	Ja
Mulighet for utvidet funksjonalitet	Ja, med Java	Ja, eget språk
Støtte og dokumentasjon på nett	Ja	Mulig, vanskelig å finne
Fungerer på Mac	Ja	Ja
Erfaring på instituttet	Ja	Ja
3D-modellering	Ja	Ja

Beskrivelse av modelleringsmetode

Fokuset i denne oppgaven ligger på fysisk vareflyt og begrensning av denne. Da er det naturlig å se på prosessene som blir utført og ressursene som blir brukt. Dermed er det naturlig å velge *diskret-hendelse-modellering* som metode, som beskrevet i kapittel 2. Simulering av diskret-hendelse-modeller er vanlig for flaskehalsdeteksjon (Borshchev, 2013). Produksjonslinja kan modelleres uten bruk av sirkulære avhengigheter, så systemdynamisk modellering er ikke nødvendig og ville vært for abstrakt. Produktene og ingrediensene i produksjonslinja er passive og oppgavene til arbeiderne enkle. Med andre ord var det ikke behov for individuell og tilpasset oppførsel hos verken entiteter eller ressurser, og agent-basert modellering ble valgt bort.

For å identifisere flaskehals med god treffsikkerhet må man ha en modell med høy nøyaktighet. Hver prosess og dens tidsbruk bør repliseres så riktig som mulig. Et *lavt abstraksjonsnivå* er valgt, og det er forsøkt å bruke så nøyaktige tall som mulig på tidsbruk, kapasitet, hastigheter og distanser. I simuleringen av en diskret-hendelse-modell er hvert tidsintervall en diskret hendelse. Tidsenheten valgt i simuleringmodellen er *sekunder* for å være så nøyaktig som mulig. Det var ikke hensiktsmessig å velge en lavere tidsenhet siden det ikke ville utgjort noen forskjell på resultatene over flere timer med simulert tid, i tillegg til at data mottatt fra det fysiske systemet ikke var mer nøyaktig.

Metode for diskret-hendelse-modellering ble fulgt: produktene som beveger seg gjennom linja ble modellert som entiteter, det som utfører arbeid (arbeidere og trucker) som ressurser, og maskiner

og ressurskrevende prosesser som aktiviteter. Implementeringen er basert på styringsmodellen og prosesskartleggingene. Hekker til å henge pølser på ble implementert som en ressurs da antall hekker er en mulig begrensning. Aktiviteter består hovedsaklig av en kø- og en vent-blokk som til sammen representerer kapasiteten og tiden brukt til den fysiske motparten. En oversikt over modellerte entiteter, ressurser og aktiviteter kan sees i tabell 7.

Tabell 7: Oversikt over modellerte entiteter, ressurser og aktiviteter.

Entiteter	Ressurser	Aktiviteter
Kjøttblokk	Arbeidere	Fjerne plast
Kvernet kjøtt	Gaffeltrucker	Kverne kjøtt
Pølsefyll	Hekker	Frakte til blander
Pølser		Hente tørrvarer
F-pak		Blande
D-pak		Frakte til oppbevaring
		Stoppe pølser
		Henge pølser på hekk
		Frakte til ovn
		Koke/dampe
		Avkjøle
		Kutte fra hekk
		Pakke i f-pak
		Pakke i d-pak

I simuleringmodellen er det tatt høyde for en rekke logiske hendelser for å etterligne det fysiske systemet. Når det behøves ressurser, som en gaffeltruck eller en hekk, vil disse bli okkupert og tilknyttet entitetene som behøver dem. Dersom det ikke er noen ressurser tilgjengelig vil entitetene stå å vente. Og dersom kapasiteten i aktiviteten de venter er full, vil aktiviteten bli blokkert. Når maskiner tømmes, for eksempel kvern, blander eller ovn, vil de ikke ta inn nye entiteter før de er klare. Tiden brukt på frakt mellom aktiviteter beregnes av simuleringprogrammet, uavhengig om det skjer via transportbånd eller gaffeltruck. Denne beregningen baseres på oppgitt hastighet hos transportbånd eller truck, og transportrute kalkuleres automatisk. I simuleringprogrammet tar batching null tid. For å regulere hastigheten til batching til å etterligne den fysiske modellen er det brukt vent-blokker etter batching slik at det tar reell tid. Når ovner skal fylles prioriteres én og én ovn slik at én blir full og startes før den andre begynner å bli fylt. Det er for effektivisere bruken av ovnene.

Det er tatt en rekke antagelser i modelleringsprosessen. Et stort skille mellom det reelle systemet og modellen er at modellen kun tar for seg pølseproduksjon, mens det i virkeligheten foregår flere produksjonsprosesser samtidig. En arbeider kan ha oppgaver i begge disse prosessene og må prioritere mellom de selv. Siden andre produksjonsprosesser ikke er med i modellen vil arbeiderne i modellen

stå å vente i tiden der de normalt har aktiviteter som krever deres kapasitet. I virkeligheten ville de funnet noe å gjøre. I tillegg er arbeid som blir utført av andre avdelinger antatt fullført til korrekt tid. For eksempel at tørrvareavdelingen har målt opp riktig varer til riktig tid slik at arbeiderne på pølseavdelingen aldri behøver å vente på disse. Det er også lagt inn sannsynlighetsfordelinger der hvor det er relevant for å skape et mer realistisk bilde av simuleringen. I informasjonen fra fabrikken er det ofte hele, runde tall på maskiners kapasitet og hastigheter. I modellen er det da lagt inn en fordeling, enten trekant- eller uniform fordeling, slik at det gjennomsnittlig gjenspeiler den reelle maskinen.

Det er gjort omregninger for å imitere funksjonaliteten til en ekte prosess. Ta for eksempel kjøttkverna hvor det ble oppgitt at den spytter ut M kg per time og har en kapasitet på V liter. Entiteten på dette tidspunktet er kvernet kjøtt, som er representert i blokker på m kg og v liter. Først ville det blitt modellert en kø-blokk med kapasitet på V/v entiteter. Deretter en vent-blokk som holder igjen én og én entitet. Tiden vent-blokken holder igjen en entitet er utregnet slik: M kg per time = M/m entiteter per time. 1 time = 3600 sekunder fordelt på M/m entiteter gir $3600/M/m = s$ sekunder per entitet. Ventetiden i blokken er eksempelvis modellert med en trekantfordeling med minimum $s - 8$ sekunder, mode s sekunder og maksimum $s + 8$ sekunder.

Simulering: oppsett og identifisering av flaskehals

Simulering vil egne seg godt i denne oppgaven da formålet er å simulere endringer i systemet og se effekten av dem. Overordnet simuleringsplan er som følger. Først simuleres dagens situasjon. Deretter simuleres 8 forskjellige endringer i systemet. Til slutt brukes en innebygd funksjonalitet i Anylogic som finner en "best mulig" sammensetning av endringer. De 8 endringene og optimaliseringssimuleringen kalles scenarier, og beskrives i kapittel 5. Hver simulering simulerer 12 timer med uavbrutt produksjon.

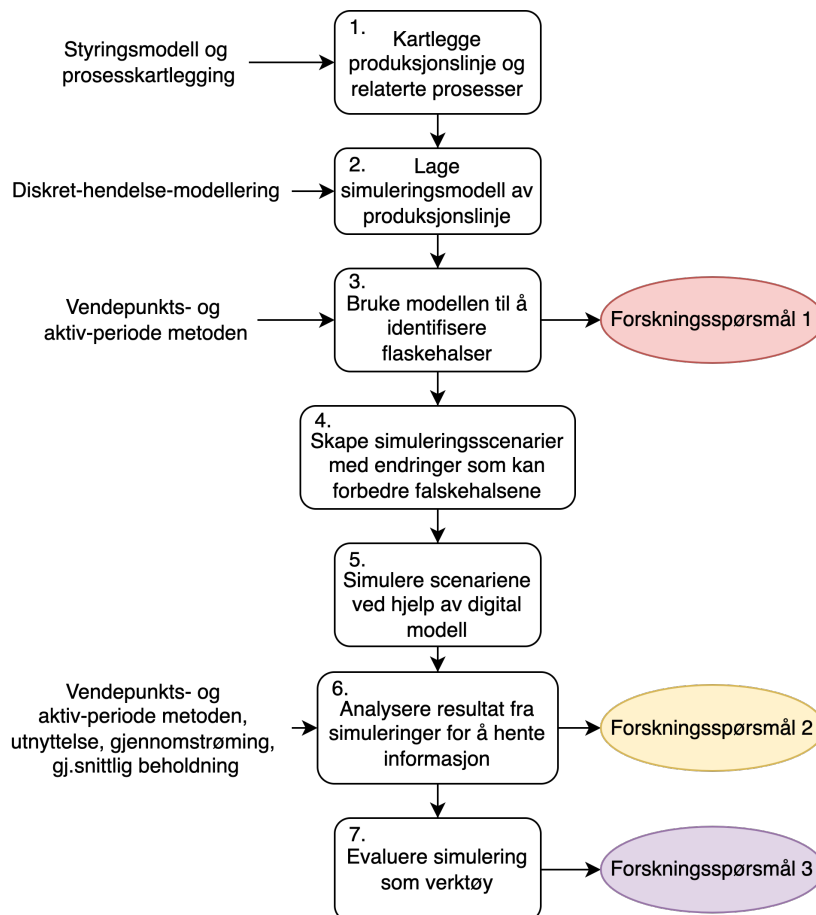
For å finne flaskehalsen, altså besvare forskningsspørsmål 1, benyttes en strategi som stammer fra begrensningsteorien. Begrensningsteorien sier at en flaskehals er det som begrenser gjennomstrømmningen i systemet, og at én time spart i noe som ikke er flaskehalsen vil være bortkastet. Derfor er det kun en forbedring av flaskehalsen som kan føre til en forbedring av systemet som helhet, og det er dette som ligger til grunn for strategien. Potensielle flaskehalsen forkastes dersom forbedring av de ikke fører til noen forbedring av systemet som helhet. Dette er en av grunnene til at scenariene tester forskjellige endringer i systemet. Siden det benyttes en simuleringmodell er det lett å implementere endringer, sammenlignet med for eksempel en analytisk modell.

For å oppnå innsikt i og evaluere simuleringsscenariene er det valgt å ta i bruk to datadrevne metoder, nemlig vendepunkts- og aktiv periode-metodene. Disse vil brukes på data fra simuleringsscenariene for å si noe om hvordan systemet har endret seg. De er valgt fordi de raskt og enkelt kan gi verdifull innsikt i linja. Samtidig vil de peke mot flaskehalsen uavhengig om flaskehalsen er en maskin, arbeider eller prosess.

I tillegg til vendepunkts- og aktiv periode-metodene vil simuleringsscenariene måles på *endring i gjennomstrømning* og *endring i gjennomsnittlig beholdning* slik målene ble definert i teorikapitlet, samt *gjennomsnittlig antall pølser produsert hver time*. Den siste er inkludert for å si noe om prestasjonen midtveis i linja, og måler hvor mange pølser som er klippet av sin hekk, altså før pølsene går til pakking. Disse tre målene er kalt nøkkeltall og presenteres i tabeller lik tabell 8. For å regne ut endringen i beholdning, flyttid og gjennomstrømning sammenlignes det med grunntilfellet, altså modellen av dagens system. Nøkkeltallene er satt sammen for å gi et helhetlig inntrykk av hvordan systemet endrer seg i hvert simuleringsscenario. Figur 5 er en oversikt over hvor de forskjellige metodene blir brukt i oppgaven.

Tabell 8: Eksempel på tabell for å presentere nøkkeltall fra simuleringsscenarier.

Scenario x: Kort beskrivelse		
Gj.strømning	Δ beholdning	Pølser/time



Figur 5: Plan for oppgaven, hvor problemstillingene blir adressert og hvilke metoder som vil bli tatt i bruk.

4 Pølseproduksjon hos Orkla Råbekken

Dette kapitlet presenterer styringsmodellen og prosesskartleggingene av pølseproduksjonen hos case-bedriften. Det skal gi et overblikk over dagens situasjon hos bedriften, samt et mer spesifikt innblikk av pølseproduksjonslinja. Det er denne informasjonen simuleringsmodellen er bygd på. Videre er det i samarbeid med fabrikken utarbeidet noen *potensielle flaskehals*er. Dette er forhold som mistenkes å være flaskehals i pølseproduksjonen.

Case-bedriften er en produksjonsbedrift under Orkla-konsernet som ligger på Råbekken utenfor Fredrikstad. Hovedsaklig produserer de hermetiske eller fryste kjøttprodukter. Mest kjent er Stabburet Leverpostei, men i denne oppgaven er det fokus på pølseproduksjon, så informasjon videre vil i all hovedsak handle om denne.

4.1 Styringsmodell

Det er gjort en kartlegging av fabrikken basert på en styringsmodell, men resultatet presentert i dette delkapitlet vil være mangefult sammenlignet med det beskrevet i Strandhagen (2015). Som nevnt i kapittel 3.2 brukes en AS-IS styringsmodell som et verktøy for å kartlegge informasjon som senere skal brukes til å lage simuleringsmodell. Figur over styringsmodell kan sees i figur 7. Denne vil gi en helhetlig oversikt over styring og vareflyt i pølseproduksjon hos casebedriften.

Marked og kunder

Orkla Råbekken selger pølser til bedrifter. Typiske kunder er bensinstasjonkjeder og andre industrikjøkken. De har relativt få kunder, men med kontrakter på store salgsvolum. På tross av store salgsvolum har de kort ledetid, typisk under 24 timer.

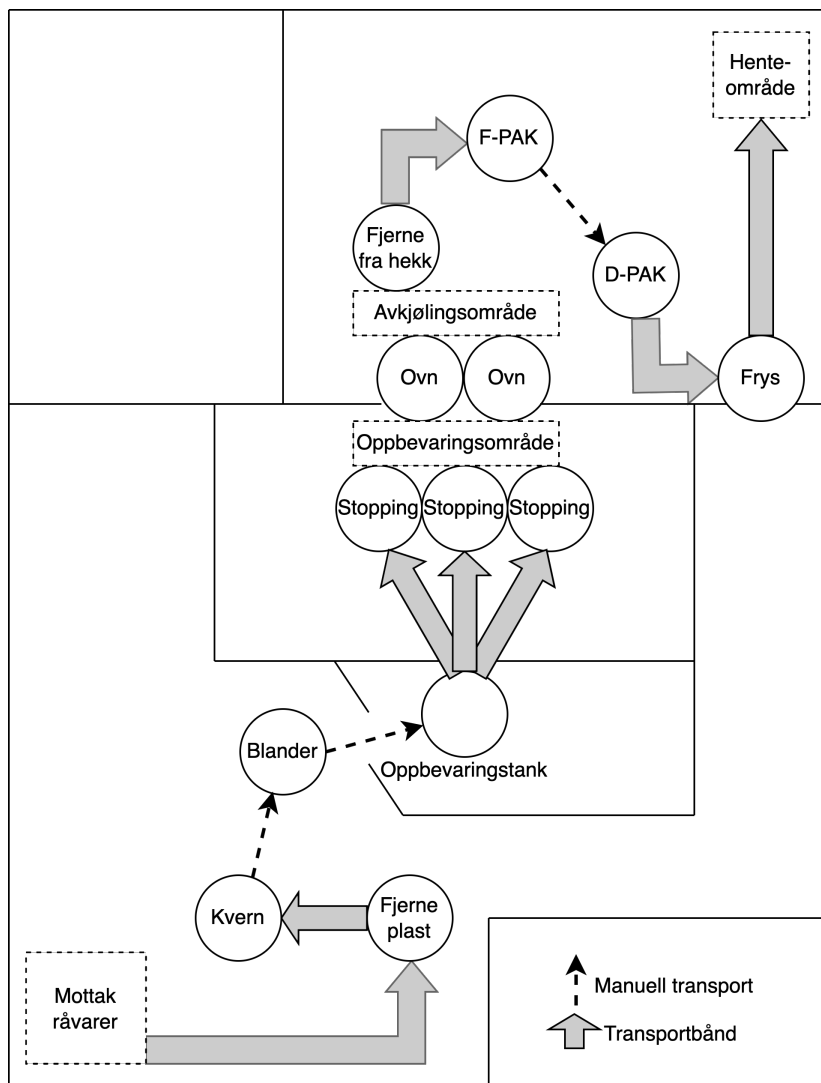
Produkter

Innenfor pølser har de over 20 lagerenheter (stock keeping units) fordelt over 5 produktgrupper: grill-, wiener-, steke-, veganske og Capri-pølser. Alle pølsene bruker én av to typer tarm: natur- eller kunstig tarm. Valg av tarm legger føringer for om de skal skrelles eller ikke og hvilken pakkemetode som må benyttes. I tillegg skilles pølsefyllet på to typer, grov og fin. Grove og fine pølser blandes i forskjellige blandemaskiner. Alle pølser ender opp med å bli fryst.

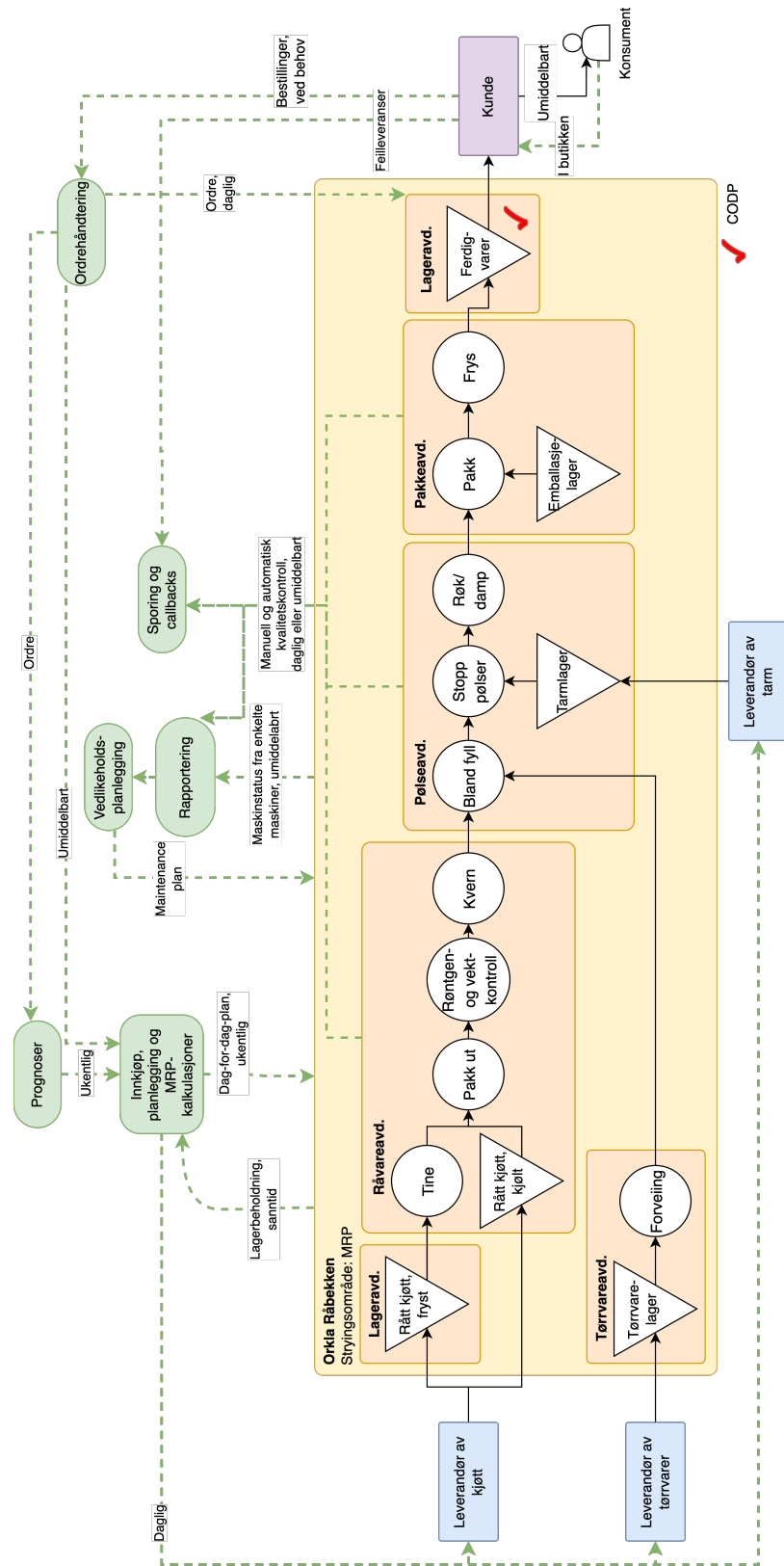
Layout og vareflyt

Pølser produseres i linjeproduksjon med varierende grad av operatørstøtte, og linja må omstilles mellom hver pølsetype. Hovedprosessene er å kverne kjøtt, blande pølsefyll, stoppe pølser, koke/dampe pølser og pakking. "Å stoppe" pølser er ordbruken brukt på fabrikken, og er det samme som å

stappe pølser, altså fylle pøsefyll i tarm. Et sentralt aspekt med ovnene, er at de brukes til flere produkttyper en bare pølser. Dette begrenser tilgjengeligheten for koking av pølser. Om frakt mellom hovedprosessene er automatisert eller ikke varierer med linjeoppsett, og for grillpølser er det som følger: fra råvareområde til fjerning av plast og videre til kvern, fra oppbevaringstank for pøsefyll til stoppelinjer og deler pakke- og fryseprosessen er automatiserte med transportbånd. Mellom de andre hovedprosessene fraktes varene av linjearbeidere, hovedsaklig i stetter eller på hekker. Figur 6 viser en skisse over layout og transportmåter for produksjon av grillpølser og figur 8 viser bilder av en stett og en hekk. Mer informasjon om hvilke prosesser som er automatiserte og ikke kommer frem i prosessbeskrivelsene i neste delkapittel.



Figur 6: Skisse over layout for grillpølseproduksjon.



Figur 7: Styringsmodell over pølseproduksjon hos Orkla Råbekken.



(a) Hekk



(b) Stett

Figur 8: Viser bilde av en hekk og en stett.

Produksjonsplanlegging

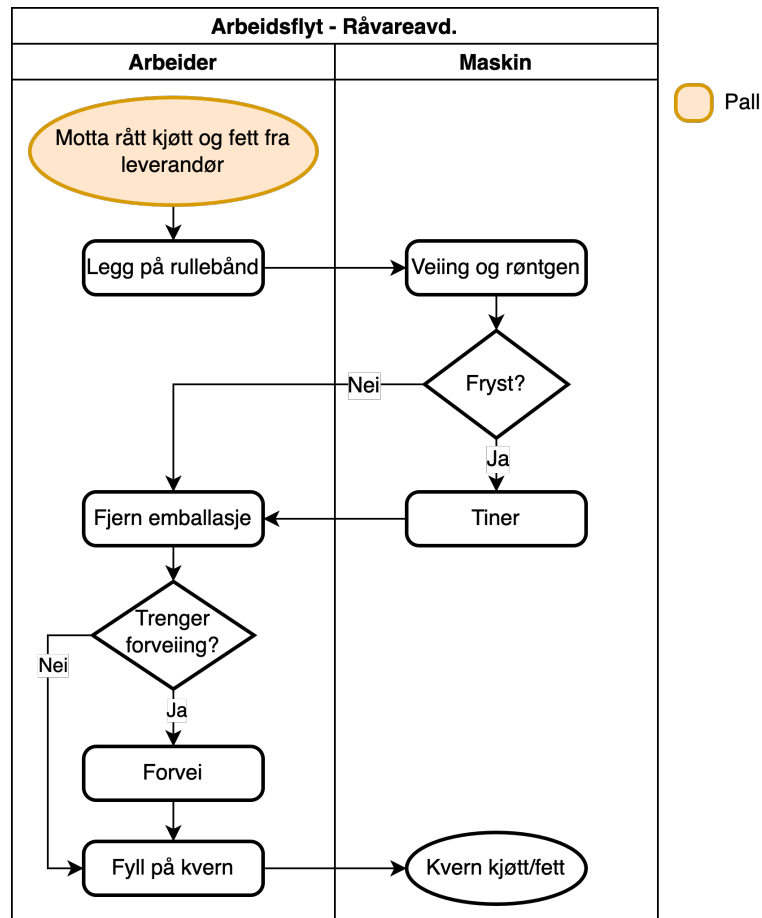
Orkla Råbekken produserer varer til lager. Siden hvert produkt krever omstilling av linja planlegges vanligvis produksjon slik at ett produkt blir produsert på én dag, og så omstilles linja til neste dag og produkt. I planleggingen er erfaring rundt planlegging og linjene sentralt. Produksjonsvolum og hyppighet bygger på prognoser som igjen baserer seg på erfaring og avtaler med kunder.

4.2 Prosessbeskrivelser

Det er gjennomført prosesskartlegginger av produksjonsprosesser. Disse skiller på arbeid utført av maskiner og linjearbeidere. I pølseproduksjon går varene gjennom tre avdelinger: råvare-, pølse- og pakkeavdelingene. De forskjellige avdelingen og overordnet vareflyt kan sees i figur 7. Det er skapt ett flytskjema for prosessen på hver av avdelingene, som nå blir presentert etter tur. Til sammen gir disse en grundig forklaring på arbeidet som blir utført fra start til slutt.

Råvareavdeling

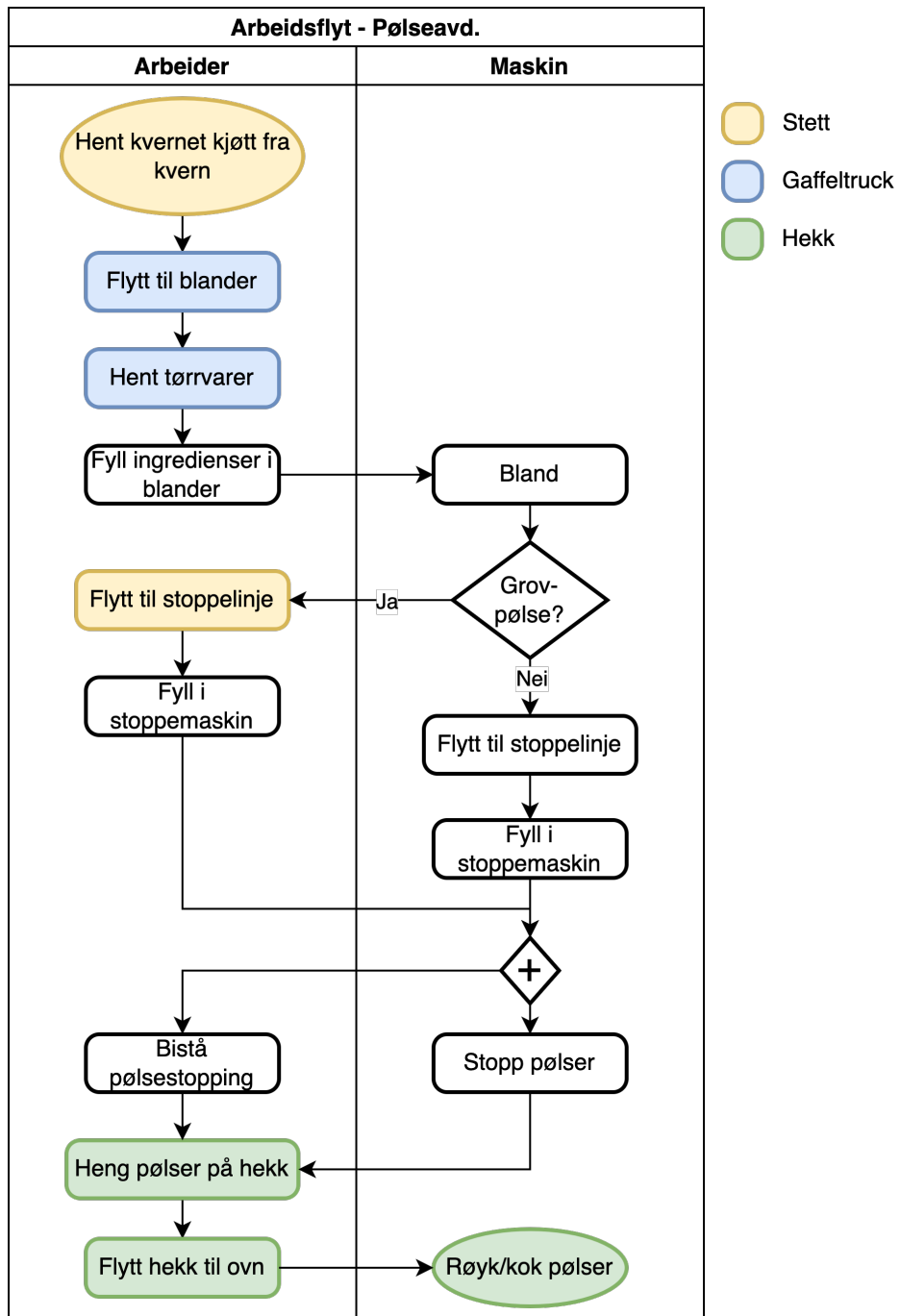
Råvareavdelingen mottar råvarer fra enten lageret eller direkte fra leverandører. Råvarer er kjøtt og fett som kan være fryst eller kjølt i blokker. Disse blokkene lastes manuelt på et transportbånd som er starten på det som kalles ORM-linja. ORM-linja tar blokkene automatisk gjennom en vekt- og røntgenkontroll og videre gjennom en tiner. Deretter kommer det til en linjearbeider som manuelt fjerner plasten. Ut fra råvaren varierer det om varene veies opp og manuelt fraktes bort, eller om de legges på et nytt transportbånd som tar det til kjøttkverna. For grillpølser brukes transportbånd. Her slutter arbeidsoppgavene for råvareavdelingen. Flytskjema over arbeidsflyten sees i figur 9.



Figur 9: Flytskjema over arbeidsflyten på råvareavdelingen.

Pølseavdeling

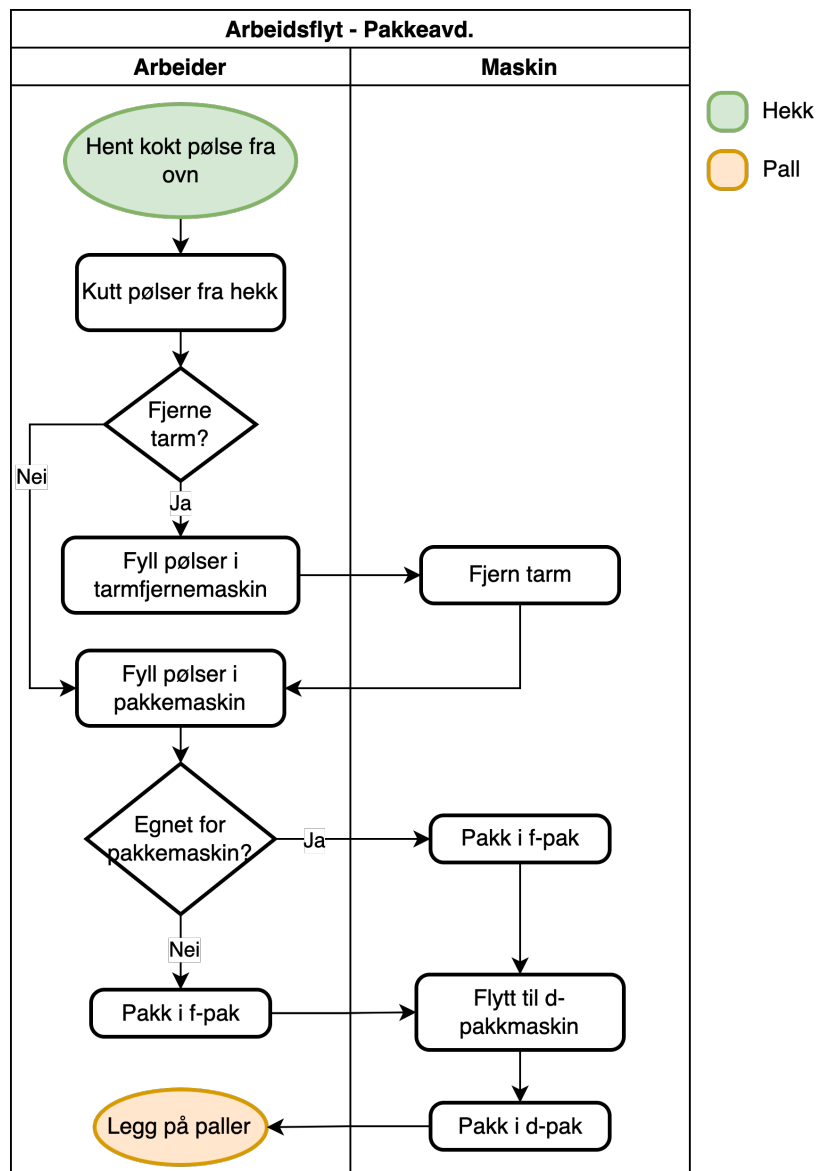
På pølseavdelingen starter arbeidet med at stetter blir fylt med kvernet kjøtt fra kverna. Linjearbeidere må fjerne de fulle stettene, flytte dem til blanderen, og sette tomme stetter til fylling. I tillegg må de hente og fylle krydder og andre tilsetninger som kommer fra tørrvareavdelingen i blanderen. Disse varene er klargjort dagen i forveien. Etter blanding tappes pøsefyllet i stetter og fraktes til en oppbevaringstank. Hvilken oppbevaringstank kommer an på om det er grovt eller fint pøsefyll. For grillpølsens tilfelle er det fint fyll. Herfra fraktes det med rullebånd til stoppelinjene. Det er totalt tre stoppelinjer og de trenger assistanse fra linjearbeidere. Ferdig stoppede følses henges manuelt på hekker. Hekkene flyttes manuelt til ovnområde hvor de står å venter til et kokeskap er klart. Deretter røykes eller dampes de. Figur 10 viser flytskjema over arbeidsflyten.



Figur 10: Flytskjema over arbeidsflyten på pølseavdelingen.

Pakkeavdeling

Pakkeavdelingen henter hekker med ferdig dampede eller røykte pølser fra kokeskap og setter de til kjøling. I praksis står de frem til pakkemaskinen er klar. Linjearbeidere kutter pølsene fra hekkene for hånd. Dersom tarmen skal fjernes, som den skal hos grillpølser, legges pølsene på tarmfjernemaskinen. Etter tarmen er fjernet fylles pølsene på en pakkemaskin. Dersom pølsene tåler det, pakker maskinen pølser i forbrukeremballasje (f-pak), hvis ikke pakkes de for hånd. Om pølsene tåler å bli pakket i pakkemaskinen for f-pak kommer an på type tarm. Pølser i f-pak samles og fraktes med gaffeltruck til en ny pakkemaskin. Denne pakker de i distribusjonsforpakning (d-pak) og tar pakkene videre på et transportbånd som går gjennom en fryser. Til slutt ender de opp til pallepakking. Her samles pallene før de blir hentet av lageravdelingen. Oversikt sees i figur 11.



Figur 11: Flytskjema over arbeidsflyten på pakkeavdelingen.

4.3 Potensielle flaskehals

I løpet av kartleggingen og i ettertid har det kommet frem forhold som fabrikken mener *kan* være flaskehals i produksjonslinja. Senere i oppgaven er det foreslått og simulert mulige løsninger på forholdene. De potensielle flaskehalsene er:

- **For lav kapasitet i kokeskap.** Kokeskapene tar inn flere hekker, og en "runde" med damping eller røyking tar en betydelig mengde med tid. Dette er en potensiell flaskehals.
- **For få hekker.** Hekker er der hvor pølser henges for koking/damping. I dagens situasjon er det mange hekker med pølser stående både før og etter ovnene. Etter bruk må hekkene vaskes før de kan brukes igjen. Man kan havne i en situasjon hvor alle hekker er til bruk eller til vask, og at det dermed begrenser produksjonen.
- **For lav kapasitet i frysemaskin.** Alle varer går gjennom frysetunnelen, og dens kapasitet er uttrykt som en mulig flaskehals.
- **For lav kapasitet i pakkemaskin.** Det samme gjelder som for frysemaksinen.

5 Output fra simulering

I dette kapitlet presenteres output fra de forskjellige simuleringene. I hvert tilfelle er det simulert 12 timer med produksjon, uten pauser og stopp. Modellens starttilstand er tom, altså uten varer. Det er tilsammen gjort simulering av 10 situasjoner. Den første situasjonen simulerer modellen hvor den etterligner dagens system, og kalles grunntilfellet. De påfølgende situasjonene tester endringer i systemet, og kalles scenario 1-9. I dette kapitlet vises output fra hver simulering, mens drøfting av hva de betyr og hvordan de kan tolkes vil skje i kapittel 6. Alle tall som presenteres i dette kapitlet kommer fra simuleringmodellen, og ikke fra det reelle systemet.

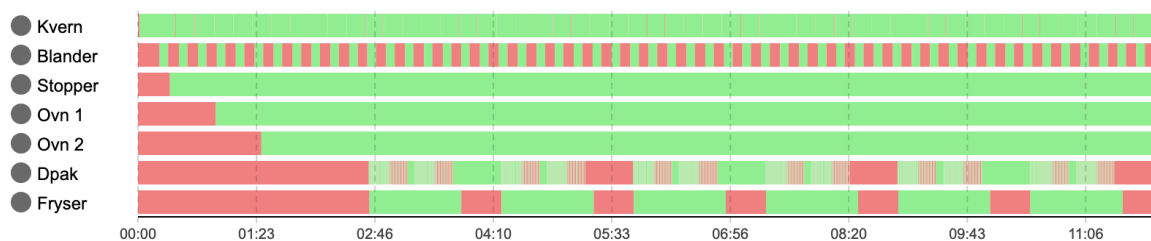
5.1 Simulering av dagens system

Denne simuleringen forsøker å etterligne dagens system. Output fra simuleringen blir brukt til å identifisere flaskehalsen. I tillegg blir de brukt som grunntilfelle for å sammenligne med simuleringsscenariene som kommer senere. Tabell 9 viser nøkkeltall fra simuleringen.

Tabell 9: Nøkkeltall fra simulering av grunntilfellet.

Grunntilfelle		
Gj.strømning	Beholdning	Pølser/time
1 125 dpak	12 493 kg	5923

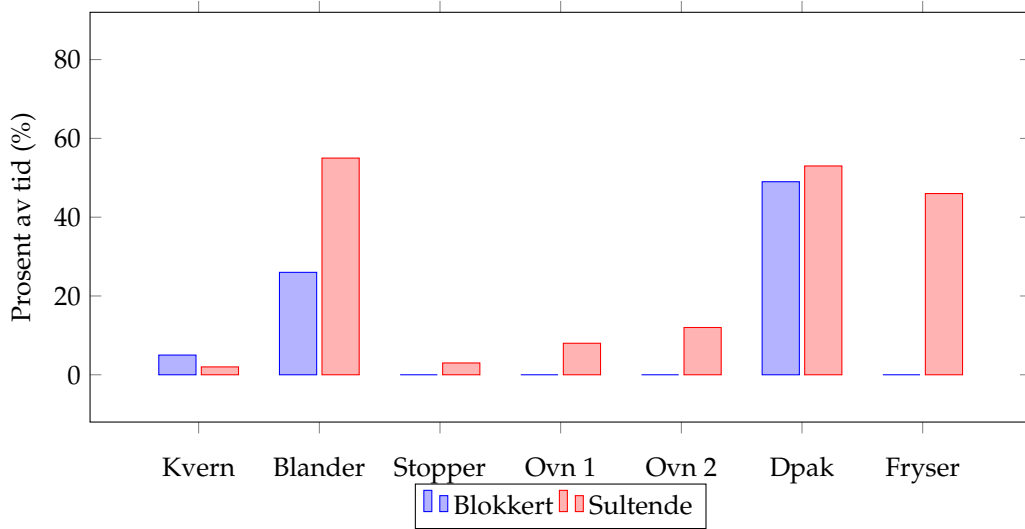
Figur 12 viser aktive og inaktive perioder for maskinene i linja. Både kvern, stopper og de to ovnene kjører uavbrutt fra det tidspunktet de starter å ta imot varer. Blanderen og fryseren bytter periodisk mellom å være aktive og inaktive. Maskin for d-pak bytter mye mellom å være aktiv og inaktiv, men følger en syklus.



Figur 12: Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simulering av grunntilfelle. Grønn er aktiv og rød er inaktiv.

I figur 13 vises hvilken andel av simuleringstiden som maskinene er blokkert eller sultende. Kvern, stopper og de to ovnene skiller seg igjen ut ved at de tilbringer lite tid både som blokkert og sultende.

Blanderen og d-pak utmerker seg med at de bruker mye tid i begge tilstandene, og fryser er sultende mye av tiden.



Figur 13: Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i grunntilfellet.

5.2 Simuleringsscenarier

Simuleringsscenariene har testet ulike endringer i systemet. De fire første simuleringsscenariene tester endringer basert på de potensielle flaskehalsene som kom frem under kartleggingen av case-bedriften, og som ble presentert i kapittel 4. Simuleringsscenario 5-8 er skapt av meg basert på resultatene fra simuleringen av dagens system, og tester endringer rundt andre mulige flaskehals. Den siste simuleringen benytter seg av innebygd funksjonalitet i Anylogic for å finne den optimale kombinasjonen av endringer. Simuleringsscenariene med resultater vil presenteres i hvert sitt underkapittel.

5.2.1 Scenario 1: Ekstra ovn

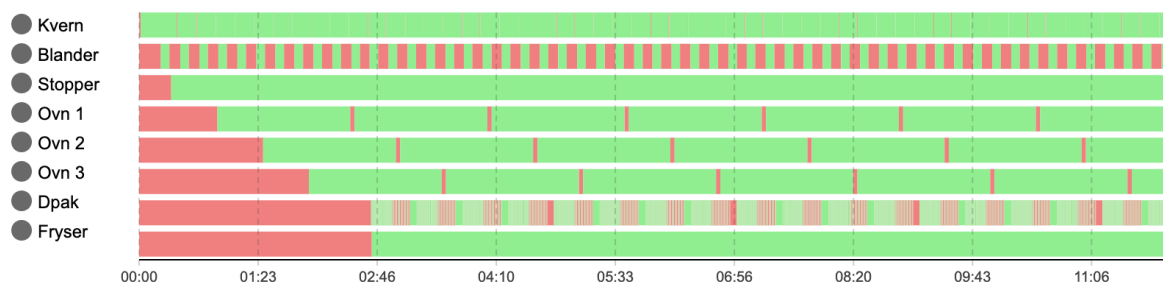
Under kartleggingen av systemet ble kapasiteten til ovnene presentert som potensiell flaskehals. Som en løsning på dette ble det simulert et tilfelle med en ekstra ovn i produksjonslinja. Den nye ovnen ble antatt å være lik de to andre med samme kapasitet og koketid. Hekker ble fordelt slik at en og en ovn fylles opp etter tur. I layouten ble den plassert ved siden av de andre to ovnene, og det var de samme arbeiderne som fikk ansvar for å fylle og tømme den.

Tabell 10 viser endringen i nøkkeltall fra grunntilfellet. Både gjennomstrømning og pølser/time har økt, mens gjennomsnittlig beholdning i systemet har minket.

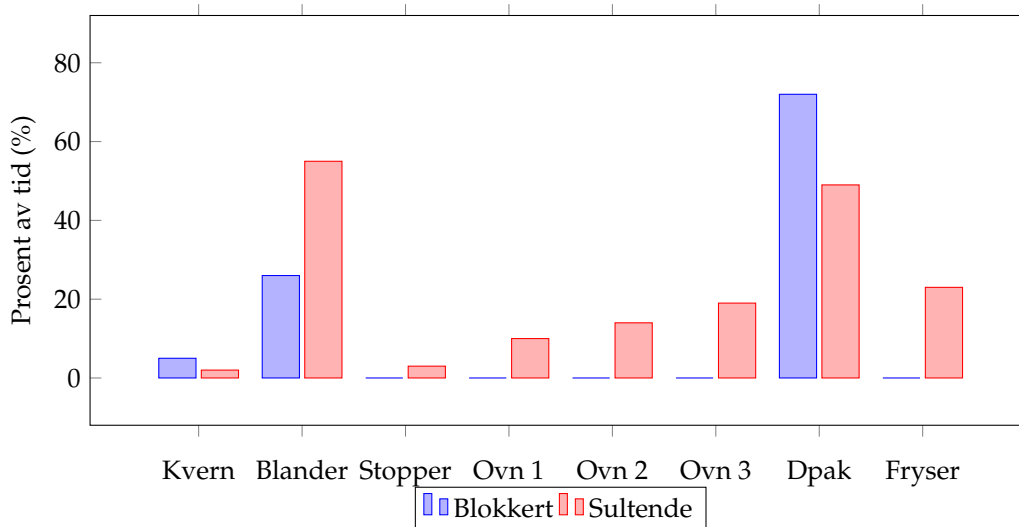
Tabell 10: Nøkkeltall fra scenario 1.

Scenario 1: Ekstra ovn		
Δ Gj.strømning	Δ beholdning	Δ Pølser/time
+503 dpak	-1986 kg	+2780

Figur 14 viser de aktive og inaktive periodene for maskinene. Her er det en del forskjeller fra grunntilfellet. Det som er annerledes er at ovnene opplever inaktive perioder, d-pak er mindre inaktiv og fryser har ingen inaktive perioder etter den først har satt i gang. I figur 15 vises tid som blokkert og sultende for hver maskin. Her er det også differanser fra grunntilfellet. Ovnene sulter noe mer og fryseren sulter mindre. I tillegg er d-pak blokkert mye mer av tiden.



Figur 14: Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 1.



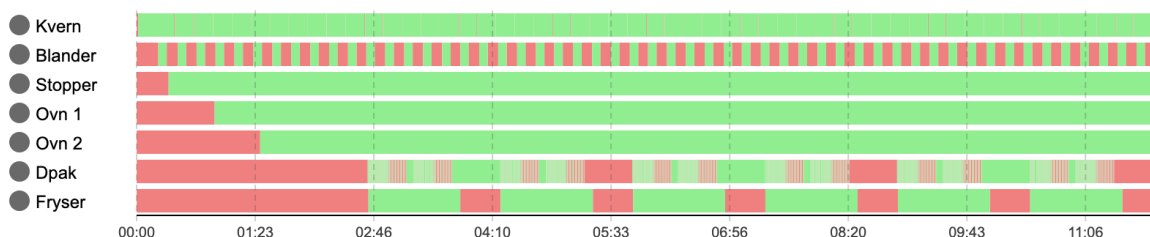
Figur 15: Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 1.

5.2.2 Scenario 2: Flere hekker

Antallet hekker ble lagt frem som en potensiell flaskehals. Det kan oppstå en situasjon hvor alle hekker enten er til bruk, eller til vask og at de dermed begrenser produksjonen. I simuleringmodellen er dette implementert på følgende måte. Etter pølser blir stoppet blir de hengt på en hekk, som er implementert som en ressurs. Hekken er knyttet til disse pølsene frem til de klippes av hekken etter avkjøling. Da frigjøres hekken. Deretter blir den fraktet til et vaskeområde hvor den står i "karantene" tilsvarende tiden det tar å vaske den, før den blir tilgjengelig for å henges pølser på igjen. I dette simuleringsscenariet er antall tilgjengelige hekker i systemet økt med 50%. Det førte ikke til noen forandring fra grunntilfellet i nøkkeltall, aktive perioder eller tid sultende/blokkert.

Tabell 11: Nøkkeltall fra scenario 2.

Scenario 2: Flere hekker		
Δ Gj.strømning	Δ beholdning	Δ Pølser/time
0 dpak	-35 kg	0



Figur 16: Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 2.



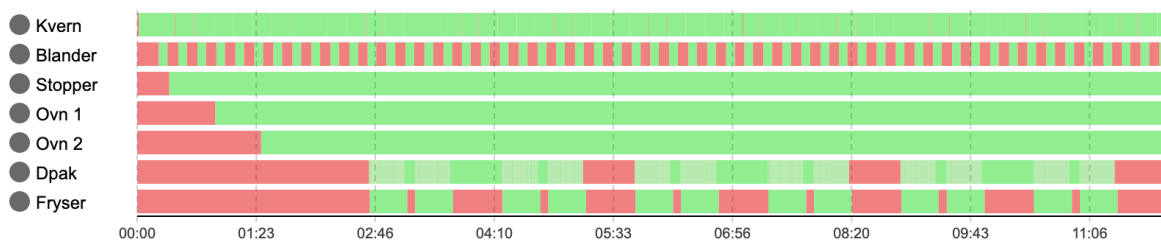
Figur 17: Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 2.

5.2.3 Scenario 3: Økt effektivitet i frysetunnel

Kapasiteten til frysetunnel ble lagt frem som en potensiell flaskehals. For dette simuleringsscenariet ble effektiviteten til frysetunnelen økt med 20% i simuleringssmodellen. Dette ble gjort ved at tiden brukt i vent-blokken ble redusert. Output viser ingen endringer i nøkkeltall.

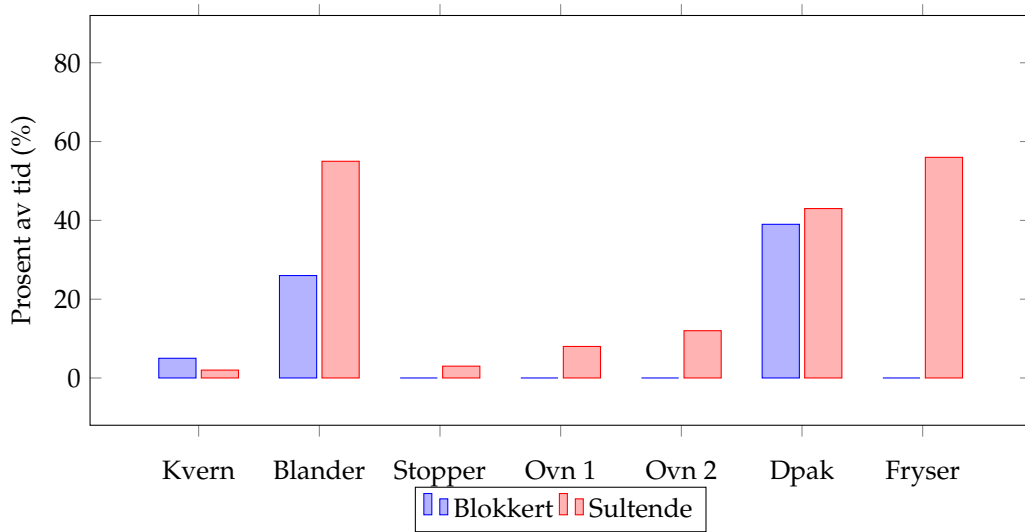
Tabell 12: Nøkkeltall fra scenario 3.

Scenario 3: Effektivitet i frysetunnel		
Δ Gj.strømning	Δ beholdning	Δ Pølser/time
0 dpak	+51 kg	0



Figur 18: Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 3.

I figur 18 ser man at aktive perioder for d-pak og fryser har forandret seg. D-pak kjører litt mer jevnt når den først er aktiv, mens fryseren sine aktive perioder har blitt splittet opp. I figur 19 har sultetiden til d-pak sunket med 10% og til fryser økt med 10%, men tid blokkert for d-pak har økt 10%.



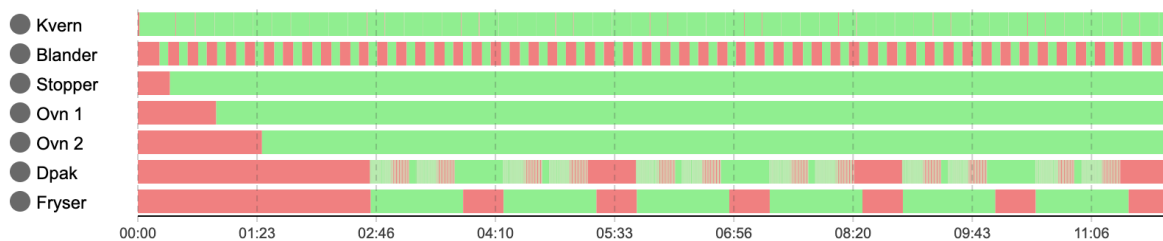
Figur 19: Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 3.

5.2.4 Scenario 4: Økt effektivitet i pakkemaskin

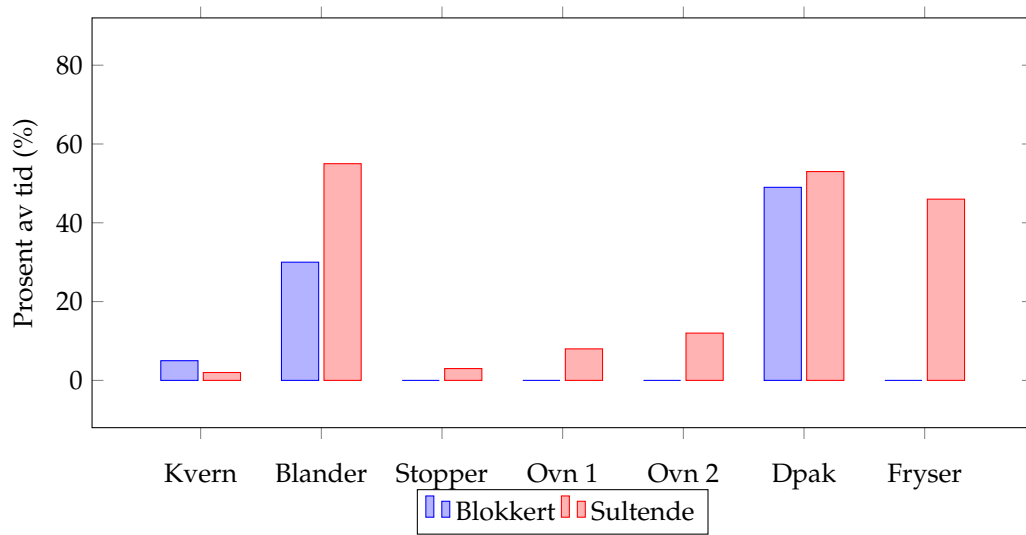
Effektiviteten til pakkemaskinen ble også presentert som en potensiell flaskehals. På samme måte som i scenario 3 ble effektiviteten til pakkemaskinen økt ved at ventetiden ble redusert slik at det tilsvarte en effektivitetsøkning på 20%. I output fra scenario 4 var det heller ingen nevneverdige forandringer fra grunntilfellet. Output kan sees i tabell 13 og figur 20 og 21.

Tabell 13: Nøkkeltall fra scenario 4.

Scenario 4: Effektivitet i pakkemaskin		
Δ Gj.strømning	Δ beholdning	Δ Pølser/time
0 dpak	-73 kg	0



Figur 20: Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 4.



Figur 21: Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 4.

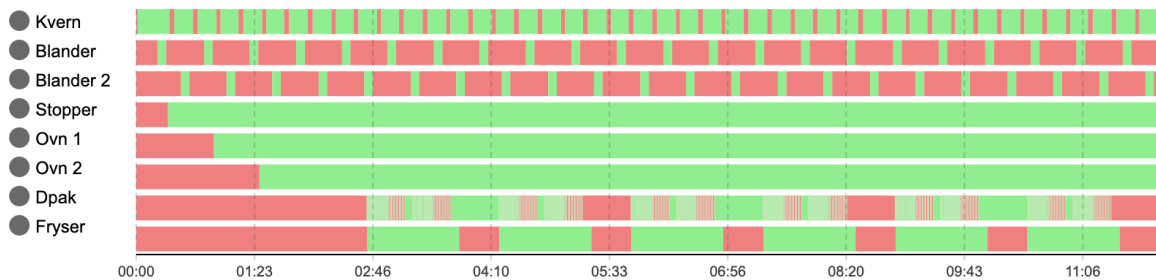
5.2.5 Scenario 5: Ekstra blander

Ut fra vendepunktmetoden viser figur 13 at det ligger et vendepunkt i blanderen. Dette tyder på at en falskehals kan ligge i blanderen eller i en tilknyttet prosess. Dermed ble scenario 5 og 6 skapt for å teste ulike endringer rundt blanderen. I fabrikken har de flere blandemaskiner som brukes til forskjellige formål. I scenario 5 er det tenkt at en av de andre blanderne også kan bli brukt til produksjon av grillpølser. Det er antatt at blandetiden og kapasiteten i den andre blanderen er den samme som i den opprinnelige.

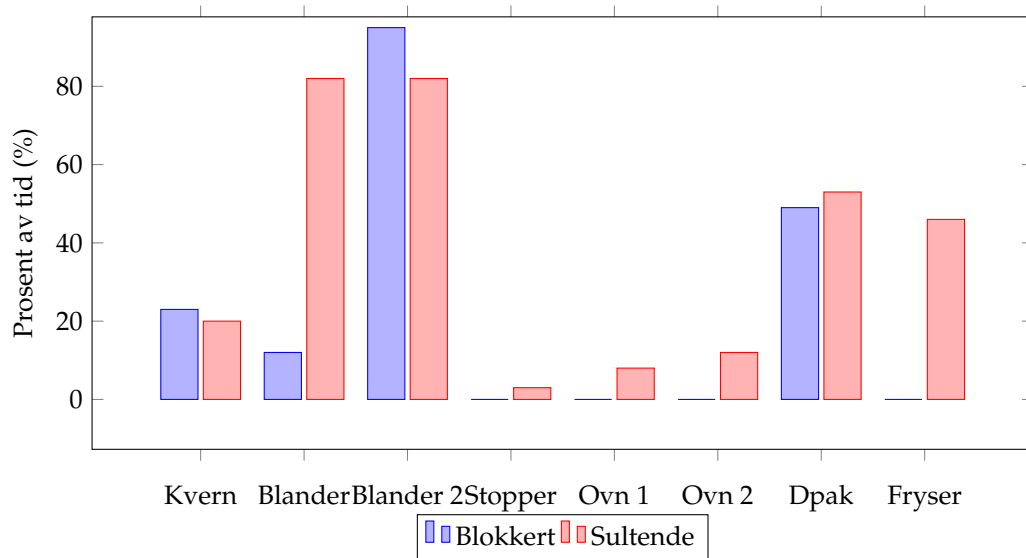
Tabell 14: Nøkkeltall fra scenario 5.

Scenario 5: Ekstra blander		
Δ Gj.strømning	Δ beholdning	Δ Pølser/time
0 dpak	-2203 kg	-1

Endringen simulert her har har ført til en drastisk nedgang i gjennomsnittlig beholdning, men ingen nevneverdig endring i de andre nøkkeltallene, se tabell 14. I aktive perioder, som vist i figur 22, er de aktive periodene til blanderen i grunntilfelle blitt fordelt mellom de to blanderne i dette scenariet. Dette påvirker resten av produksjonslinja i liten grad. Som vist i figur 23 har endringen derimot ført til store endringer i tid sultende og blokkert for første halvdel av produksjonslinja. Kvern er blokkert mer enn før og den ekstra blanderen tilbringer mesteparten av tiden sin blokkert. Den originale blanderen tilbringer derimot mindre tid blokkert. Begge blanderne er sultende mesteparten av tiden.



Figur 22: Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 5.



Figur 23: Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 5.

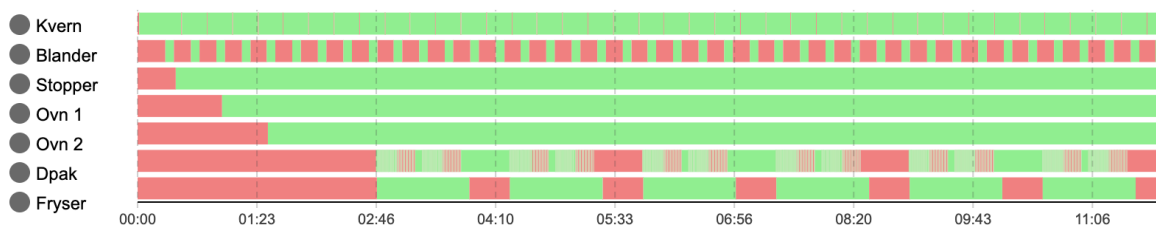
5.2.6 Scenario 6: Større blander

For å teste enda en endring rundt blanderen ble det i scenario 6 testet hva som skjer hvis blanderen har kapasitet til å ta inn enda mer kvernet kjøtt i hver blanderunde. Blandetiden ble antatt å være den samme som i grunntilfelle og mengden kjøtt i hver runde ble økt med 33%.

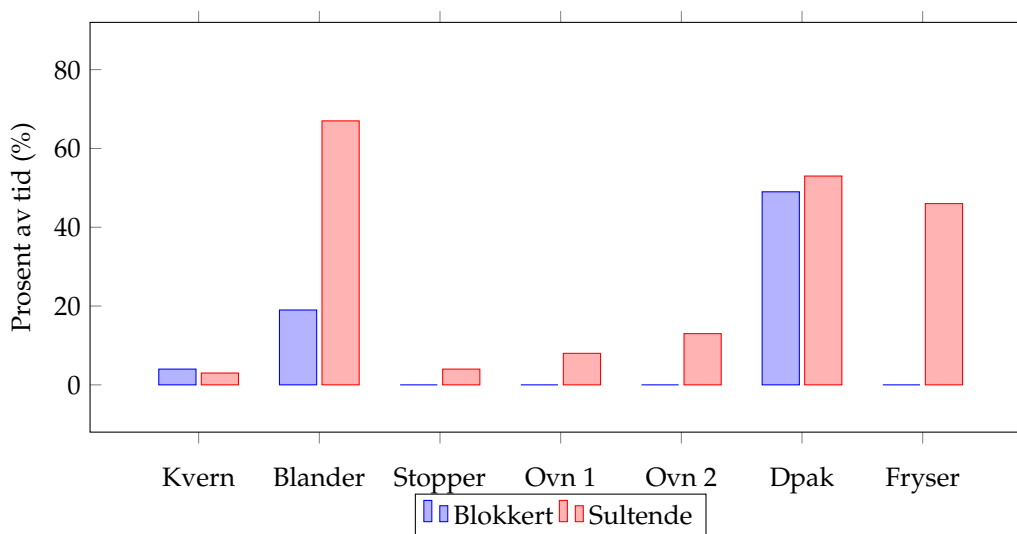
Tabell 15: Nøkkeltall fra scenario 6.

Scenario 6: Større blander		
Δ Gj.strømning	Δ beholdning	Δ Pølser/time
0 dpak	+20 kg	+255

Resultane i tabell 15 viser at pølser produsert per time har økt noe, mens gjennomstrømningen er uendret. Dette tyder på at flyttiden frem til pakking er noe kortere. I figur 24 vises aktive og inaktive perioder, og disse er uendret fra grunntilfellet. Figur 25 viser tid blokkert og sultende. Her er kverna blokkert 3% mindre enn i grunntilfellet, mens blanderen er blokkert 10% mindre og sultet 11% mer.



Figur 24: Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 6.



Figur 25: Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 6.

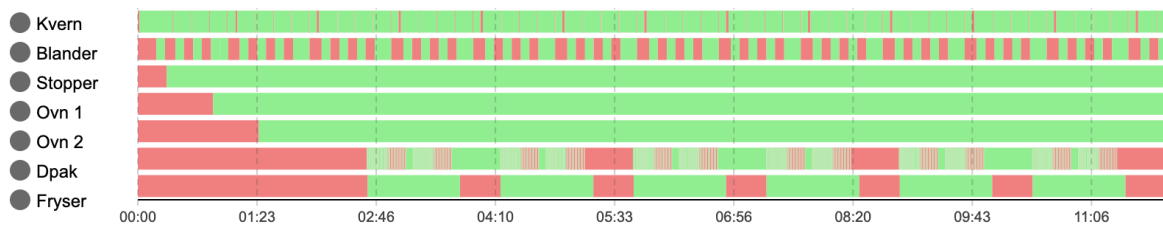
5.2.7 Scenario 7: Økt output fra kvern

I figur 12 vises aktive perioder for hver maskin i grunntilfellet. Der kan man se at kverna er aktiv så og si hele simuleringstiden. Dermed ble det bestemt at scenario 7 skulle teste økt output fra kverna, og kilo/time ut fra kverna ble økt med 20%.

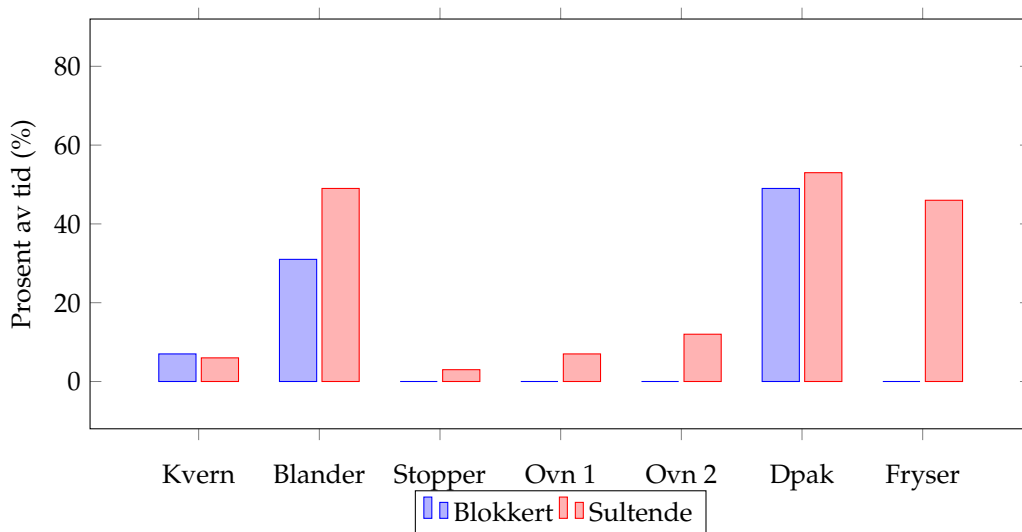
Output fra dette simuleringsscenarioet viser i tabell 16 at gjennomsnittlig beholdning har økt betraktelig, mens pølser produsert per time har økt litt og gjennomstrømning er uendret. I figur 26 er den tydeligste endringen at blander sine aktive perioder er mer sporadiske. I tillegg har kverna litt lengre inaktive perioder sammenlignet med grunntilfellet. Figur 27 viser tid sultende og blokkert. Her er blander blokkert litt mer av tiden, og sultende litt mindre.

Tabell 16: Nøkkeltall fra scenario 7.

Scenario 7: Output fra kvern		
Δ Gj.strømning	Δ beholdning	Δ Pølser/time
0 dpak	+1319 kg	+43



Figur 26: Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 7.



Figur 27: Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 7.

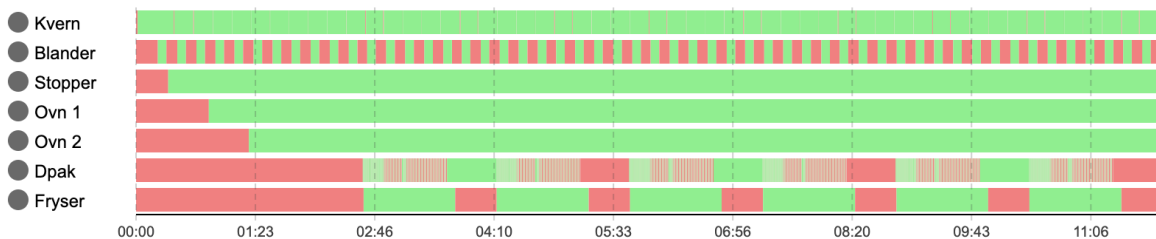
5.2.8 Scenario 8: Økt effektivitet i stoppere

I figur 12 vises aktive perioder for hver maskin i grunntilfellet. Der kan man se at stopperne har den lengste aktive perioden. Ut fra aktiv periode-metoden vil flaskehalsen i systemet ligge i nærheten av disse. Dermed ble det bestemt at scenario 8 skulle teste økt effektivitet i stoppere og effektiviteten ble økt med 14% samlet over de tre stopperne.

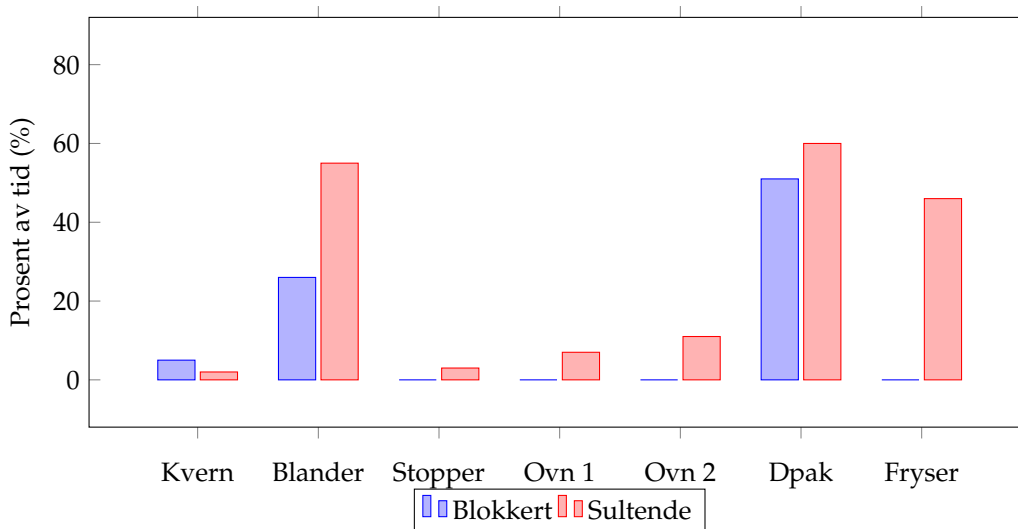
Output fra dette scenariet vises i tabell 17 og figurene 28 og 29. Det er små endringer i alle nøkkeltall og marginale endringer i aktive perioder og tid sultende og blokkert.

Tabell 17: Nøkkeltall fra scenario 8.

Scenario 8: Effektivitet i stoppere		
Δ Gj.strømning	Δ beholdning	Δ Pølser/time
+4 dpak	-20 kg	+80



Figur 28: Aktive og inaktive perioder for hver maskin i simuleringsscenario 8.



Figur 29: Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i simuleringsscenario 8.

5.2.9 Scenario 9: Optimaliseringssimulering

Anylogic har innebygd funksjonalitet som optimaliserer output fra systemet ut fra en rekke variabler. Man oppgir variablene som skal testes og hvilke verdier de kan ha, samt en funksjon som skal optimaliseres. Deretter testes alle de forskjellige kombinasjonene av variabler for å finne ut hvilken kombinasjon som gir "best" mulig output. Man oppgir også om optimaliseringsfunksjonen skal minimeres eller maksimeres. Dette kalles optimaliseringssimulering, og ble gjennomført som scenario 9.

Variablene som ble matet inn i optimaliseringssimuleringen er basert på simuleringsscenariene 1-8. Endringene er de samme som i scenariene, men scenario 6 med større blander er utelatt for å begrense til én mulig endring i blanderen. En oversikt over variabler og mulige verdier kan sees i tabell 18.

Tabell 18: Variabler og mulige verdier brukt i optimaliseringssimuleringen.

Originale verdier tilsvarer grunntilfellet.

Variabel	Mulige verdier
Antall hekker	Originalt eller økt 50%
Antall ovner	Originalt eller en ekstra
Effektivitet i frysetunnel	Original eller økt 20%
Effektivitet i pakkemaskin	Original eller økt 20%
Antall blandere	Originalt eller 1 ekstra
Output fra kvern	Original eller økt 20%
Effektivitet i stoppere	Original eller økt 14%

Optimaliseringsfunksjonen ble bestemt å fokusere på to mål, nemlig gjennomstrømning og gjennomsnittlig beholdning i systemet. Å øke gjennomstrømningen vil tilsvare å øke effektiviteten til systemet i simuleringstiden, som igjen betyr at flaskehalsen vil være forbedret. Men samtidig er beholdning i systemet en utgift. Derfor ble gjennomsnittlig beholdning inkludert på en måte slik at det er positivt å ha lav beholdning. For å justere slik at det vil lønne seg mer å øke gjennomstrømningen enn å kutte beholdning ble det lagt til en faktor på 0,5. Da sitter man igjen med optimaliseringsfunksjonen $f(x)$ som vist i ligning 4. Denne ble maksimert.

$$f(x) = \text{Gjennomstrømning} - 0.5 * \text{Gjennomsnittlig beholdning} \quad (4)$$

Optimaliseringssimuleringen sa at den beste mulige kombinasjonen av variabler er når man har en ekstra ovn, ekstra blander og økt effektivitet i stoppere og fryser. Resten av variablene hadde samme verdier som originalt, altså som i grunntilfellet. Nøkkeltall fra denne simuleringen sees i tabell 19. Under analyse av output ble det oppdaget en svakhet i simuleringsmodellen som gjør at gjennomsnittlig beholdning minker mer enn naturlig ved bruk av en ekstra blander, noe som

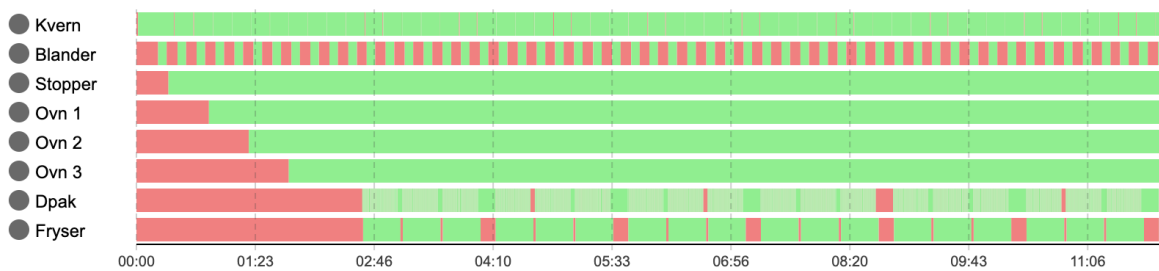
favoriseres av optimaliseringsfunksjonen. Om man ser bort fra løsninger som bruker en ekstra blander er det fremdeles denne kombinasjonen som gir best output, altså når man bruker en ekstra ovn og økt effektivitet i stoppere og fryser. Output fra simulering av scenario med ekstra ovn og økt effektivitet i stoppere og fryser kan sees i tabell 20 og figurene 30 og 31. Også her er det enda større forbedring fra grunntilfellet enn i scenario 1. Alle aktiviteter er aktive store deler av simuleringstiden, og det er nå et tydelig vendepunkt for blokkert/slutende-trenden i d-pak.

Tabell 19: Nøkkeltall fra scenario 9 med ekstra blander.

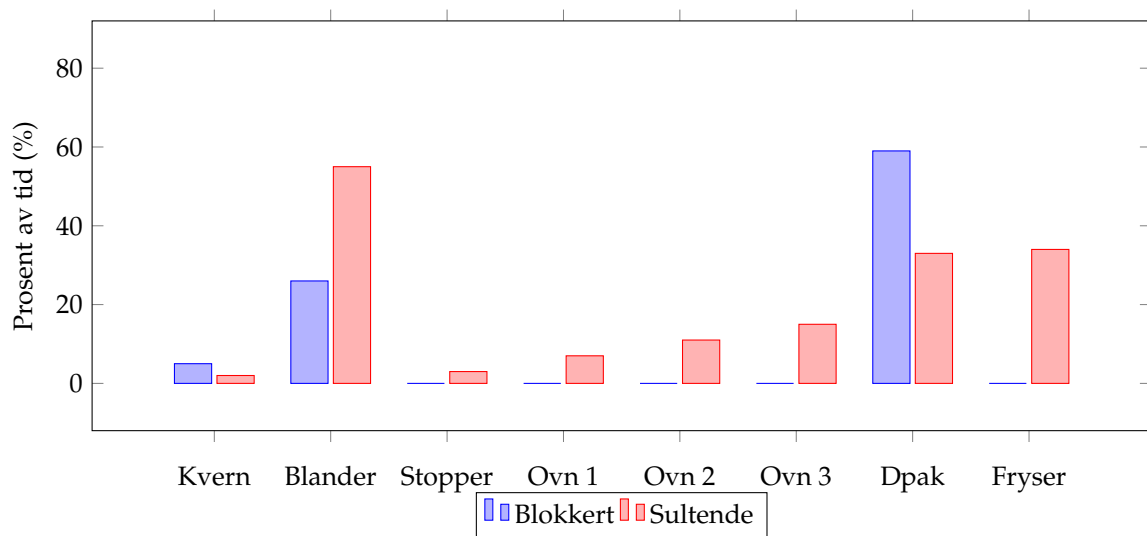
Scenario 9: Optimaliseringssimulering		
Δ Gj.strømning	Δ beholdning	Δ Pølser/time
+568 dpak	-4698 kg	+3080

Tabell 20: Nøkkeltall fra scenario 9 uten ekstra blander.

Scenario 9: Optimaliseringssimulering		
Δ Gj.strømning	Δ beholdning	Δ Pølser/time
+568 dpak	-2546 kg	+3165



Figur 30: Aktive og inaktive perioder for hver maskin i optimaliseringssimuleringen.



Figur 31: Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin som prosentdel av total simuleringstid i optimaliseringssimuleringen.

5.2.10 Oppsummering

Det er simulert 9 forskjellige scenarier:

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1. Ekstra ovn | 6. Større blander |
| 2. Flere hekker | 7. Økt output fra kvern |
| 3. Økt effektivitet i frysetunnel | 8. Økt effektivitet i stoppere |
| 4. Økt effektivitet i pakkemaskin | 9. Optimaliseringssimulering |
| 5. En ekstra blander | |

Tabell 21 viser en oppsummering av nøkkeltallene fra simuleringsscenariene. Størst endring ser man i scenario 1 og 9. Scenario 9 ga aller best resultater og fant at beste kombinasjon av endringer er med ekstra ovn, blander og økt effektivitet i stoppere og fryser. Scenario 5 viste en drastisk nedgang i gjennomsnittlig beholdning.

Tabell 21: En sammenfatning av nøkkeltall fra alle simuleringsscenarier.

Scenario	Δ Gj.strømning	Δ beholdning	Δ Pølser/time
1	+503 dpak	-1986 kg	+2780
2	0 dpak	-35 kg	0
3	0 dpak	+51 kg	0
4	0 dpak	-73 kg	0
5	0 dpak	-2203 kg	-1
6	0 dpak	+20 kg	+255
7	0 dpak	+1319 kg	+43
8	+4 dpak	-20 kg	+80
9	+568 dpak	-4698 kg	+3080

Endringer i aktive og inaktive perioder kan oppsummeres som følger. Scenario 1 viste mindre inaktivitet i siste del av produksjonslinja. I scenario 3 er d-pak mer aktiv, og fryserens aktive perioder er oppsplittet. Scenario 5 fordelte aktive perioder mellom blanderne. Og scenario 7 endret på smått på aktive perioder for kvern og blander. Scenario 8 viste små endringer i de fleste resultater. Scenariene 2, 4 og 6 viste ingen endring.

Tid tilbrakt sultende og blokkert for hver maskin ble også sammenlignet med grunntilfellet. I scenario 1 var d-pak mer blokkert, ovner sultet mer og fryser sultet mindre. Scenario 2, 4 og 8 viste få endringer. Scenario 3 førte til endringer for d-pak og fryser. I scenario 5 var kvern mer blokkert, og de to blanderne tilbrakte mye tid sultende og blokkerte. Scenario 6 førte til mer tid sultende og mindre tid blokkert for blanderen. Scenario 7 viste økt tid blokkert og mindre tid sultende for blander.

6 Besvarelse av forskningsspørsmål

Oppgaven har kartlagt case-studiet, ordnet en digital simuleringsmodell og simulert flere scenarier med simuleringsmodellen. I dette kapitlet vil output fra disse hendelsene tolkes for å besvare forskningsspørsmålene. Output fra simuleringsscenarioene bidrar med kvalitativ informasjon, og kvantitativ informasjon fra case-studiet trekkes inn der hvor det er relevant.

6.1 Hvor ligger flaskehalsen i pølseproduksjon hos Orkla Råbekken?

Forskningsspørsmål 1 vil finne flaskehalsen i pølseproduksjon hos case-bedriften. For å finne svaret på dette er det gjort analyser av output fra simuleringen av dagens situasjon. Først er det gjort en analyse med utgangspunkt i vendepunktsmetoden og deretter aktiv periode-metoden. I hver av analysene trekkes output fra relevante simuleringsscenarioer inn. Til slutt trekkes en konklusjon ut fra disse analysene.

Analyse med utgangspunkt i vendepunktsmetoden

I figur 13 vises hvor mye av simuleringstiden hver maskin tilbrakte som blokkert og sultende i grunntilfellet. Der ser man at kverna tilbrakte mer tid som blokkert enn sultende. I neste maskin, blanderen, er tilfellet det motsatte. Den tilbrakte mer tid som sultende enn som blokkert, og dette stemmer også for alle de resterende maskinene. Dermed er blanderen identifisert som vendepunktet i blokkert/sulte-trenden. Vendepunktsmetoden sier så at flaskehalsen i systemet sannsynligvis vil ligge i nærheten av vendepunktet, altså blanderen.

Simuleringsscenario 5 og 6 testet endringer rundt blanderen. Scenario 5 testet systemet dersom man tar i bruk en ekstra blander. Dette førte til en betraktelig nedgang i gjennomsnittlig beholdning, men ingen økning i pølser produsert eller gjennomstrømning. Når varer ut av systemet er lik som i grunntilfellet, vil nedgangen i beholdning skyldes at varer inn i systemet er mindre. Siden kverna står blokkert i nesten 20% mer av tiden enn i grunntilfellet, se figur 13 og 23, peker dette på at tilførselen av varer inn i systemet også blir blokkert. Ved nærmere etterforskning av scenariet er det tydelig at dette er årsaken. Under modelleringen av simuleringsmodellen ble det i denne delen av produksjonlinja antatt hvor stor kapasitet mellomlagrene har. Uten mer detaljer vil ikke output være troverdig. Derfor beskyldes nedgangen i beholdning en svakhet i modellen. Siden den eneste påviselige forbedringen i output fra scenario 5 trolig skyldes en svakhet i simuleringsmodellen, konkluderes det med at endringen ikke sto for noen betydelig forbedring av systemet. Scenario 6 testet systemet med en blander med større volum. Dette økte antall pølser produsert per time med 4%, men endret ikke de andre nøkkeltallene i nevneverdig grad. At antallet pølser per time har økt vil si at effektiviteten frem til pakkemaskinene har økt. Total gjennomstrømning økte derimot ikke, og denne endringen sto heller ikke for en særlig

forbedring av systemet.

Begrensningsteorien hevder at tid spart i noe som ikke er flaskehalsen ikke har noe betydning. Endringer som vil kunne øke effektiviteten i kverna (scenario 5 og 6) fører ikke til noen forbedring i systemet. Dermed er disse endringene eksempler på "tid spart" i noe som ikke er flaskehalsen. Altså tyder det på at kverna *ikke* er flaskehalsen i systemet.

I figur 13 er pakkemaskin for d-pak nesten et vendepunkt i blokkert/sultende-trenden. I scenario 4 ble effektiviteten i denne maskinen økt med 20%, men dette førte ikke til noen endringer i output fra grunntilfellet. Dermed førte det heller ikke til noen synlig forbedring av systemet som helhet. Med samme argumentasjon som tidligere tyder dette på at pakkemaskinen heller ikke er flaskehalsen i systemet.

For å oppsummere ble blanderen identifisert som vendepunktet i blokkert/sultende-trenden, men siden endringer som vil kunne forbedre blanderen ikke førte til noen forbedring av systemet tolkes det som at blanderen ikke kan bekreftes som flaskehalsen i systemet. Siden pakkemaskinen nesten er et vendepunkt ble denne også vurdert som flaskehals, men tolkes heller ikke som flaskehalsen med samme argumentasjon som for blanderen. Andre endringer rundt kvern og d-pak kan fremdeles føre til forbedring av systemet, men oppsummert kan ikke vendepunktsmetoden alene identifisere flaskehalsen ut fra kjent informasjon.

Analyse med utgangspunkt i aktiv periode-metoden

Aktiv periode-metoden hevder at den komponenten i et system som har den lengste uavbrutte aktive perioden, er flaskehalsen. Figur 12 viser aktive og inaktive perioder for hver maskin i grunntilfellet. Det er to aktiviteter som er uavbrutt aktive fra det tidspunktet de setter i gang. Siden starttilstanden til systemet er uten varer, vil en aktivitet naturligvis være inaktiv frem til den første varen ankommer aktiviteten. Derfor vil ikke den aktiviteten med lengst aktive periode identifiseres som flaskehalsen umiddelbart, men alle aktivitetene som er uavbrutt aktive fra første vare vil vurderes. Disse aktivitetene er stopperne og ovnene.

Stopperne forsynes fra en mellomlagringstank med ferdig blandet pølsefyll. Stoppede pølser henges deretter på hekker som oppbevares til en ovn er tilgjengelig. Det er også lagringsplass for hekker både før og etter ovn-aktiviteten. Med andre ord har begge aktivitetene til felles at de har mellomlagringer både før og etter seg som gjør at de kan jobbe uavbrutt. Slik forklares de lange aktive aktive periodene til aktivitetene. Drum-buffer-rope-metoden går ut på å strategisk plassere lager i produksjonslinja slik at begrensningene i systemet kan jobbe mest mulig aktivt, og på den måten være minst mulig begrensende. Som påpekt i forrige avsnitt tyder output fra simuleringen av grunntilfellet på at slike lager fins i produksjonslinja. Det er derimot uvisst om dette er strategisk plasserte lager som resultat av drum-buffer-rope-planlegging eller om de bare er tilfeldige lager av andre årsaker. Uansett gir de aktivitetene muligheten til å være aktive i lange perioder.

En av aktivitetene med lang aktiv periode er pølsestoppingen. Scenario 8 simulerte systemet dersom stopperne var mer effektive. Dette førte til noen små endringer i output. Med andre ord hadde det innvirkning på flyten i systemet, men førte ikke til noen påviselig forbedring. Dermed kan heller ikke stopperne bekreftes å være flaskehalsen i systemet.

Den andre aktiviteten med lang aktiv periode er koking i ovner. I scenario 1 testes systemet med en ekstra ovn. Dette er det scenariet med størst endringer av alle, se tabell 21. Endringen fører til 45% økning i gjennomstrømning, 16% nedgang i gjennomsnittlig beholdning og 46% økning i pølser produsert per time sammenlignet med grunntilfellet. En slik forbedring av systemet tyder på at ovnene kan være flaskehalsen i systemet. Figur 14 viser at ovnene ikke lengre har den lengste uavbrutte aktive perioden i scenario 1. Altså er de ikke lengre flaskehalsen i systemet i følge aktiv periode-metoden. En annen interessant output fra dette scenariet er i tid tilbrakt blokkert og sultende. I grunntilfellet, figur 13, er det eneste vendepunktet i blokkert/sulte-trenden i kverna. Mens i scenario 1, figur 15, har det dukket opp enda et vendepunkt, nemlig i d-pak. I følge vendepunktsmetoden har det dukket opp en ny flaskehals i systemet. At både aktiv periode- og vendepunktsmetoden signaliserer at flaskehalsen i systemet har forflyttet seg som følge av en endring i ovnene forsterker teorien om at ovnene er flaskehalsen i dagens system.

Konklusjon

Vendepunktsmetoden og aktiv periode-metoden trekker frem blanderen, d-pak, stoppere og ovner som potensielle flaskehalser. Det er simulert scenarier som tester endringer i alle disse aktivitetene, men det er kun endring i ovnene som fører til forbedring av systemet som helhet. Siden en flaskehals er den komponenten i et system som har begrensende kapasitet, er økning av kapasiteten i flaskehalsen det eneste som kan øke gjennomstrømningen i systemet. Dette skjer kun når man øker kapasitet gjennom ovnene. Videre peker både vendepunks- og aktiv periode-metoden at flaskehalsen flytter seg når kapasitet i ovnene forbedres. På grunn av disse funnene konkluderes det med at output fra simulering tilsier at flaskehalsen i pølseproduksjon hos Orkla Råbekken er effektiviteten i ovnene.

6.2 Hvilke endringer vil være mest nyttige i å forbedre vareflyt i pølseproduksjonen?

Forskningsspørsmål nummer to sier noe om hvilke endringer som er mest nyttige for fabrikken når det kommer til å forbedre vareflyt. Vareflyt kan forbedres på mange måter. Eksempler på forbedringer av vareflyt kan være å øke gjennomstrømning, korte ned ledetid eller kutte kostnader forbundet med lagring. I denne oppgaven er det spesielt fokus på gjennomstrømning og beholdning.

Å forbedre noe som ikke er en flaskehals vil, i følge begrensningsteorien, ikke føre til økt gjennomstrømning i systemet. Dermed er en forbedring av ovnene det mest logiske for å øke gjennomstrømning. Men begrensningsteorien sier også at man bør balansere flyt, og ikke kun kapasitet. Det betyr at å

endre på andre aktiviteter, i tillegg til ovnene, kan føre til en bedre flyt i systemet som helhet, og dermed være det mest nyttige i å forbedre vareflyten.

Scenario 9 var en optimaliseringssimulering som fant den beste sammensetningen av endringer i systemet basert på gjennomstrømning og varebeholdning. Output fra scenariet sier at man får beste løsning med en ekstra ovn, en ekstra blander og økt effektivitet i stoppere og fryser. Dette ga enda større forbedringer i nøkkeltall enn scenario 1 som testet direkte forbedring av ovnene, altså den identifiserte flaskehalsen. Scenario 9 viste blant annet en drastisk nedgang i gjennomsnittlig beholdning, men i likhet med scenario 5 testet den å ta i bruk en ekstra blander. Ved nærmere etterforskning av scenario 5 ble det konkludert med at dette skyldtes en svakhet i simuleringsmodellen som kommer til syne når man tar i bruk en ekstra blander. Det er gjort nærmere etterforskning av scenario 9, og det viser seg at det samme er tilfellet i dette scenariet. Videre viste det seg at den samme konfigurasjonen av endringer uten den ekstra blanderen, er den beste for å forbedre nøkkeltallene. Å utelate den ekstra blanderen har ingen innvirkning på gjennomstrømning, gjennomsnittlig beholdning har derimot en mer reell forandring, og pølser produsert per time er noe bedre. Alt i alt regnes løsningen med å skaffe en ekstra ovn og øke effektivitet i stoppere og fryser som den beste for å forbedre gjennomstrømning. Da er det spådd at gjennomstrømning og pølser produsert per time kan øke med 50%, og gjennomsnittlig beholdning minke med 20%.

Som nevnt tidligere er det mest logisk å forbedre ovnene direkte. Det fins mange måter å gjøre denne aktiviteten mer effektiv på. Scenario 1 tok for seg tilfellet hvor fabrikken tar i bruk en ekstra ovn. I vurderingen om dette er nyttig eller ikke må man se på dagens situasjon på fabrikken. Det fins allerede en ekstra ovn, men denne benyttes ikke til pølser per dags dato. Om det vil lønne seg å benytte denne ovnen til pølser kommer an på produksjonsplanlegging av både pølser og de andre produktene. Kanskje øker det gjennomstrømningen av pølser, men senker den tilsvarende for et annet produkt. Da er det ikke sikkert den økte gjennomstrømningen av pølser er lønnsom. En annen måte er om fabrikken kan skaffe enda en ovn. Ut fra plantegninger og opplevelsen på fabrikken er det sannsynligvis ikke fysisk plass til dette. Og dersom man må utvide eller gjøre om store deler av layout kan utgiften raskt overstige eventuelle besparelser. En tredje måte vil være å forbedre de to ovnene man allerede bruker. Kanskje kan de gjøres større slik at man får plass til mer pølser, eller kanskje kan man se på om det er en mulighet å korte ned steketid. En siste mulighet til å forbedre ovnene får man fra drum-buffer-rope-metoden. Det kunne vært en mulighet å plassere lager før og etter ovnene slik at de blir utnyttet maksimalt, men som diskutert under analysen med utgangspunkt i aktiv periode-metoden i kapittel 6.1 fins det i praksis allerede slike lager, så det ville neppe vært en forbedring.

Konklusjon

Forbedring av flaskehalsen er det som vil ha størst effekt på gjennomstrømning og beholdning i linja. I case-bedriftens tilfelle er det å øke effektiviteten gjennom ovnene på en eller annen måte. Flere forslag er blitt nevnt. Når flyt gjennom ovnene er forbedret vil de også kunne dra nytte av å øke effektiviteten i stoppelinjer og frysetunnel.

6.3 Hvilken nytte får fabrikken av å ha en digital simuleringsmodell av produksjonslinja?

Tredje og siste forskningsspørsmål trekker frem erfaringer fra gjennomførelsen av og relevante funn fra dette simuleringsprosjektet for å si noe om hvordan case-bedriften kan dra nytte av en simuleringsmodell som verktøy.

Å forbedre flaskehalsen i ei produksjonslinje er en kontinuerlig prosess som går i å identifisere flaskehalsen og finne forbedringer på dem. I denne oppgaven ble det identifisert en flaskehals og en rekke endringer i systemet har blitt simulert.

Med utgangspunkt i output fra simuleringene kan case-bedriften bruke simuleringsmodellen til å få svar på en rekke problemstillinger videre. Først og fremst kan det simuleres mange flere forbedringer i ovnene. Forskjellige planleggingsstrategier kan prøves ut som åpner opp for å benytte den tredje ovnen, slik at man finner ut om det vil lønne seg å ta denne i bruk av og til. Videre kan det også simuleres med andre formål enn i denne oppgaven. Her har det blitt sett utelukkende på gjennomstrømning og beholdning. Det fins langt flere måter å forbedre en produksjonslinje på. Nye vedlikeholdsrutiner kan utformes, eller årsaker til feilprodukter eller stopp i produksjonen kan identifiseres.

Simuleringsmodellen åpner for eksperimentering med systemet. Hypoteser og nye ideer kan testes uten at det påvirker det reelle systemet, og når man først har en simuleringsmodell vil det gå raskt å implementere. Simuleringsmodellen vil predikere hvordan systemer reagerer på forskjellige parametre og forandringer. Dette gir verdifull innsikt i dynamikken i systemet og hvordan viktige komponenter påvirker hverandre.

Å modellere det reelle systemet krever nøye kartlegging og informasjoninnhenting. Dette i seg selv vil føre til en god forståelse over systemet som helhet. Typisk hentes detaljinformasjon fra personer som har fullstendig kontroll på sitt område, men som ikke kan mye om andre deler av produksjonslinja. Å ha en person med overordnet kunnskap kan være nyttig. I tillegg vil denne informasjonen være samlet på et sted, i en interagerbar simuleringsmodell, noe som gjør at informasjonen lettere kan deles videre.

Simuleringsmodellen vil aldri representere det reelle systemet 100%, og vil alltid være en etterligning. Output fra simuleringen vil kun være så gode som simuleringsmodellen. På den ene siden betyr det at output kan ha dårlig validitet. På den andre siden betyr det at dersom modellen er god nok, så vil tallene aldri lyve. I tillegg kan man alltid hente ut tall fra alle komponenter i hele simuleringsmodellen

umiddelbart, da nye statistikkmålinger raskt kan hentes ut.

Innenfor produksjon skjer det store fremskritt relatert teknologi og muligheter. En digital simuleringsmodell vil være med på å øke den teknologiske kompetansen og det teknologise nivået til case-bedriften. Det spås at teknologier som Big Data Analytics (BDA), maskinlæring og cyber-fysiske systemer vil være sentrale i arbeidet mot smartere produksjon (Qi mfl., 2018; Wang mfl., 2022). Ved å ha en digital simuleringsmodell av produksjonslinja er case-bedriften et steg nærmere det cyber-fysikalske systemet, og har en plattform klar for å teste ut og ta i bruk nye teknologier og metoder.

Konklusjon

Å forbedre ei produksjonslinje er et kontinuerlig arbeid. En simuleringsmodell som verktøy for dette, vil gi muligheten til å eksperimentere med systemet raskt, billig og enkelt. Det er en måte å spå hvordan systemet vil oppføre seg ved forskjellige endringer. Slik gir den innsikt i systemet som ellers kan være vanskelig å få. Det er enklere å hente statistikk fra simuleringsmodellen enn fra det fysiske systemet, som åpner for ny innsikt. En heldig bieffekt av å jobbe med en simuleringsmodell er at det gir en total oversikt over produksjonslinja. Alt i alt kan en simuleringsmodell gjøre det lettere å forbedre produksjonslinja, og vil være med på å øke den teknologiske kompetansen og det teknologiske nivået til case-bedriften.

7 Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres resultatene, simuleringsmodellen og metodene i oppgaven, og det legges frem hva som kunne vært gjort bedre og hvordan simuleringsmodellen kan bli utviklet videre.

7.1 Er resultatene troverdige?

Simuleringsscenario 5 viste en stor nedgang i gjennomsnittlig beholdning, men som påpekt i kapittel 6.1 skyldes dette en svakhet i simuleringsmodellen. Svakheten som fremtrer i scenario 5 er et eksempel på en svakhet som har oppstått på grunn av lite informasjon om det reelle systemet. Det er en kjent ulempe med simulering at resultatene kan være upålitelige siden de kun bygger på statistiske fordelinger (Banks mfl., 2010). Dette er naturligvis også en svakhet ved denne oppgaven. Simuleringsmodellen forsøker å etterligne det reelle systemet så godt som mulig, men i enkelte deler av produksjonslinja lider den av et svakt datagrunnlag. Da er det blitt brukt enkle statistiske fordelinger som uniform- og trekantfordeling. Det svake datagrunnlaget kan komme av at tallene som trengs rett og slett ikke fins, eller at behovene for simuleringsmodelleringen har vært for dårlig kommunisert. Det har heller ikke vært utført målinger for å finne de manglende tallene da det ikke har blitt funnet tid eller ressurser til det. Banks mfl. (2010) presenterer manglende tid og ressurser som en av årsakene som kan føre til at simulering ikke vil lønne seg. Hadde det vært mulig ville denne oppgaven samlet inn mer data og foretatt målinger av nye data, slik at de statistiske fordelingene ville samsvart mer med det reelle systemet. Skulle case-bedriften fortsette å bruke simulering som verktøy må de sørge for at de nødvendige ressursene er tilgjengelige. Da vil de kunne oppnå mer presise resultater.

Forskningsspørsmål 1 konkluderer med at ovnene er flaskehalsen hos case-bedriften, men dette kom ikke fram under analysen med utgangspunkt i vendepunktsmetoden i kapittel 6.1. At en metode for identifisering av flaskehals ikke identifiserer flaskehalsen er bemerkelsesverdig. Det trenger allikevel ikke å bety at resultatet ikke er troverdig. Vendepunktsmetoden antar at flaskehalsprosessen vil skape kø for prosessene før seg (blokkere) og ventetid for prosessene etter seg (sulte). En av måtene å håndtere dette på er å strategisk plassere lager slik at det ikke blir kø eller venting, som nevnt i drum-buffer-rope-metoden i kapittel 2. Siden det fins slike lager både før og etter ovnene vil ikke vendepunktsmetoden fange opp blokkere/sulte-trender like godt. Dette er grunnen til at vendepunktsmetoden ikke identifiserte flaskehalsen.

Simuleringsmodellen er bygd på de tallene som case-bedriften allerede har. Det er gjennomgående brukt reelle tall når de sentrale prosessene er implementert. Maskinene som presenteres i resultatene er implementert med reell kapasitet og effektivitet. Dermed vil simuleringsmodellen kunne representere hovedtrekkene i vareflyten godt, men svakhete som fins på grunn av manglende tall fører til at output fra simuleringsmodellen er upresist. For eksempel er størrelsen på tallene i tabell 9, som viser

nøkkeltall fra simulering av grunntilfellet, ikke presise sammelignet med nøkkeltall fra det reelle systemet. Men siden hovedtrekkene i vareflyten fanges opp, vil trendene i endringer i nøkkeltallene samsvare mellom simuleringsmodell og reelt system. For eksempel vil en drastisk økning i gjennomstrømning i simuleringsmodellen samsvare med en økning i det reelle systemet. Det er endringer i slike hovedtrekk som legges til grunn for å svare på forskningsspørsmål 1 og 2. Derfor vurderes svarene på disse forskningsspørsmålene til å være troverdige. Det er underveis i oppgaven nevnt prosentvis økning eller nedgang i nøkkeltall. Disse estimatene vurderes derimot som unøyaktige på grunn av datagrunnlaget modellen er bygd på.

Etter å arbeide med både case-bedriften og simulering over en lengre periode har jeg et grunnlag for å si noe om hvordan case-bedriften kan dra nytte av simulering som verktøy, og hvilke utfordringer som må overkommes. Siden jeg startet uten noen erfaring med simuleringsmodellering måtte jeg gå den naturlige veien med å lære det fra bunn. Arbeidet mitt med Orkla startet sommeren 2021 og har nå pågått i ett år. Jeg kunne ikke svart på om case-bedriften bør ta i bruk simulering eller ikke, men på grunn av erfaringene gjort gjennom prosjektet kan jeg si noe om nytten man kan dra fra simulering og hvilke utfordringer man står ovenfor. Derfor vurderes svaret på forskningsspørsmål 3 også som pålitelig.

7.2 Er simuleringsmodellen troverdig?

Konstruksjonen av simuleringsmodellen besto av å gjenskape et reelt system i et digitalt program. Dette innebar en rekke forenklinger og antakelser. Det ble tidlig bestemt abstraksjonsnivå for å legge føring for hvilket detaljnivå simuleringsmodellen skulle ligge på og hvilke forenklinger som ble akseptert. Borshchev (2013) hevder at det er nødvendig å tidlig bestemme et abstraksjonsnivå for å lykkes med et simuleringsprosjekt. I løpet av gjennomførelsen av prosjektet har abstraksjonsnivået blitt noe høyere enn først bestemt. Dette skyldes hovedsaklig to grunner. Den første grunnen er tilgjengelig informasjon. I utgangspunktet var det ønskelig å inkludere flere detaljer, spesielt rundt rundt stopp i linja og feilproduksjon. For eksempel opplever fabrikken at en type tarm sprekker oftere enn en annen under stopping, noe som var tenkt å inkluderes i simuleringsmodellen. Dessverre viste det seg at det var vanskelig å skaffe den nødvendige informasjonen om dette. Den andre grunnen til at abstraksjonsnivået ble hevet er studentlisensen til Anylogic. I starten ble hver enkelt pølse modellert som en entitet, men på grunn av en antallsbegrensning på entiteter i studentlisensen måtte dette økes. Til slutt representerte en entitet i simuleringsmodellen fem pølser i det reelle systemet. På tross av at abstraksjonsnivået økte har det ikke blitt *for høyt* og det er fremdeles på et nivå som er hensiktsmessig for å evaluere vareflyt og flaskehals. Optimalt ville det vært som først bestemt, men det er fremdeles på et passende nivå for formålet.

Den største mangelen ved simuleringsmodellen er verifisering. Formålet med simuleringsmodellen er å skaffe ny innsikt i produksjonslinja, noe den klarer til en viss grad siden den bygger på reelle tall fra produksjonslinja. Dersom det ble gjennomført en verifisering ville det i tillegg vært mulig å si

noe om i *hvor stor grad* den klarer akkurat dette. Det var ønskelig å sammenligne tall fra simuleringen med de samme tallene fra det reelle systemet. Sammenligning av nøkkeltall, tid tilbrakt sultende, blokkert og aktiv ville allikevel ikke tilført noe. Siden simuleringsmodellen ser bort fra stopp av linja og feilproduksjon ville tallene trolig vært svært forskjellige uansett. Derfor ble det ikke gjennomført, men en annen form for verifisering burde vært inkludert. En sensitivitetsanalyse kunne gitt innblikk i hvorvidt de forskjellige parametrene gir utslag i output fra simuleringsmodellen, og hadde vært et godt tilskudd til oppgaven. Dessverre ble dette vurdert for sent i prosessen.

Å skape en simuleringsmodell krever kunnskap både om simuleringsmodellering og produksjon. På tross av å være student på et teknisk studie var simulering nytt for meg, og det har vært en bratt læringskurve. Simuleringsmodellen bærer sannsynligvis preg over å være min første. Når det er sagt har den stadig vært under forbedring, og sluttproduktet er et resultat av forbedringer gjort i iterasjoner. En annen ting å huske er at en simuleringsmodell alltid vil bære preg av den som modellerer, dens forkunnskaper og underbevisste partiskhet (bias). For å motvirke dette burde det blitt involvert en person med modelleringserfaring som kunne blitt brukt som diskusjonspartner. Med et nytt syn på simuleringsmodellen og de valgte løsningene ville det vært lettere å se hvilke deler som er påvirket av partiskhet og ikke.

7.3 Var metoden god?

Oppgaven gjennomførte et case-studie. For å kartlegge case-bedriften ble det brukt to verktøy, nemlig prosesskartlegging og styringsmodell. Disse ga tilsammen en god forståelse for caset og produksjonslinjen som det skulle lages simuleringsmodell av. Simuleringsmodellen krevde både kvalitativ og kvantitativ informasjon om case-bedriften. Den kvalitative for å få logikken og vareflyten riktig, og det kvantitative for å modellere hver enkelt maskin med kapasitet og effektivitet. En vanlig utfordring ved kartlegging av deskriptive case-studier er å unngå subjektivitet og at resultatet blir farget av forskerens erfaring (Widding, 2005). For å unngå dette skulle kartleggingen av case-bedriften gjøres så objektiv og strukturert som mulig. Å følge to veldefinerte metoder som styringsmodell og prosesskartlegging bidro til denne objektiviteten og strukturen, og nødvendig informasjon ble hentet inn gjennom dem. Alt i alt fungerte metoden for kartlegging av case-bedrift bra til sitt formål.

For å holde oppgaven innenfor en overkommelig arbeidsmengde ble det gjort en rekke avgrensninger. Dette inkluderer at det ble sett bort fra kostnader og arbeidskraft, og det ble kun sett på aktiv produksjon. Altså ble stopp, omstilling, vedlikehold, feilproduksjon og lignende sett bort fra. Det ble også kun sett på ett produkt og dermed én konfigurasjon av produksjonslinja. Dersom simuleringsmodellen skal viderutvikles vil det være naturlig å ta høyde for også de utelatte faktorene. Flaskehals kan like så godt komme på grunn av disse faktorene som de som er inkludert i oppgaven. Med andre ord begrenser disse avgrensningene resultatene i oppgaven. Det kan være at en mye bedre forbedring av produksjonslinja finnes eller at det er en annen flaskehals som er mer begrensende enn ovennevnte, men at dette ikke kommer frem i denne oppgaven på grunn av avgrensningene.

Diskret-hendelse-modellering og Anylogic oppleves som korrekt valg for denne oppgaven. Diskret-hendelse-modellering fokuserer på prosesser og entiteter, og har en sterk tilknytning til flytskjema. Fokuset i diskret-hendelse-modellering samsvarer godt med oppgavens fokus. Siden jeg har erfaring med flytskjema fra tidligere har det vært enkelt å forstå hvordan simuleringsmodellen skal bygges og hvilken informasjon som er nødvendig. Anylogic har hatt all funksjonalitet som trengtes, og dersom det hadde vært behov for enda mer avanserte verktøy så har de vært tilgjengelige. Det eneste som har vært vanskelig med Anylogic er lisensene, som nevnt i kapittel 7.2. Siden Anylogic er bygd på Java har det vært mulig å gå inn i kildekode for å forstå hvordan ting henger sammen og er konstruert. I flere tilfeller har dette vist seg å være nyttig, spesielt i situasjoner hvor problemer er blitt forsøkt løst gjennom prøving og feiling.

Vendepunktsmetoden og aktiv periode-metoden er brukt som metoder for flaskehalsidentifikasjon, og overordnet ble det fulgt en strategi basert på begrensningsteorien om at forbedring av en flaskehals vil forbedre systemet som helhet. Vendepunks- og aktiv periode-metodene har lagt grunnlaget for en interessant analyse. I videre arbeid med modellen kan det vurderes å ta inn enda flere metoder for flaskehalsidentifikasjon fordi alle metoder har sine styrker og svakheter. En svakhet ved aktiv periode-metoden ble faktisk demonstrert i denne oppgaven siden den ikke plukket opp det som ble identifisert som flaskehalsen. Leporis og Králová (2010) sammenligner fire forskjellige metoder for flaskehalsidentifikasjon inkludert de to brukt i denne oppgaven. Der konkluderes det at en metode basert på "Critical indicators" er den som gir best resultater, og kan vurderes og inkluderes i output fra simuleringsmodellen.

I oppgaven har det gjennomgående blitt brukt tre målinger fra simuleringsmodellen som har blitt omtalt som nøkkeltall. I å evaluere systemet som helhet har *total gjennomstrømning* og *gjennomsnittlig beholdning* stått sentralt. I tillegg ble *antall pølser produsert per time* inkludert for å si noe om prestasjon midtveis i produksjonslinja. Siden pølser produsert per time korrelerer så sterkt med gjennomstrømning kunne det blitt vurdert å utelate den. Tilsammen oppleves nøkkeltallene som tilstrekkelige for å evaluere systemet som helhet, men flere mål kunne også vært inkludert. Flyttid, altså tiden en vare tilbringer i systemet, var tenkt å inkluderes, men viste seg å være vanskelig å måle i simuleringsmodellen.

Litteratursøket i oppgaven kan sees på som en svakhet. Selv om fokuset i oppgaven er på å hjelpe case-bedriften og andre i lik situasjon, er litteratursøket viktig. Det har vært mer fokus på kartlegging av case-bedrift og å skape simuleringsmodell enn litteratursøk. I tillegg var litteratursøket lagt opp på en ustrukturert måte. Dette burde vært gjort annerledes, litteratursøket burde vært mer omfattende og strukturert slik at oppgaven inkluderte mer relevant forskning.

7.4 Videre arbeid

Tidligere i kapittel 7 er det lagt frem noen forslag til videre arbeid. I videre arbeid er det sentralt å utnytte at simulering er skalerbart og modulært, som nevnt av Borshchev (2013), og iterere videre på simuleringsmodellen. En oppsummering av forslagene til videre arbeid som allerede er nevnt:

- Styrke datagrunnlaget og de statistiske fordelingene. Det kan gjennomføres målinger der hvor det ikke fins data.
- Vurdere en annen lisens slik at abstraksjonsnivå kan være der det først ble planlagt.
- Verifisere simuleringsmodellen opp mot det reelle systemet, og gjennomføre en sensitivitetsanalyse.
- Implementere flere aspekter ved produksjonslinja, spesielt der hvor denne oppgaven satte avgrensninger.
- Utvide output fra hver simulering. Enten inkludere flere nøkkeltall eller metoder for flaskehalsidentifikasjon.

I et lengre perspektiv ville det vært interessant å se på automatisk datainnhenting. Komponenter i simuleringsmodellen kan kobles sammen med de reelle motpartene. På denne måten unngås mye av den manuelle databehandlingen og data kan analyseres i nåtid. Ingemansson mfl. (2005) bruker automatisk datainnhenting og diskret-hendelse-simulering for å identifisere flaskehalsen i en produksjonslinje, og konkluderer med at automatisk datainnhenting gir gode resultater når det kombineres med diskret-hendelse-simulering, og egner seg for å identifisere flaskehalsen. Den trekker også frem at en simuleringsmodell åpner for å teste endringer i systemet uten at det reelle systemet blir påvirket. Slik kan forskjellige parametre optimeres. Videre kan optimaliserte parametre eller tilstander sendes tilbake til det reelle systemet. Da kalles det en digital tvilling (Bergs mfl., 2021). Digitale tvillinger åpner for muligheten til enda bedre produksjonsplanlegging og -kontroll i det som omtales som Smart Manufacturing, men forskningen på digitale tvillinger er fremdeles i et ungt stadiet (Qi mfl., 2018).

I det lange løp vil det også være lurt å vurdere mer sofistikerte analyseverktøy. BDA og maskinlæring tilbyr nye metoder for å hente informasjon fra store datamengder, som de datamengdene som produseres av en simuleringsmodell. BDA hevdes å være en sentral teknologi for prediksjon og beslutningsstøtte innen produksjon (Wang mfl., 2022). Qi og Tao (2018) kombinerer faktisk BDA med digitale tvillinger og bidrar til enda mer fornuftig og presis styring av produksjon. Ved å inkludere slike måter kan simuleringsmodellen bidra til enda mer sofistikert analyse.

8 Konklusjon

I industriell produksjon ønsker man å produsere varer mest mulig effektivt. I arbeidet med å gjøre en produksjonslinje mer effektiv er flaskehalsidentifikasjon og -forbedring sentralt. Simulering som verktøy for arbeid med flaskehals er tilbyr innsikt og forståelse i selv komplekse systemer, samt muligheten til å teste endringer i et trygt miljø uten store investeringer eller fare for å forstyrre dagens situasjon. Mange produsenter ønsker å teste ut simulering som verktøy, og Orkla Råbekken er en av disse.

Denne oppgaven brukte diskret-hendelse-simulering for å identifisere flaskehalsen i pølseproduksjon hos Orkla Råbekken. Videre så den på mulige forbedringer av produksjonslinja, og hvilken nytte videre arbeid med simulering kan ha for Orkla Råbekken. Den tok utgangspunkt i begrensningsteorien for identifisere flaskehalsen, og tok i tillegg i bruk to datadrevne metoder: vendepunktsmetoden og aktiv periode-metoden.

Flaskehalsen i pølseproduksjon hos case-bedriften viste seg å være ovnene. Og simuleringen viste at dersom det er mulig å benytte en ekstra ovn vil det øke total gjennomstrømning i systemet betraktelig. I tillegg ble det forslått endringer i produksjonslinja som vil øke gjennomstrømning ytterligere. Til slutt ble det konkludert at simulering som verktøy uten tvil kan være nyttig for case-bedriften dersom de investerer nok tid og ressurser i det.

De to største svakhetene ved denne oppgaven er datagrunnlaget for simuleringsmodelleringen og manglende verifisering av tall. Med mer tid og innsats vil begge disse kunne forbedres.

Videre arbeid med denne simuleringsmodellen ville først og fremst gått ut på å styrke svakhetene, og utvide den der det ble satt avgrensninger i denne oppgaven. I et lengre perspektiv burde det blitt sett på automatisk dataflyt mellom modellen og det reelle systemet.

Referanser

- APICS dictionary (14th ed.). (2013).
- Banks, J., Carson, J., Nelson, B. & Nicol, D. (2010). *Discrete-Event System Simulation* (Fifth ed.). Pearson.
- Bergs, T., Gierlings, S., Auerbach, T., Klink, A., Schraknepper, D. & Augspurger, T. (2021). The Concept of Digital Twin and Digital Shadow in Manufacturing [9th CIRP Conference on High Performance Cutting]. *Procedia CIRP*, 101, 81–84. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.010>
- Borshchev, A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6*. AnyLogic North America.
- Brunner, P. & Rechberger, H. (2017). *Handbook of Material Flow Analysis: For Environmental, Resource, and Waste Engineers*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Chapman, S., Gatewood, A. K., Arnold, T. K. & Clive, L. (2016). *Introduction to Materials Management*. Pearson Higher Ed.
- Cox, J. F. & Schleier, J. G. (Red.). (2010). *Theory of Constraints Handbook*. McGraw-Hill.
- Goldratt, E. G. (1984). *The Goal: A process of Ongoing Improvement*. North River Press.
- Goldratt, E. M. & Fox, R. (1986). *The Race*. North River Press.
- Holweg, M., boer harry, h., Schmenner, R., Pagell, M., Kilduff, M. & Voss, C. (2015). Making a meaningful contribution to theory. *International Journal of Operations & Production Management*. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-03-2015-0119>
- Hoppensteadt, F. C. & Peskin, C. S. (2012). *Modeling and simulation in medicine and the life sciences* (Bd. 10). Springer Science & Business Media.
- Huang, B., Wang, W., Ren, S., Zhong, R. Y. & Jiang, J. (2019). A proactive task dispatching method based on future bottleneck prediction for the smart factory. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(3), 278–293. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1571241>
- Ingalls, R. G. (2011). Introduction to simulation. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1374–1388. <https://doi.org/10.1109/WSC.2011.6147858>
- Ingemansson, A., Ylipää, T. & Bolmsjö, G. (2005). Reducing bottle-necks in a manufacturing system with automatic data collection and discrete-event simulation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(6), 615–628. <https://doi.org/10.1108/17410380510609474>
- Kahraman, M. M., Rogers, W. P. & Dessureault, S. (2020). Bottleneck identification and ranking model for mine operations. *Production Planning & Control*, 31(14), 1178–1194. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1701231>
- Karlsson, C. (2009). *Researching Operations Management*. Routledge.
- Karlsson, C., Åhlström, P., Forza, C., Voss, C., Godsell, J., Johnson, M., Coughlan, P., Coughlan, D., Bertrand, J. & Fransoo, J. (2016). *Research Methods for Operations Management*.

- Lai, X., Shui, H., Ding, D. & Ni, J. (2021). Data-driven dynamic bottleneck detection in complex manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 662–675. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.07.016>
- Leporis, M. & Králová, Z. (2010). A simulation approach to production line bottleneck analysis. *International conference cybernetics and informatics*, 13–22.
- Li, L., Chang, Q. & Ni, J. (2009). Data driven bottleneck detection of manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 47(18), 5019–5036. <https://doi.org/10.1080/00207540701881860>
- Meier, R. C., Newell, W. T. & Pazer, H. L. (1969). *Simulation in business and economics*. Academy of Management Briarcliff Manor.
- Mourtzis, D., Doukas, M. & Bernidaki, D. (2014). Simulation in Manufacturing: Review and Challenges. *Procedia CIRP*, 25, 213–229. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.032>
- Pedgen, C. D., Shannon, R. E. & Sadowski, R. P. (1995). *Introduction to simulation using SIMAN*. McGraw-Hill.
- Qi, Q. & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*, 6, 3585–3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Qi, Q., Tao, F., Zuo, Y. & Zhao, D. (2018). Digital Twin Service towards Smart Manufacturing [51st CIRP Conference on Manufacturing Systems]. *Procedia CIRP*, 72, 237–242. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.103>
- Shannon, R. E. (1975). *Systems simulation: The art and science*. Prentice-Hall.
- Starbek, M. & Menart, D. (2000). The optimization of material flow in production. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(9), 1299–1310. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00126-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00126-1)
- Strandhagen, J. O. (2015). *How to Make a Control Model* (tekn. rapp.). NTNU.
- Subramaniam, M., Skoogh, A., Muhammad, A. S., Bokrantz, J., Johansson, B. & Roser, C. (2020). A generic hierarchical clustering approach for detecting bottlenecks in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 55, 143–158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.02.011>
- Tang, H. (2019). A new method of bottleneck analysis for manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 19, 21–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.01.003>
- Wang, J., Xu, C., Zhang, J. & Zhong, R. (2022). Big data analytics for intelligent manufacturing systems: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 738–752. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.005>
- Widding, Ø. (2005). Case som metode. Hovedutfordringer knyttet til ulike forskningsdesign når hensikten er å generalisere. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3078.8722>

