

Optimeringsbasert beslutningsstøtte for distribusjon av fornybar energi i maritime verdikjeder

Kristian Andersen
Aslanbek Sjamsutdinov

Industriell økonomi og teknologiledelse

Oppgaven levert: Juni 2011

Hovedveileder: Henrik Andersson, IØT

Biveileder(e): Professor Marielle Christiansen, IØT
Seniorrådgiver Roar Grønhaug, Enova SF

MASTERKONTRAKT

- uttak av masteroppgave

1. Studentens personalia

Etternavn, fornavn Andersen, Kristian	Fødselsdato 02. okt 1987
E-post krista@stud.ntnu.no	Telefon 98027723

2. Studieopplysninger

Fakultet Fakultet for Samfunnsvitenskap og teknologiledelse	
Institutt Institutt for industriell økonomi og teknologiledelse	
Studieprogram Industriell økonomi og teknologiledelse	Hovedprofil Anvendt økonomi og optimering
E-post krista@stud.ntnu.no	Telefon 98027723

3. Masteroppgave

Oppstartsdato 17. jan 2011	Innleveringsfrist 13. jun 2011
Oppgavens (foreløpige) tittel Optimeringsbasert beslutningsstøtte for distribusjon av fornybar energi i maritime verdikjeder	
Oppgavetekst/Problembeskrivelse Formålet er å utvikle optimeringsbasert beslutningsstøtte for å vurdere lønnsomheten av maritim distribusjon av trepellets langs norskekysten. Optimeringsmodell(er) som utvikles vil ha en strategisk/taktisk planleggingshorisont, der verdikjedestyring med ruteplanlegging av skip står sentralt. Masteroppgaven skrives i samarbeid med Enova SF. Hovedinnhold: 1. En beskrivelse av problemet som skal studeres 2. Utvikling av optimeringsmodell(er) for det beskrevne problemet 3. Implementering av optimeringsmodell(er) ved bruk av egnet programvare 4. Kjøring av modell(er) med relevante data og påfølgende diskusjon rundt tekniske og økonomiske resultater	
Hovedveileder ved institutt Førsteamanuensis Henrik Andersson	Biveileder(e) ved institutt Professor Marielle Christiansen
Ekstern bedrift/institusjon Enova SF	Ekstern veileder ved bedrift/institusjon Seniorrådgiver Roar Grønhaug
Merknader 1 uke ekstra p.g.a påske.	

4. Underskrift

Student: Jeg erklærer herved at jeg har satt meg inn i gjeldende bestemmelser for mastergradsstudiet og at jeg oppfyller kravene for adgang til å påbegynne oppgaven, herunder eventuelle praksiskrav.

Partene er gjort kjent med avtalens vilkår, samt kapitlene i studiehandboken om generelle regler og aktuell studieplan for masterstudiet.

Trondheim 14/1 -18
.....
Sted og dato


.....
Student


.....
Hovedveileder

Originalen oppbevares på fakultetet. Kopi av avtalen sendes til instituttet og studenten.

MASTERKONTRAKT

- uttak av masteroppgave

1. Studentens personalia

Etternavn, fornavn Sjamsutdinov, Aslanbek	Fødselsdato 04. aug 1987
E-post sjamsutd@stud.ntnu.no	Telefon 95034793

2. Studieopplysninger

Fakultet Fakultet for Samfunnsvitenskap og teknologiledelse	
Institutt Institutt for industriell økonomi og teknologiledelse	
Studieprogram Industriell økonomi og teknologiledelse	Hovedprofil Anvendt økonomi og optimering
E-post sjamsutd@stud.ntnu.no	Telefon 95034793

3. Masteroppgave

Oppstartsdato 17. jan 2011	Innleveringsfrist 13. jun 2011
Oppgavens (foreløpige) tittel Optimeringsbasert beslutningsstøtte for distribusjon av fornybar energi i maritime verdikjeder	
Oppgavetekst/Problembeskrivelse Formålet er å utvikle optimeringsbasert beslutningsstøtte for å vurdere lønnsomheten av maritim distribusjon av trepellets langs norskekysten. Optimeringsmodell(er) som utvikles vil ha en strategisk/taktisk planleggingshorisont, der verdikjedestyring med ruteplanlegging av skip står sentralt. Masteroppgaven skrives i samarbeid med Enova SF. Hovedinnhold: 1. En beskrivelse av problemet som skal studeres 2. Utvikling av optimeringsmodell(er) for det beskrevne problemet 3. Implementering av optimeringsmodell(er) ved bruk av egnet programvare 4. Kjøring av modell(er) med relevante data og påfølgende diskusjon rundt tekniske og økonomiske resultater	
Hovedveileder ved institutt Førsteamanuensis Henrik Andersson	Biveileder(e) ved institutt Professor Marielle Christiansen
Ekstern bedrift/institusjon Enova SF	Ekstern veileder ved bedrift/institusjon Seniorrådgiver Roar Grønhaug
Merknader 1 uke ekstra p.g.a påske.	

4. Underskrift

Student: Jeg erklærer herved at jeg har satt meg inn i gjeldende bestemmelser for mastergradsstudiet og at jeg oppfyller kravene for adgang til å påbegynne oppgaven, herunder eventuelle praksiskrav.

Partene er gjort kjent med avtalens vilkår, samt kapitlene i studiehåndboken om generelle regler og aktuell studieplan for masterstudiet.

Trondheim 14/1-4
Sted og dato


Student


Hovedveileder

Originalen oppbevares på fakultetet. Kopi av avtalen sendes til instituttet og studenten.

STANDARDAVTALE

Avtale mellom student Kristian Andersen født 02.10.1987,

student Aslanbek Sjamsutdinov født 04.08.1987,

faglærer ved NTNU Henrik Andersson,

bedrift/institusjon Enova SF og

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (heretter NTNU) v/ fakultetets dekan

om bruk og utnyttelse av spesifikasjoner og resultater fremlagt ved besvarelse av masteroppgave i henhold til Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet ved NTNU, vedtatt av Utdanningsutvalget 23.03.06.

Studenten skal utføre besvarelse av den tildelte masteroppgave ved: Enova SF

Opgavens tittel er: Optimeringsbasert beslutningsstøtte for distribusjon av fornybar energi i maritime verdikjeder

1. Studenten har opphavsrett til besvarelsen. De innleverte eksemplarer av besvarelsen med tegninger, modeller og apparatur, så vel som dataprogramvare som inngår som del av eller vedlegg til besvarelsen, tilhører NTNU. Besvarelsen, og vedlegg til denne, kan vederlagsfritt benyttes av NTNU til undervisnings- og forskningsformål. Besvarelsen, og vedlegg til denne, må ikke nyttes til andre formål.
2. Studenten har rett til å publisere sin besvarelse, eller deler av den, som en selvstendig avhandling eller som del av et større arbeid, eller i popularisert form i hvilken som helst offentlig publikasjon.
3. Bedriften/institusjonen har rett til å få utlevert et eksemplar av besvarelsen med vedlegg, og til å gjøre seg kjent med NTNU's bedømmelse av den. Bedriften/institusjonen gis en frist på 3 måneder fra besvarelsen er innlevert til NTNU for sensurering til å vurdere patenterbarhet og søke patent på hele eller deler av resultatet av besvarelsen. Besvarelsens spesifikasjoner og resultater kan bedriften/institusjonen nytte i sin egen virksomhet. Dersom besvarelsens spesifikasjoner og resultater skal utnyttes økonomisk av bedriften/institusjonen, må det inngås særskilt avtale med alle parter. NTNU's tilleggsavtale om økonomisk utnyttelse skal da benyttes. Avtale om økonomisk utnyttelse

opprettet i 4 - fire eksemplarer hvor partene skal ha hvert sitt og er gyldig når den er godkjent og underskrevet av NTNU v/fakultetets dekan.

4. I særlige tilfelle kan offentliggjørelsen av besvarelsen i samsvar med pkt. 2 og 3 ovenfor båndlegges (utsettes) for en periode på inntil 5 år. Det skal i slike tilfelle inngås en egen båndleggesavtale mellom student, faglærer, bedrift/institusjon og NTNU. NTNU's tilleggsavtale om båndlegging skal da benyttes. Båndleggesavtalen opprettes i 4 - fire eksemplarer hvor partene skal ha hvert sitt og er gyldig når den er godkjent og underskrevet av NTNU v/fakultetets dekan.
5. Denne avtale skal ha gyldighet foran andre avtaler som er eller blir opprettet mellom to av partene som er nevnt ovenfor.
6. Eventuell uenighet som følge av denne avtale skal søkes løst ved forhandlinger. Hvis dette ikke fører frem, er partene enige om å la tvisten avgjøres ved voldgift i henhold til norsk lov. Tvisten avgjøres av sorenskriveren ved Trondheim tingrett eller den han/hun oppnevner.
7. Denne avtale er underskrevet i 4 - fire - eksemplarer hvor partene skal ha hvert sitt. Avtalen er gyldig når den er godkjent og underskrevet av NTNU v/fakultetets dekan.

Trondheim
.....
(sted)

24.01.11
.....
(dato)

Aslanbek Samsethina Henrik Anderson
.....
student faglærer ved NTNU

Kristian
.....
student

Øyvind Leistad
.....
Direktør Energiproduksjon,
Enova SF

Avtalen godkjennes:

Monica
.....
NTNU
Institutt for industriell økonomi
og teknologiledelse
7491 TRONDHEIM

Dekan, NTNU (dato, stempel og signatur)



enova
Enova SF
Prof. Brochs gt. 2
N-7030 Trondheim

TILLEGGSAVTALE / ØKONOMISK UTNYTTELSE

(Med hjemmel i standardavtalens punkt 4)

Tilleggsavtale mellom student Kristian Andersen født 02.10.1987,

student Aslanbek Sjamsutdinov født 04.08.1987,

faglærer ved NTNU Henrik Andersson,

bedrift/institusjon Enova SF og

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (heretter NTNU) v/fakultetets dekan

i tilknytning til inngått standardavtale om bruk og utnyttelse av spesifikasjoner og resultater fremlagt ved besvarelse av masteroppgave i henhold til Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet ved NTNU, vedtatt av Utdanningsutvalget 23.03.06.

1. Med hjemmel i standardavtalens punkt 4 inngått mellom de ovennevnte parter inngås en tilleggsavtale som gir bedriften/institusjonen rett til å kunne utnytte masteroppgavens/ besvarelsens spesifikasjoner og resultater i økonomisk sammenheng.
2. Denne avtale er underskrevet i 4 - fire - eksemplarer hvor partene skal ha hvert sitt. Avtalen er gyldig når den er godkjent og underskrevet av NTNU v/fakultetets dekan.

Trondheim
.....
(sted)

24.01.11
.....
(dato)

Aslanbek Sjamsutdinov
.....
student

Henrik Andersson
.....
faglærer ved NTNU

Kristian Andersen
.....
student

Øyvind Leistad
.....
Direktor Energiproduksjon,
Enova SF

Enova SF
Prof. Brochs gt. 2
N-7030 Trondheim

Avtalen godkjennes: NTNU
.....
Dekan, NTNU (dato, stempel og signatur)

Institutt for industriell økonomi
og teknologiledelse
7491 TRONDHEIM

FORORD

Denne masteroppgaven er skrevet som en del av fordypningen *Anvendt økonomi og optimering* ved *Institutt for industriell økonomi og teknologiledelse* ved NTNU i Trondheim, våren 2011. Rapporten er et resultat av en masteroppgave med tittelen *Optimeringsbasert beslutningsstøtte for distribusjon av fornybar energi i maritime verdikjeder*, og har et omfang på 30 studiepoeng. Oppgaven er en videreføring av et forprosjekt vi utførte høsten 2010.

Masteroppgaven har sitt utspring i at det per dags dato eksisterer få distribusjonsnettverk for trepellets langs kysten av Norge. For å realisere dette ubenyttede potensialet ønsker Enova SF, i sin rolle som tilrettelegger for fornybar energi, å se på lønnsomheten av å etablere et maritimt distribusjonsnettverk for trepellets i Norge.

Vi vil takke Førsteamanuensis Henrik Andersson og Professor Marielle Christiansen ved NTNU, samt Seniorrådgiver Roar Grønhaug ved Enova SF, for deres veiledning underveis i arbeidet.

Trondheim, 3. juni 2011

Kristian Andersen

Aslanbek Sjamsutdinov

SAMMENDRAG

Trevirke som er blitt tørket og komprimert til pellets har et høyt energiinnhold og er gunstig til oppvarmingsformål. I Norge i dag foregår distribusjonen av trepellets ved landbasert transport, og det eksisterer få distribusjonsnettverk langs kysten. Det er utgangspunktet for denne masteroppgaven som anslår lønnsomheten ved etablering av et maritimt distribusjonsnettverk. Det eksisterer per dags dato syv ulike produsenter av trepellets i Norge. Av disse skiller Biowood Norway seg ut med en langt høyere produksjonskapasitet enn de øvrige. Denne produsenten er også tilrettelagt for maritim distribusjon med sin lokasjon på kysten av Møre og Romsdal. Ved utgangen av 2010 var den totale etterspørselen i Norge på 58 500 tonn pellets per år, mens det forventede tallet for 2013 er omlag 200 000 tonn. Det er ventet at 80 % av etterspørselen vil falle innenfor kystnære strøk. Pelletsindustrien i Norge står med det fremfor en periode med sterk vekst.

I denne rapporten utvikles det en optimeringsmodell som genererer et maritimt distribusjonsnettverk som er optimalt med tanke på profitt. Dette nettverket benyttes til å representere den potensielle lønnsomheten ved maritim distribusjon av trepellets langs norskekysten. Optimeringsmodellen er nyskapende i måten den utnytter den geografiske strukturen på. Modellen er deterministisk og av strategisk/taktisk karakter, der målfunksjonen uttrykker verdikjedens totale profitt og maksimeres. Lønnsomheten vurderes ut i fra et verdikjedeperspektiv og omfatter produksjon av pellets, sjøbasert transport fra produsent til havn, lagring i havn, samt landbasert transport fra havn til sluttkunde. I utgangspunktet formuleres modellen kun med de restriksjonene som er nødvendige for å beskrive problemet. For å unngå symmetriske løsninger som gir en lite effektiv bruk av maskinvaren innføres symmetrikutt. Det innføres også tilleggsrestriksjoner som styrker lineærrelakseringen. Hovedhensikten er å redusere målfunksjonens øvre grense, og få en mindre differanse mellom øvre grense og beste løsning funnet. Gjennom en teknisk analyse reduseres den omtalte differansen fra 22,3 % til 7,8 %. En differanse på 7,8 % regnes som akseptabelt tatt i betraktning usikkerheten i inndataene.

Den økonomiske analysen viser at lønnsomheten ved etablering av et maritimt distribusjonsnettverk er 18,3 MNOK per år. Det gir en driftsmargin på drøye 8 %. Den forventede årlige etterspørselen i området er 160 000 tonn, og analysen viser at dersom den faller under 35 000 tonn vil den maritime distribusjonen ikke lenger være lønnsom. En nullpunktsanalyse av differansen mellom salgspris og produksjonskostnad per tonn pellets viser at differansen må minimum overstige 175 NOK. Følgelig vil en reduksjon i salgspris på 8 %, eller en økning i produksjonskostnad på 10 %, føre til at den maritime distribusjonen ikke lenger er lønnsom. Vi ser at lønnsomheten er mer følsom for endringer i dekningsbidraget enn for endringer i etterspørselen. Endelig konklusjon blir at det i fremtiden vil være økonomisk lønnsomt med maritim distribusjon av trepellets langs norskekysten, forutsatt at etterspørselen overstiger 35 000 tonn per år og at dekningsbidraget overstiger 175 NOK per tonn.

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	INTRODUKSJON	1
2	PELETSINDUSTRIEN	2
2.1	PRODUKT	2
2.1.1	Bruksområde og karakteristikk	2
2.1.2	Produksjonsprosess	2
2.1.3	Kvalitet	2
2.2	VERDIKJEDE.....	3
2.2.1	Utvinning av råvarer	3
2.2.2	Produksjon av pellets	4
2.2.3	Lagring i distribusjonssentre	4
2.2.4	Salg ved utsalgssteder	4
2.2.5	Forbruk hos sluttkonsumenten	4
2.2.6	Transport mellom ledd i verdikjeden	5
2.3	MARKEDSOMTALE	6
2.3.1	Produsenter	6
2.3.2	Produksjon	6
2.3.3	Etterspørsel	7
2.3.4	Sesongvariasjoner	8
2.3.5	Salgspris	8
2.3.6	Import og eksport til og fra Norge	9
3	RELEVANT LITTERATUR OG KLASSIFISERING.....	10
3.1	VERDIKJEDESTYRING OG -OPTIMERING	10
3.1.1	Definisjon av verdikjede	10
3.1.2	Verdikjedens aktiviteter og planleggingsnivåer	10
3.1.3	Klassifisering av aktiviteter og planleggingsnivåer.....	11
3.2	KOMBINERT RUTEPLANLEGGING OG LAGERSTYRING.....	13
3.2.1	Grunnproblemet	13
3.2.2	Ulike varianter av grunnproblemet.....	13
3.3	KLASSIFISERING AV FYSISKE DIMENSJONER	14
3.3.1	Struktur	15
3.3.2	Flåtestørrelse	15
3.3.3	Flåtesammensetning	15
3.3.4	Last	15

3.4	KLASSIFISERING AV MODELLTEKNISKE DIMENSJONER	16
3.4.1	Planleggingshorisont	16
3.4.2	Etterspørsel	16
3.4.3	Flyt.....	17
3.4.4	Ruteplanlegging	17
4	MODELLUTVIKLING.....	18
4.1	ANTAKELSER OG AVGRENSNINGER	18
4.1.1	Produkt	18
4.1.2	Produksjon	18
4.1.3	Etterspørsel	18
4.1.4	Geografi	19
4.1.5	Tid.....	20
4.1.6	Seilemønster.....	20
4.1.7	Havnekostnader	22
4.1.8	Skips- og seilekostnader.....	22
4.1.9	Landbaserte transportkostnader	22
4.1.10	Lagring og last	22
4.2	MODELLSTRUKTUR.....	23
4.2.1	Mengder og indekser.....	23
4.2.2	Variabler	24
4.3	DEKLARASJONER	26
4.3.1	Indekser.....	26
4.3.2	Mengder.....	26
4.3.3	Konstanter.....	27
4.3.4	Variabler	28
4.4	GENERELL MATEMATISK FORMULERING.....	29
4.4.1	Målfunksjon	29
4.4.2	Restriksjoner for siste havn.....	31
4.4.3	Restriksjoner for besøksrekkefølge.....	31
4.4.4	Restriksjoner for skipslast.....	31
4.4.5	Restriksjoner for havneleveranse	32
4.4.6	Restriksjoner for øvre kundeleveranse.....	32
4.4.7	Restriksjoner for nedre kundeleveranse	32
4.4.8	Restriksjoner for besøk av havn.....	32
4.4.9	Restriksjoner for lagerbalanse	33

4.4.10	Restriksjoner for tidsbruk	33
4.4.11	Restriksjoner for startlager	33
4.4.12	Restriksjoner for sluttlager.....	33
4.4.13	Restriksjoner for lagerbeholdning	34
4.4.14	Ikke-negativitetskrav	34
4.4.15	Binærkrav.....	34
5	TEKNISK ANALYSE.....	36
5.1	CASEBESKRIVELSE.....	36
5.2	PROGRAMVARE OG MASKINTEKNISK YTELSE	37
5.3	MODELLTEKNISK ANALYSE AV GRUNNMODELL	37
5.4	SYMMETRIKUTT	39
5.4.1	Skipssymmetri	39
5.4.2	Rutesymmetri	40
5.5	LINEÆRRELAKSERING	41
5.5.1	Lineærkutt 1	43
5.5.2	Lineærkutt 2	43
5.5.3	Lineærkutt 3	43
5.6	MODELLTEKNISK ANALYSE AV TILLEGGSRESTRIKSJONER.....	44
5.6.1	Symmetrikutt.....	44
5.6.2	Lineærkutt.....	45
5.6.3	Sammensetning av symmetrikutt og lineærkutt.....	47
5.7	REDUKSJON AV ANTALL VARIABLER OG RESTRIKSJONER	48
5.8	OPPSUMMERING AV TEKNISK ANALYSE	50
6	ØKONOMISK ANALYSE	51
6.1	LØSNING VED HOVEDSCENARIO.....	51
6.1.1	Inntekts- og kostnadsstruktur	51
6.1.2	Produksjon og salg	52
6.1.3	Flåtesammensetning	53
6.1.4	Bruk av havner.....	54
6.1.5	Lagerbeholdning	56
6.2	NULLPUNKTSANALYSE	58
6.2.1	Nullpunktsanalyse av total etterspørsel	58
6.2.2	Nullpunktsanalyse av dekningsbidrag	59
6.3	ØVRIGE SCENARIOER.....	60
6.3.1	Scenario med ingen industrietterspørsel	60

6.3.2	Scenarioer med varierende etterspørsel.....	60
7	VIDERE ARBEID.....	62
8	KONKLUSJON	64
9	BIBLIOGRAFI	66
10	APPENDIKS	69
	A1 – Datainnsamling	69
	A2 – Matematisk formulering på kompakt form	84
	A3 – Kildekode.....	86
	A4 – Presentasjon holdt for Enova SF 27.05.11	102

FIGURLISTE

Figur 1: Illustrasjon av verdikjeden til pellets.....	3
Figur 2: Samlet pelletsproduksjon i Norge	7
Figur 3: Samlet etterspørsel av pellets i Norge	7
Figur 4: Prisutvikling for pellets i Norge.....	9
Figur 5: Aktiviteter og planleggingsnivåer i verdikjeder	11
Figur 6: Klassifisering av nødvendige beslutninger i analysen.....	12
Figur 7: Kart over norskekysten sør for Trondheim	20
Figur 8: Illustrasjon av forenklet seilerute	21
Figur 9: Illustrasjon av seilerute med variabler og indekser	25
Figur 10: Utvikling av beste løsning og øvre grense over tid	38
Figur 11: Lagerbeholdning før innføring av lineærkutt.....	42
Figur 12: Lagerbeholdning etter innføring av lineærkutt	46
Figur 13: Grafisk fremstilling av kostnadsledd i verdikjeden.....	52
Figur 14: Illustrasjon av distribusjonsnettverkets struktur	54
Figur 15: Fordeling av pellets på havner.....	55
Figur 16: Lagerbeholdning i Drammen ved hovedscenario	57
Figur 17: Lagerbeholdning i Fredrikstad ved hovedscenario	58
Figur 18: Nullpunktsanalyse av total etterspørsel	59

TABELLISTE

Tabell 1: Standard for pelletskvaliteter.....	3
Tabell 2: Klassifisering av skipsstørrelser	5
Tabell 3: Pelletsprodusenter i Norge	6
Tabell 4: Fysisk klassifisering av ruteplanlegging	15
Tabell 5: Modellteknisk klassifisering av ruteplanlegging	16
Tabell 6: Preprosessering av kjøring med grunnmodell.....	37
Tabell 7: Løsning ved kjøring av grunnmodell	38
Tabell 8: Eksempel på effekt av kutt av skipssymmetri	39
Tabell 9: Oversikt over kjøringer med symmetrikutt	44
Tabell 10: Preprosessering av kjøringer med symmetrikutt.....	44
Tabell 11: Løsninger ved kjøringer med symmetrikutt.....	45
Tabell 12: Oversikt over kjøringer med lineærkutt.....	45
Tabell 13: Preprosessering av kjøringer med lineærkutt	46
Tabell 14: Løsninger ved kjøringer med lineærkutt	47
Tabell 15: Preprosessering av kjøringer med symmetri- og lineærkutt	47
Tabell 16: Løsninger ved kjøringer med symmetri- og lineærkutt	48
Tabell 17: Preprosessering av kjøringer med modifisert flåte	49
Tabell 18: Løsninger ved kjøringer med modifisert flåte	50
Tabell 19: Inntekts- og kostnadsstruktur for verdikjeden.....	51
Tabell 20: Utnyttelsesgrad i forhold til seiletid.....	53
Tabell 21: Utnyttelsesgrad i forhold til lastmengde	53
Tabell 22: Relasjoner mellom havner og kunder	56
Tabell 23: Definisjon av øvrige scenarioer og deres bruk av skip	60
Tabell 24: Økonomiske resultater for de øvrige scenarioene	61

1 INTRODUKSJON

Denne masteroppgaven har som formål å anslå lønnsomheten ved maritim distribusjon av trepellets langs kysten av Norge. Det gjøres ved å utvikle en modell som genererer et distribusjonsnettverk optimalt med tanke på profitt. Dette nettverket benyttes til å representere den potensielle lønnsomheten. Modellen fungerer således som optimeringsbasert beslutningsstøtte for å anslå lønnsomheten ved maritim distribusjon av trepellets. Så vidt oss bekjent er arbeidet unikt, da det ikke tidligere er blitt utviklet noen optimeringsmodell med tilsvarende formål.

Rapporten er skrevet med Enova SF som samarbeidspartner, et statlig eid foretak underlagt Olje- og energidepartementet. Selskapet har som formål å fremme en langsiktig miljøvennlig omlegging av energibruk og energiproduksjon i Norge. Det gjøres blant annet ved å tilby investeringsstøtte og rådgivning til privat næringsliv og offentlige instanser. Hensikten er å sørge for mer effektiv energibruk, samt å utvikle levedyktige markeder for fornybar energi. Rasjonalet er at offentlige inngrep skal korrigere ufullstendigheter i markedet. Trevirke som er blitt tørket og komprimert til pellets har et høyt energiinnhold, er fornybart og regnes i mange sammenhenger som klimanøytralt. Enova betrakter trepellets som gunstig til oppvarmingsformål og ønsker med det at pellets skal erstatte energikilder som ikke er klimanøytrale. Det forutsetter imidlertid økt produksjon og distribusjon av pellets her til lands. Per i dag foregår distribusjonen ved landbasert transport, og det eksisterer få distribusjonsnettverk langs kysten av Norge. Enova ønsker av den grunn å vurdere lønnsomheten ved å realisere dette ubenyttede potensialet. Hovedfokus ved utvikling av markeder for fornybar energi er at de gjøres levedyktige. En forutsetning for et levedyktig marked er at verdikjeden som helhet er lønnsom. Sluttbrukeren må verdsette produktet og være villig til å betale mer enn summen av de kostnadene som påløper i verdikjeden. Verdikjeden vi ser på omfatter produksjon av pellets, sjøbasert transport fra produsent til havnelager, lagring i havn, samt landbasert transport fra havn til sluttkunde. Den sjøbaserte transporten fra produsenten til havnene er tenkt utført med bulkskip, mens den landbaserte transporten fra havnelagrene til sluttkundene er tenkt utført med lastebiler. Om verdikjeden er lønnsom avgjøres av om salgsinntektene overstiger summen av råvare- og produksjonskostnader, skipskostnader, seilekostnader, faste og variable havnekostnader, lagerkostnader og landbaserte transportkostnader.

Rapporten er bygd opp slik at det først gis et innblikk i pelletsindustrien, deretter presenteres noe litteratur som er skrevet i forbindelse med optimering av ruteplanlegging, lagerstyring og verdikjedestyring. Disse delene er ment å bidra til beskrivelsen av problemet som skal studeres. Videre i rapporten blir optimeringsmodellen utviklet og formulert matematisk. Dette etterfølges av at modellen implementeres i kommersiell programvare for optimering, og det presenteres en teknisk analyse av selve modellen, samt en økonomisk analyse av modellresultatene.

2 PELLETSINDUSTRIEN

For å kunne vurdere lønnsomheten ved maritim distribusjon av trepellets er det essensielt med en forståelse av pelletsindustrien. Det innebærer en forståelse for produktet, verdikjeden og det norske markedet. Det bidrar til å beskrive problemet som skal studeres.

2.1 PRODUKT

2.1.1 Bruksområde og karakteristikk

Trepellets er et biobrensel som hovedsakelig brukes til oppvarmingsformål. Med biobrensel menes et brensel av ikke-fossilt organisk materiale, såkalt biomasse. Bruksområdene kan deles i fire: direkte oppvarming av hus og villaer ved bruk av pelletsovner, lokale varmesentraler som kun leverer til eget forbruk, fjernvarmeanlegg som videreselger varme til eksterne kunder og industri som produserer prosessvarme. Produktet trepellets utvinnes fra råvarer som sagflis, spon og annet trevirke. Det er klimanøytralt ved at det ikke slippes ut mer CO₂ enn hva treet tok opp da det vokste, noe som understøttes av Sjølie og Solberg (2009). Ved bruk av høyt trykk og temperatur komprimeres biomassen til mange små enheter med sylindrisk form. Diameteren varierer fra 5-12 mm, mens lengden kan være opptil 60 mm. Både myke tresorter som furu og gran, og hardere sorter som eik benyttes.

2.1.2 Produksjonsprosess

Produksjonsprosessen til trepellets blir omtalt av Lislebø og Ingeberg (2010), og starter med at råmaterialet mottas og fjernes for fremmedpartikler, før trevirket homogeniseres og doseres inn i produksjonsanlegget. Deretter følger avvanning og tørking, henholdsvis mekanisk utpressing av vann og fordampning eller fordunsting. Neste trinn i produksjonsprosessen innebærer at partikkelstørrelsen til råmaterialet reduseres gjennom kverning, før selve pelletteringen igangsettes. Råmaterialet presses gjennom et gitter som gir en sylinderform. Her komprimeres trevirket og ved injisering av damp festes partiklene ytterligere til hverandre. Etter nedkjøling kan pelletsen sorteres etter størrelse, der de med for liten størrelse må gjennomgå produksjonsprosessen på ny.

2.1.3 Kvalitet

Pellets er det biobrensel med mest homogen kvalitet, men den er likevel variabel (Viken skog, 2010). Faktorer som spiller inn er durabilitet, renhet, askeinnhold, fuktighet og størrelse. Durabilitet er et mål på hvor slitesterk pelletsen er før den går i oppløsning, mens renhet er en forutsetning for effektiv forbrenning uten unødige utslipp. Høy askeandel i pellets er ikke ønskelig fordi det kan føre til at asken smelter under forbrenning og blokkerer ristarealet i ovnen. Fuktighet er lite ønskelig i pellets ettersom vannet både krever energi for å fordampe, samt hindrer trevirket i å henge sammen. Størrelsen er et mål på hvor håndterlig pelletsen er med tanke på drenasje fra beholdere, siloer og lignende. Det er ikke ønskelig med for stor lengde i forhold til diameter på pelletsen. I Norge finnes det en spesifikk standard for trepellets: NS 3165. Det opereres med tre ulike

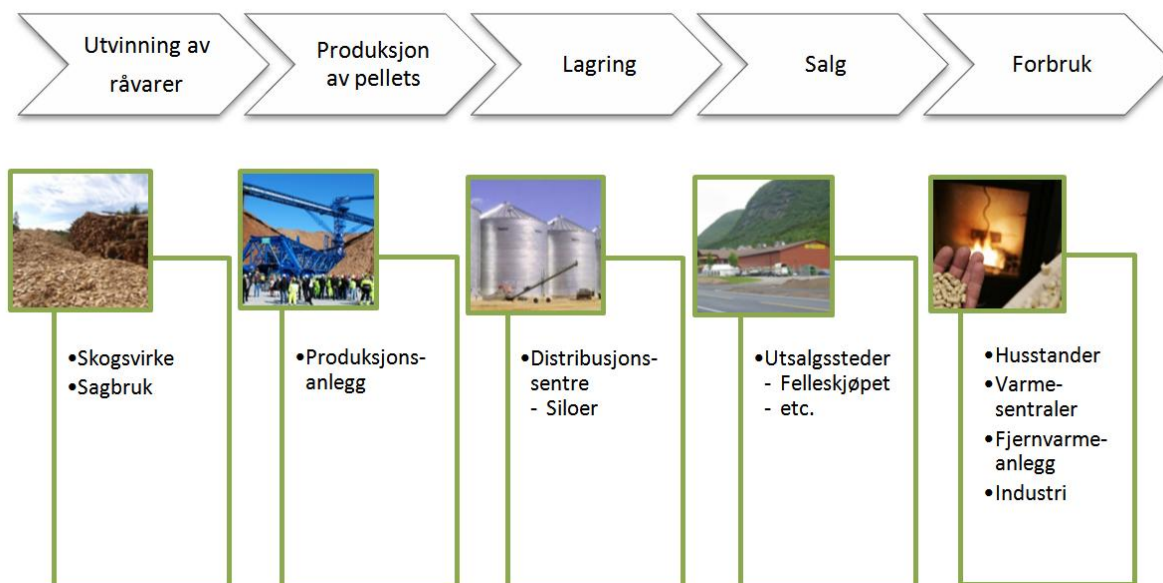
produktgrupper, der pelletsen klassifiseres etter kvalitet slik Tabell 1 viser. Den mest utbredte produktgruppen i Norge er gruppe 1 (Skjevraak, 2010).

Tabell 1: Standard for pelletskvaliteter (Vi-Tre, 2010)

Egenskap	Enhet	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Lengde	mm	≤ 4 x diam.	≤ 5 x diam.	≤ 5 x diam.
Tetthet	kg/m ³	≥ 600	≥ 500	≥ 500
Netto brennverdi	MJ/kg	≥ 16,9	≥ 16,9	≥ 15,1
Askeinnhold	vekt-%	≤ 0,7	≤ 1,5	≤ 1,5
Fuktinnhold	vekt-%	≤ 10	≤ 10	≤ 12
Svovelinhold	vekt-%	≤ 0,08	≤ 0,08	Angis
Klorider	vekt-%	≤ 0,03	≤ 0,03	Angis

2.2 VERDIKJEDE

Verdikjeden til trepellets kan deles opp i fem hovedledd: utvinning av råvarer, produksjon av pellets, lagring i distribusjonssentre, salg ved utsalgssteder og forbruk hos sluttkonsumenten. Dette er illustrert i Figur 1. I tillegg foregår transport mellom de ulike leddene.



Figur 1: Illustrasjon av verdikjeden til pellets

2.2.1 Utvinning av råvarer

Det har tidligere i rapporten blitt trukket frem at inngående råvarer er sagflis, spon og annet trevirke. Dette råmaterialet er primært biprodukter og avfall fra skogsvirke og sagbruk. Ved nærhet til slikt avfall kan lokale og regionale leverandører benyttes. Eventuelt kan råvarene importeres fra utlandet. Valg av leverandør gjøres på bakgrunn av blant annet pris, kvalitet, transportkostnader, leveringstid og leveringssikkerhet. Råvarekostnader og kostnader til eventuell

tørking kan utgjøre opptil to tredeler av de totale produksjonskostnadene, slik det vises til i Spelter og Toth (2009).

2.2.2 Produksjon av pellets

Produksjonen av pellets kan enten foregå innenlands, eller utenlands for så å importeres. Selve produksjonen avhenger av størrelsen på produksjonsanlegget, samt fuktigheten på de råvarene som mottas. Mani et al. (2006) viser hvordan pelletsindustrien gir stordriftsfordeler ved at produksjonsprosessen kan skaleres opp forholdsvis enkelt, uten at kostnadene følger i samme tempo. Kvaliteten på de råvarene som benyttes spiller imidlertid også inn, der det er spesielt kostnadskrevende å fjerne fuktighet.

2.2.3 Lagring i distribusjonssentre

Lagring i distribusjonssentre har sin verdi ved at de fanger opp forskjeller mellom produksjons- og forbruksmønsteret. Samtidig skaper distribusjonssentrene en større nærhet til sluttkonsumentene, som igjen reduserer leveringstiden og øker leveringssikkerheten. Målet er å øke servicegraden og kundetilfredsheten. Siloer brukt til lagring av korn, sement og produkter av polyetylen kan også brukes til lagring av pellets. Mengde korn produsert og importert varierer fra år til år, noe som påvirker behovet for kornsiloer. Ettersom pellets og korn lagres i de samme siloene bidrar det til at lagerkostnadene for pellets varierer (Skjevraak, 2010). Dersom lagring av pellets er utført på en hensiktsmessig måte, hvilket betyr at produktet skånes for fuktighet og ikke utsettes for fysiske påkjenninger, vil ikke lagringen forringe kvaliteten. Som følge av det lave innholdet av fuktighet kan pellets lagres i årevis uten at det får konsekvenser for produktet.

2.2.4 Salg ved utsalgssteder

Det finnes i overkant av 200 utsalgssteder for pellets i Norge (Norsk bioenergiforening, 2010). Felleskjøpet er en butikkjede som fører dette produktet, og kjeden er gjennom drøye 80 forhandlere representert over store deler av Norge. I tillegg finnes det en rekke enkeltstående forhandlere av pellets rundt omkring i landet. Trepellets er en bulkvare og kan håndteres som granulat. Store forbrukere får gjerne levert produktet i bulkform, mens mellomstore forbrukere får levert pellets emballert i storesekker av størrelsen 700-1000 kg. Mindre forbrukere kjøper derimot pellets i småsekker med størrelse på 15-25 kg. Kunden har selv valget mellom å hente produktet eller å få det levert til seg. Salg forekommer både innenlands og ved eksport til utlandet.

2.2.5 Forbruk hos sluttkonsumenten

Forbrukerne er som tidligere beskrevet individuelle husstander som varmer opp villaen direkte, lokale varmesentraler som kun leverer til eget forbruk, fjernvarmeanlegg som videreselger varme til eksterne kunder og industri med behov for prosessvarme. Størrelsen på deres forbruk er med på å avgjøre i hvilken form pelletsen omsettes og om pelletsen hentes av kunden eller leveres til kunden. Omsetning i form av bulk forutsetter at kunden har et mottaksanlegg med en form for silo for lagring av pellets.

For industrier med behov for prosessvarme er det særdeles viktig med leverings-sikkerhet. Mangel på brensel vil stanse produksjonen og gi store økonomiske konsekvenser. Det er naturlig at dersom det besluttes å betjene en industri-kunde, inngås det langsiktige avtaler som sikrer at kunden får sin etterspørsel dekt til enhver tid (Grønhaug, 2011a).

2.2.6 Transport mellom ledd i verdikjeden

Overgangene mellom de ulike leddene i verdikjeden foregår ved transport av henholdsvis treflis og pellets. Treflis er en bulkvare. Som det tidligere har blitt trukket frem er også pellets en bulkvare som kan emballeres i sekker, og det foregår både sjøbasert transport ved bruk av skip og landbasert transport ved bruk av lastebiler. Skip dominerer over lange avstander og brukes gjerne ved import og eksport.

Som et bulkprodukt fraktes pellets i bulkskip. Lasting og lossing foregår ved bruk av grabb, skuffe eller trykkluft. Kapasiteten på utstyret varierer veldig og kan være på alt fra 10 til 2000 tonn per time, noe Bradley et al. (2009) gir uttrykk for. Pellets i bulkform utsettes for store fysiske påkjenninger ved lasting og lossing. Da er det viktig med høy durabilitet hos pelletsen for at kvaliteten ikke skal forringes. Samtidig er det viktig å utføre lastingen og lossingen på en skånsom måte, og at transporten foregår varsomt og uten noen form for fuktighet. Dersom produktet skades vil pelletsen gå i oppløsning og medføre store mengder sagflis og støv. Dette kan medføre brannfare, og transport av pellets er derfor underlagt flere sikkerhetsmessige forskrifter. Det innebærer blant annet muligheter for lufting. I sekker lastes pelletsen på paller og fraktes med tradisjonelle lasteskip. Skip som frakter gjødsel, sand, grus, stein og liknende blir ofte også brukt til pelletstransport (Skjevraak, 2010). Det gjør det aktuelt å benytte kun en andel av skipets kapasitet til pellets, og heller laste den øvrige kapasiteten med andre produkter.

Prisen på bruk av skip bestemmes av markedet, der det i perioder med mye aktivitet er liten tilgang på skip og høye kostnader. Tilsvarende er det stor tilgang på skip og lave kostnader i perioder med lite aktivitet. Tabell 2 viser en klassifisering av størrelsen til såkalte *dry bulk carriers*. Enheten dødvekttonn uttrykker differansen i antall tonn vann skipet fortrenger når det er fullastet kontra når det er tomt. Skip som krysser Atlanteren frakter i mange tilfeller 60 000 tonn og oppover, mens skip som seiler langs kortere kyststrekninger ofte frakter så lite som 1500-3000 tonn (Skjevraak, 2010).

Tabell 2: Klassifisering av skipsstørrelser (Bradley et al., 2009)

Type skip	Laststørrelse [Dødvekttonn]
Småskip	0-20 000
Handysize	20 000-35 000
Handymax	35 000-50 000
Panamax	50 000-80 000
Capesize	80 000-300 000

Lastebiler dominerer ved transport av pellets over kortere avstander. Det er ikke lønnsomt å benytte lastebil til transport av pellets dersom avstanden er større enn 200-300 km. Det kommer frem av Sénéchal og Grassi (2009). Som et bulkprodukt fraktes pelletsen i tankbiler, mens i sekker på paller fraktes det med tradisjonelle lastebiler. Lastekapasiteten er typisk 33 tonn pellets per lastebil (Ingeberg, 2010).

2.3 MARKEDSOMTALE

2.3.1 Produsenter

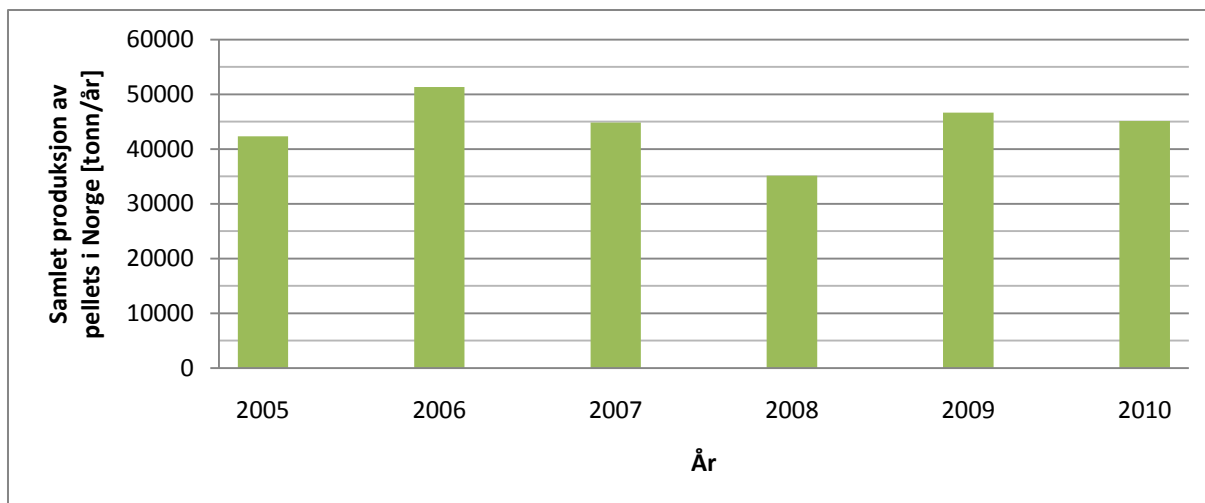
I Norge eksisterte det ved utgangen av 2010 syv ulike produsenter av trepellets, slik Tabell 3 viser. Anleggene har ifølge Lislebø og Ingeberg (2010) en gjennomsnittlig årlig produksjon på 7 000 tonn, med unntak av Biowoods anlegg på Averøya i Møre og Romsdal, som har en forventet årlig produksjon på 450 000 tonn. Biowood planlegger å eksportere store mengder til utlandet. Anlegget er under oppføring og driver foreløpig kun prøveproduksjon.

Tabell 3: Pelletsprodusenter i Norge

Produsent	Fylke
Forforedling AS	Nord-Trøndelag
Vi Tre AS	Sør-Trøndelag
Biowood Norway	Møre og Romsdal
Gausdal Biopellets	Oppland
Rendalen Biopellets AS	Hedmark
Pemco Trepellets	Hedmark
Hallingdal Trepellets	Buskerud

2.3.2 Produksjon

Drøyt 45 000 tonn pellets ble produsert i Norge i 2010. Det har imidlertid ikke vært noen klar trend i produksjonsmønsteret de seneste årene, noe vi ser av Figur 2. I perioden 2005 til 2010 har produksjonen svingt mellom 35 000-51 000 tonn per år (Norsk bioenergiforening, 2011b). Nedgangen i 2008 skyldes overproduksjon i 2006 og 2007.

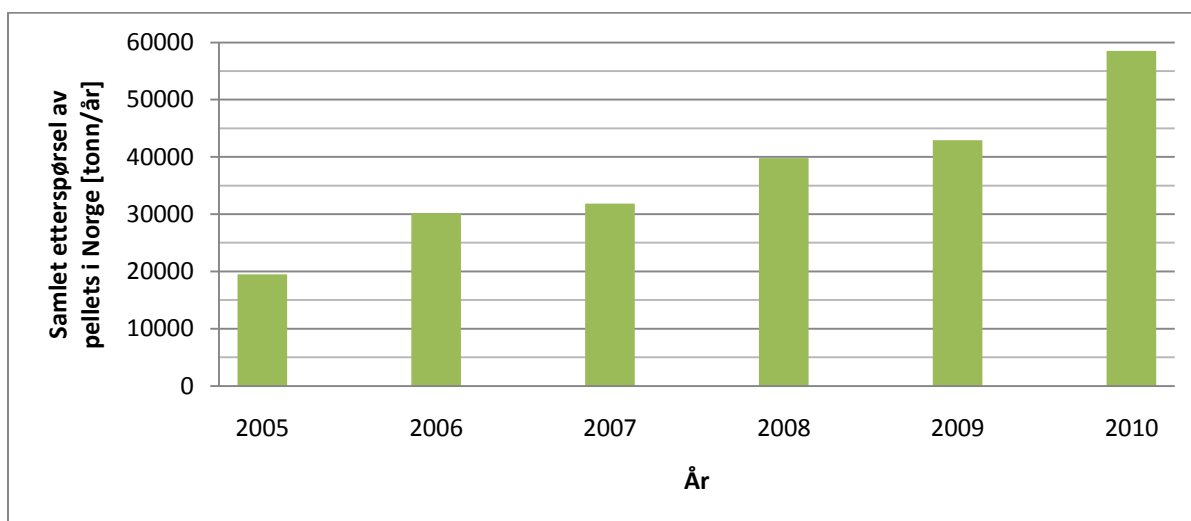


Figur 2: Samlet pelletsproduksjon i Norge (Norsk bioenergiforening, 2011b)

Som tidligere beskrevet er pelletsindustrien en industri med stordriftsfordeler. Produksjonen kan skaleres opp uten at kostnadene følger i samme tempo, noe som gjør størrelsen på produksjonsanlegget avgjørende i forhold til produksjonskostnader. Med unntak av Biowood er de seks øvrige produsentene små i internasjonal målestokk. Det gir sitt utslag i relativt høye produksjonskostnader. Anlegget på Averøya har derimot en forventet kapasitet som gjør det til ett av verdens største anlegg (Grønhaug, 2011b). Her finnes det med andre ord et potensial for å drive kostnadseffektiv produksjon av trepellets i Norge.

2.3.3 Etterspørsel

Drøye 58 000 tonn trepellets ble solgt i Norge i 2010. Etterspørselen i Norge øker stadig, og i perioden 2005 til 2010 har den tredoblet seg. Det viser Figur 3. Rundt 67 % av salget i 2010 var i form av bulk, 2 % emballert i storsekker, mens 31 % ble solgt emballert i småsekker. Trenden er at stadig flere forbrukere kjøper pellets i bulk, noe som skyldes en utvikling med mer bruk av pellets i større varmesentraler. (Norsk bioenergiforening, 2011b)



Figur 3: Samlet etterspørsel av pellets i Norge (Norsk bioenergiforening, 2011b)

Ved utgangen av 2010 har Enova gitt investeringsstøtte til prosjekter som totalt har kontraktfestet et årlig forbruk på 75 000 tonn pellets. Disse prosjektene er relatert til oppvarming av bygninger ved bruk av pellets. Forbruket kommer som tillegg til dagens allerede eksisterende etterspørsel. Det betyr at ved realisering av prosjektene vil den årlige etterspørselen av trepellets i hele Norge være på drøye 133 000 tonn. 95 % av prosjektene skal være ferdigstilt innen utgangen av 2012. Dette er imidlertid et optimistisk anslag på fremtidens etterspørsel, da det er knyttet usikkerhet til om alle prosjektene blir realisert i full grad. Konklusjonen blir likevel at pelletsindustrien står foran en periode med sterk vekst. (Grønhaug, 2010)

Et tilskudd til etterspørselen kommer fra industrielle aktører med behov for prosessvarme. Per dags dato er ikke bruk av pellets til prosessvarme særskilt utbredt, men det fremtidige potensialet er ifølge Lislebø og Ingeberg (2010) stort. Enova har kartlagt industrier og deres forbruk av fossilt brensel. Spesielt mengden lettolje som forbrukes er interessant. Dette fordi det er forholdsvis rimelig og enkelt å konvertere fra fyring med lettolje til fyring med pellets. Mengden lettolje det fyres med på årsbasis i Norge i dag tilsvarer 130 000 tonn pellets (Grønhaug, 2011a). Av dette er drøye 90 000 tonn lokalisert i kyststrøk i midtre- og sørlige deler av Norge. At omlag 50 % av mengden lettolje konverteres til pellets i nær fremtid kan være et fornuftig utgangspunkt.

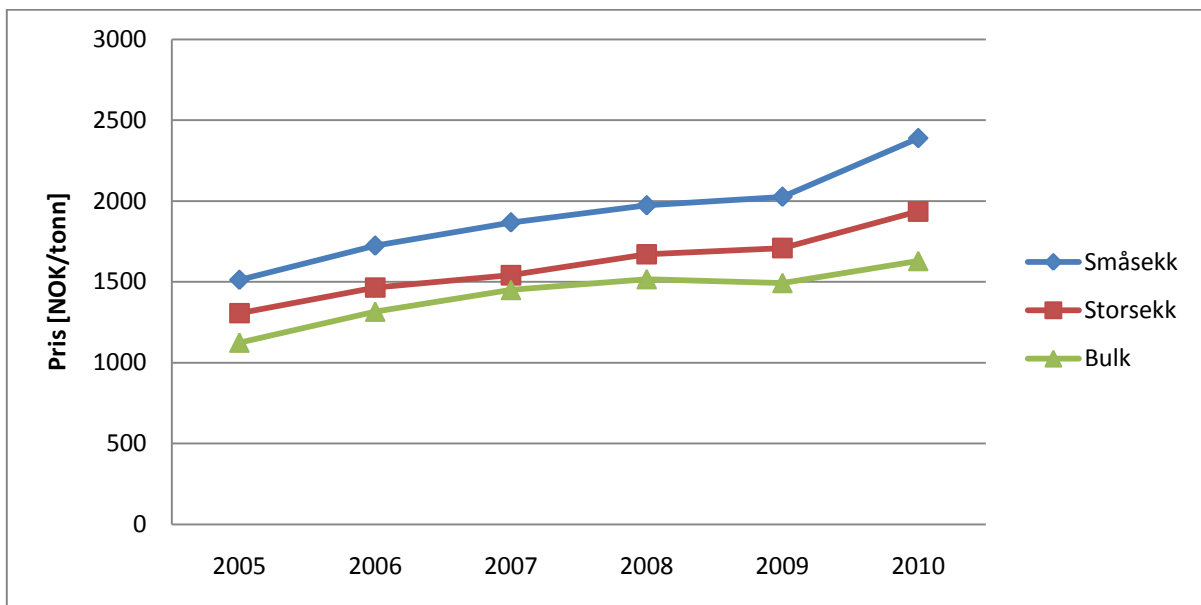
2.3.4 Sesongvariasjoner

Pellets er som kjent et produkt som brukes til oppvarming, og oppvarmingsbehovet i bygninger avhenger sterkt av utetemperatur. I et land som Norge varierer temperaturen sterkt mellom sommer og vinter, noe som gir sitt utslag på etterspørselen av pellets. Året kan grovt sett oppdeles i fire sesonger, der desember, januar og februar tilhører vintersesongen, mars, april og mai tilhører våren, juni, juli og august tilhører sommeren, mens september, oktober og november tilhører høsten. For oppvarmingsbehov i bygninger faller anslagsvis 50 % av den årlige etterspørselen av pellets innenfor vintersesongen, mens 25 % av etterspørselen inntreffer henholdsvis om våren og om høsten. Om sommeren er etterspørselen tilnærmet lik null (Skjevraak, 2010). Ved bruk av pellets til prosessvarme i industrien er imidlertid situasjonen en annen. Det industrielle behovet er tilnærmet uavhengig av årstid og sesongvariasjoner er således ikke-eksisterende. Etterspørselen hos industrien er med andre ord konstant (Grønhaug, 2011a). Det gjør at det finnes etterspørsel også om sommeren.

2.3.5 Salgspris

Om pelletsen leveres i bulk eller emballert i sekker påvirker prisen for sluttbrukeren. Bulkleveranse gir den laveste prisen, mens småsekk gir den høyeste prisen. Dette henger sammen med at bulk tillater en større mengde pellets per volum, og dermed er mer kostnadseffektivt å lagre og transportere. Samtidig unngås kostnader til emballasje og pakking. Pellets har fra 2005 opplevd en prisvekst som flatet ut i overgangen mellom 2008 og 2009. I 2010 har imidlertid prisene steget igjen, der økningen har vært spesielt stor for pellets i småsekk. I

2010 var gjennomsnittsprisen på trepellets i bulkform 1629 NOK/tonn (Norsk bioenergiforening, 2011b). Figur 4 viser utviklingen. Merk at prisene gjelder for opplasting ved fabrikk og er eksklusiv transport.



Figur 4: Prisutvikling for pellets i Norge (Norsk bioenergiforening, 2011b)

2.3.6 Import og eksport til og fra Norge

Over tid har det blitt utviklet et verdensmarked for pellets. Det gjør det mulig for norske produsenter å eksportere trepellets, samtidig som norske kunder kan importere pellets. Det skaper et konkurranseforhold mellom regionale og internasjonale aktører. Differansen mellom eksport- og importpris utgjøres av kostnader knyttet til skipstransport. Store deler av den internasjonale handelen av trepellets har sitt utspring i Rotterdam, Nederland. Per i dag er prisnivået i dette området på omlag 130 Euro/tonn (Apxendex, 2011), hvilket tilsvarer anslagsvis 1000 NOK/tonn. Ved import til Norge kommer tillegg for transport.

I 2010 ble drøye 14 000 tonn pellets importert, mens omtrent 750 tonn ble eksportert. Norge var med det en netto importør av trepellets. Det stemmer bra overens med at produksjonstallene i 2010 var lavere enn etterspørselstallene. I likhet med produksjonen i Norge har mengden pellets som er blitt importert og eksportert variert kraftig de seneste årene. Det kan tyde på at det nasjonale pelletsmarkedet er under utvikling. Anlegget som er under oppføring på Averøya vil imidlertid gjøre Norge til en netto eksportør av pellets, forbeholdt at den forventede kapasiteten realiseres og utnyttes.

3 RELEVANT LITTERATUR OG KLASSIFISERING

I denne rapporten benyttes optimering som fagdisiplin til å vurdere lønnsomheten til et maritimt distribusjonsnettverk. Det vil da være naturlig å trekke frem noe litteratur som er skrevet i forbindelse med optimering av verdikjedestyring, ruteplanlegging og lagerstyring. Dette for å se om arbeid gjort tidligere kan være til hjelp. Vår problemstilling kan samtidig klassifiseres i henhold til litteraturen trukket frem. Hensikten er ikke å gjennomføre et litteraturstudium, men heller å gi et lite innblikk i noe som er skrevet på området. Det må derfor presiseres at det finnes en hel del litteratur som ikke trekkes frem i denne sammenheng. Sammen med det foregående kapittelet som ga et innblikk i pelletsindustrien, er dette kapittelet ment å bidra til å beskrive problemet som skal studeres.

3.1 VERDIKJEDESTYRING OG -OPTIMERING

Prosessen fra et tre står plantet i skogen til pellets er produsert og tilgjengelig hos sluttkonsumenten består av mange ledd. Ruteplanlegging av skip inngår kun som en del av denne prosessen. Begrepet verdikjede omfatter imidlertid hele prosessen, og operasjonsanalyse i verdikjeder søker en effektivisering av denne prosessen.

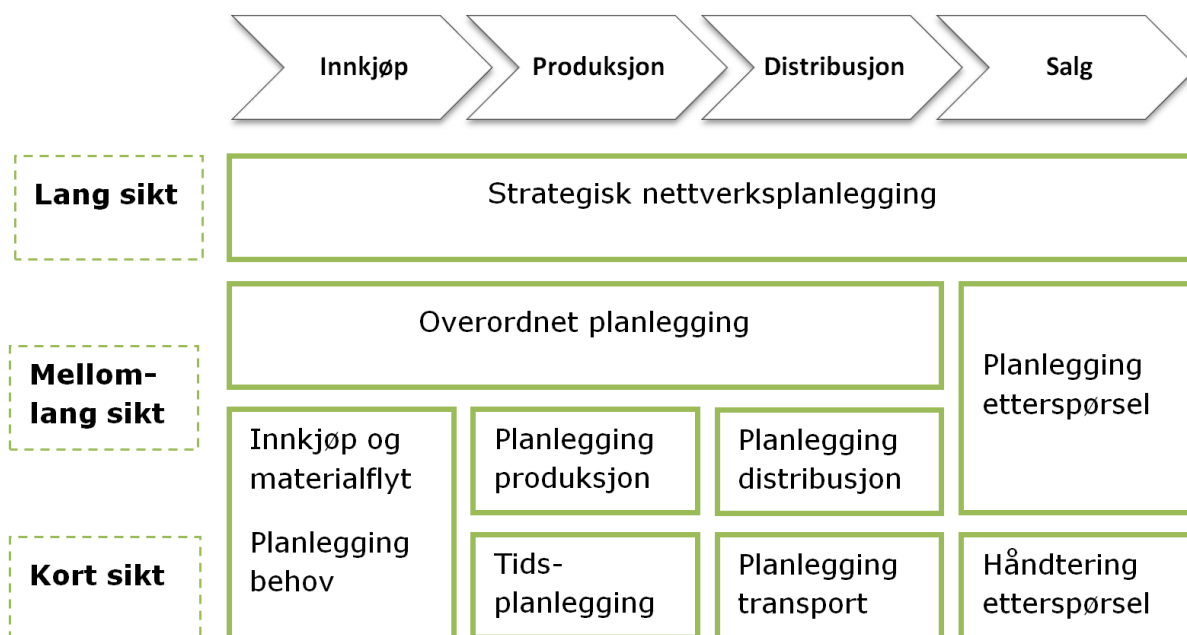
3.1.1 Definisjon av verdikjede

Verdikjede som begrep omfatter alle de prosesser en vare gjennomgår fra utvinning av råvarer til leveranse hos sluttkunde. Simchi-Levi et al. (2003) definerer verdikjedestyring som en fagdisiplin med mål om å integrere leverandører, produsenter, distribusjonsanlegg og utsalgssteder på en slik måte at riktig vare blir produsert og distribuert i riktig mengde til riktig mottaker i riktig tid, der kostnadene holdes minimale. Ifølge Christopher (2005) omfatter dette aktiviteter som innkjøp, lagerstyring, produksjon, distribusjon og salg.

Som følge av økende konkurranse og reduserte profittmarginer presses verdikjeder til å gjøres stadig mer effektive. En konsekvens av dette er at flere selskaper ikke lenger kun optimerer med hensyn på egen drift, men med hensyn på hele verdikjeden. Det er en trend at tøffe forhandlinger internt i verdikjeden erstattes av samarbeid og informasjonsutveksling. Andersson et al. (2010) uttrykker det slik at i flere tilfeller står konkurransen mellom ulike verdikjeder og ikke individuelle selskaper.

3.1.2 Verdikjedens aktiviteter og planleggingsnivåer

Figur 5 viser de ulike aktivitetene i en verdikjede, samt hvilke typer planlegging hver aktivitet krever. Planleggingen er igjen oppdelt i nivåene *lang sikt*, *mellomlang sikt* og *kort sikt*.



Figur 5: Aktiviteter og planleggingsnivåer i verdikjeder (Meyr et al., 2002)

Strategisk nettverksplanlegging betegner utarbeidelse av den fysiske strukturen til verdikjeden. *Overordnet planlegging* innebefatter taktiske/strategiske beslutninger for enten innkjøp, produksjon eller distribusjon. Det kan være alt fra valg av produksjonslinje hos produsent til valg av kjøretøy hos distributør. *Planlegging etterspørsel* er et begrep som brukes om taktiske/strategiske beslutninger i forbindelse med kundebehandling.

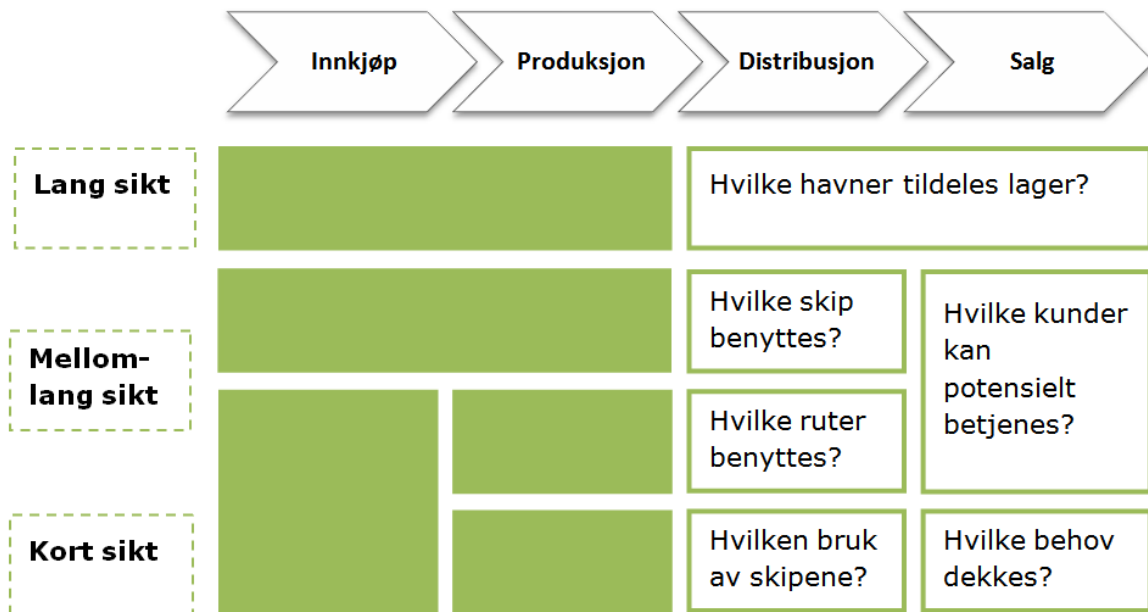
Dersom vi beveger oss over på et noe mindre langsiktig planleggingsnivå i Figur 5, finner vi *innkjøp og materialflyt*. Taktiske beslutninger angående interaksjon med leverandører og forsyning av råvarer inngår i dette. *Planlegging produksjon* betegner også taktiske beslutninger, men i forbindelse med transformering av ressurser til produkter. Her kan valg av blandeforhold mellom råvarer være et eksempel. *Planlegging distribusjon* innebefatter taktiske beslutninger ved distribusjon av varer fra produsent til utsalgssted.

Det laveste planleggingsnivået i Figur 5 tar for seg det som ligger nærmest frem i tid, altså det mest kortsiktige. *Planlegging behov* representerer operasjonelle beslutninger i forbindelse med råvaretilgang. *Tidsplanlegging* betegner operasjonelle produksjonsmessige beslutninger, slik som hvilke produkter skal produseres til ulike tider. *Planlegging transport* innebefatter operasjonelle beslutninger ved distribusjon, mens *håndtering etterspørsel* brukes om operasjonelle beslutninger i forbindelse med salg.

3.1.3 Klassifisering av aktiviteter og planleggingsnivåer

Det vil være interessant å diskutere vår problemstilling i forhold til aktivitetene og nivåene presentert i Figur 5. Vår analyse har som formål å avdekke om maritim distribusjon er lønnsomt. For å utvikle et maritimt distribusjonsnettverk som kan representere lønnsomheten må det tas en rekke beslutninger knyttet til

distribusjon og salg. Noen av spørsmålene som er aktuelle er presentert i Figur 6. Aktivitetene innkjøp og produksjon blir behandlet som fastsatte aktiviteter som kun gir distribusjonsnettverket en kontekst.



Figur 6: Klassifisering av nødvendige beslutninger i analysen

Det å beslutte hvilke havner som skal tildeles lager kan karakteriseres som *strategisk nettverksplanlegging*. Det bidrar til utarbeidelse av den fysiske strukturen til verdikjeden og har et langsiktig tidsperspektiv. Disse beslutningene er tenkt overlatt til modellen.

Hvor mange skip som skal benyttes og av hvilken størrelse er beslutninger som kan klassifiseres som *overordnet planlegging*. Ved å inkludere dette i modellen gjøres flåtestørrelsen variabel. Hvilke transportruter skipene skal følge har et mer taktisk perspektiv og beskrives som *planlegging distribusjon*. Felles for disse beslutningene er at de overlates til modellen. Noe som derimot forhåndsdefineres er hvilke kunder som potensielt kan betjenes, noe som kan betegnes som *planlegging etterspørsel*.

Problemstillingen har tidligere blitt omtalt som strategisk og taktisk. Det kan tolkes som at planlegging av operasjonell karakter ikke er å finne i vår modell. For å fastsette hvilke havner som skal tildeles lager og hvilke transportruter skipene skal følge, er det imidlertid nødvendig å betrakte til hvilke tider ulike skip skal benyttes og hvilken last de skal tildeles. Dette karakteriseres som *planlegging transport*. Samtidig er det nødvendig å betrakte hvilke kunder som skal få sin etterspørsel dekt til ulike tider, noe som klassifiseres som *håndtering etterspørsel*. Siden analysen er langsiktig er talldataene forventede fremtidige verdier, hvilket innebærer usikkerhet. Ved å behandle transportplanleggingen og etterspørselshåndteringen i mindre detalj flyttes fokuset fra operasjonelt til

taktisk. Det stemmer overens med at problemstillingen tidligere har blitt omtalt som strategisk og taktisk.

3.2 KOMBINERT RUTEPLANLEGGING OG LAGERSTYRING

En viktig del av enhver verdikjede er ruteplanlegging og lagerstyring. I vår problemstilling står dette veldig sentralt og vies derfor spesielt stor oppmerksomhet. Det er naturlig å foreta en avgrensning til litteratur som omhandler kombinert maritim ruteplanlegging og lagerstyring.

3.2.1 Grunnproblemet

Ved maritim transport fra én havn til en annen eksisterer det i mange tilfeller lager i hver havn. Dersom skipsoperatøren er ansvarlig for både selve transporten og lagerholdet i havnene har vi et *Inventory Ship Routing Problem* (ISRP). Christiansen og Fagerholt (2009) beskriver et slikt grunnproblem og viser samtidig til mulige varianter av problemet. I grunnproblemet inngår ett enkelt homogent bulkprodukt som produseres og konsumeres i henholdsvis laste- og lossehavner. Alle havner er utstyrt med et lager og har en konstant og kjent produksjons-/forbruksrate å forholde seg til. Verken antall besøk i de ulike havnene eller mengde lastet/losset er forhåndsbestemt. Det gjør laststørrelsene fleksible. Planleggingsproblemet dreier seg om å utarbeide ruter og tidsplaner som minimerer transportkostnadene uten å forstyrre produksjonen eller forbruket. Skipene kan lastes/losses helt eller delvis og besøke samme havn flere ganger i løpet av en planleggingsperiode. Et skip kan bære lastene til flere ulike kunder på samme tid, og kan da også losse i to eller flere etterfølgende havner. Den maritime flåten består av flere skip og har en fastsatt størrelse. Flåten er for øvrig heterogen.

Et planleggingsproblem som Yara, tidligere kalt Norsk Hydro Agri, står ovenfor bærer mange av de samme karakteristikkene som grunnproblemet presentert i Christiansen og Fagerholt (2009). Yara produserer og forbruker ammoniakk ulike steder i verden, og distribusjonen foregår med en heterogen flåte av skip. Problemet beskrives i Christiansen (1999) og løses ved bruk av kolonne-generering. Skipsruter og lagersammensetninger utgjør kolonnene, mens sub-problemene løses ved bruk av dynamisk programmering for hver havn og for hvert skip. Flatberg et al. (2000) løser det samme problemet ved bruk av en heuristikk i samspill med en LP-solver. Heuristikken fastsetter skipsrutene, mens solveren fastsetter tider og kvantum.

3.2.2 Ulike varianter av grunnproblemet

For å beskrive problemer av en annen karakter er det mulig å endre på enkelte av karakteristikkene til grunnproblemet fra Christiansen og Fagerholt (2009). Rakke et al. (2010) omhandler en variant som inneholder kun én produsent, men flere kunder. Problemet angår en av verdens største produsenter av Liquefied Natural Gas (LNG). Produsenten har ansvar for lagring av LNG etter omdannelsen fra Natural Gas (NG), lasting av skip, samt rute- og tidsplanlegging av en heterogen flåte med tankskip. Skipene fylles hos produsenten og fraktes til

ulike konsumenter. Dette gir en form for VRP-struktur. En annen mulig variant av grunnproblemet er variable produksjons- og/eller forbruksrater. Et slikt tilfelle finner vi i LNG-studien som er utført i Grønhaug et al. (2010). Både produksjon og forbruk er variabelt, noe som håndteres ved bruk av kolonnegenerering på en modell der tiden er diskretisert.

Enkelte problemer skiller seg fra grunnproblemet ved at flere ulike produkter inngår. Al-Khayyal og Hwang (2007) presenterer et slikt tilfelle og foreslår en formulering som tar hensyn til allokering av produkter ombord på skipet. Hwang (2005) løser problemet ved bruk av Lagrange-relaksering og heuristiske tilnærminger. Tidvis kan en skipsoperatør oppleve at flåten av skip ikke har tilstrekkelig kapasitet til å dekke all etterspørsel. I slike tilfeller kan det tillates at skip leies inn for enkeltturer, såkalt *spot chartering*. Christiansen et al. (2011) ser på et tilfelle i sementindustrien der skipstransporten periodevis suppleres med lastebiler. Lagrene hos forbrukerne prioriteres etter viktighet og etter hvilke kostnader eventuell landbasert transport vil medføre. De lagrene med høyest prioritering blir først betjent av den maritime flåten.

Den maritime ruteplanleggingen og lagerstyringen i et ISRP inngår kun som en del av en større verdikjede. En mer omfattende variant av grunnproblemet som er beskrevet i Christiansen og Fagerholt (2009) er anvendelse av optimering i verdikjeder. Gunnarsson et al. (2006) studerer celluloseprodusenten Södra Cell AB, der lokalisering av terminaler og ruteplanlegging av skip skal utføres. Det formuleres en matematisk modell som angir hvilke terminaler som bør benyttes, og som på samme tid angir skipsruter. Målet er å forsyne kundenes årlige etterspørsel slik at distribusjonskostnadene minimeres. Gunnarsson et al. (2007) har et enda mer helhetlig perspektiv på Södra Cell AB og integrerer planleggingen av råvaretransport fra områder der innhøstingen foregår til produksjonslokalene, innhold og blandeforhold i produksjonen, distribusjon av ferdig produkt til kunder enten direkte eller via terminaler, samt valg av ordre å imøtekomme. Vi ser at problemet inkluderer flere ledd i verdikjeden, og at produksjon, distribusjon og lagring ses i sammenheng.

3.3 KLASSIFISERING AV FYSISKE DIMENSJONER

For å beskrive vårt problem kan det være hensiktsmessig å foreta en klassifisering etter noen utvalgte dimensjoner innenfor ruteplanlegging. Vår analyse omfatter både maritim transport fra produsent til havn og landbasert transport fra havn til sluttkunde. Den maritime ruteplanleggingen vies imidlertid mer oppmerksomhet enn den landbaserte ruteplanleggingen. Den maritime transporten vil bli modellert med en flåte av skip som skal betjene et antall kunder mest mulig hensiktsmessig. I havnene tillates kun lossing. Den landbaserte transporten fra havn til sluttkunde vil derimot bli modellert uten bruk av depot, flåte, buer eller ruter, og kan da heller ikke karakteriseres som ruteplanlegging. Klassifiseringen vil derfor bli utført med fokus på den maritime transporten.

Først betraktes de fysiske dimensjonene som er å finne i Tabell 4. Tabellen er utarbeidet på bakgrunn av dimensjoner hentet fra Christiansen et al. (2007) og Andersson et al. (2010). Klassifiseringen for vår problemstilling er markert med kursiv skrift og understrekning.

Tabell 4: Fysisk klassifisering av ruteplanlegging

	Alternativer			
Struktur	Én-til-én	<u>Én-til-mange</u>	Mange-til-mange	
Flåtestørrelse	Én	Flere	<u>Ubestemt</u>	
Flåtesammensetning	Homogen	<u>Heterogen</u>		
Last	Fastsatt enkeltlast	Flere fastsatte laster	Fleksibel enkeltlast	<u>Flere fleksible laster</u>

3.3.1 Struktur

Betegnelsen *én-til-én* brukes på nettverk der det leveres fra én node til en annen node, *én-til-mange* der det leveres fra én node til mange noder eller vice versa, mens *mange-til-mange* brukes der det leveres fra mange til mange noder slik tilfellet er i Christiansen og Fagerholt (2009) sitt grunnproblem. I vår analyse inkluderes kun én produsent, noe som vil bli begrunnet senere i rapporten (se 4.1.2). Kysten er langstrakt og omfatter store geografiske områder. Det resulterer i mange havner som i dette tilfellet regnes som kunder. Det leveres derfor fra én node til mange noder, og strukturen på den maritime distribusjonen blir *én-til-mange*.

3.3.2 Flåtestørrelse

Flåtestørrelsen angir om det er *ett* eller *flere* skip i flåten, eller om antall skip ikke er forhåndsdefinert, såkalt *ubestemt*. Norskekysten spenner over et geografisk område som er såpass stort at det kan vise seg hensiktsmessig med flere skip som betjener havnene. Hvor mange skip som er hensiktsmessig er imidlertid uvisst. Ved å la modellen finne optimal størrelse settes flåtestørrelsen til *ubestemt* i vår analyse. Det avviker fra grunnproblemet der flåtestørrelsen er *flere* skip.

3.3.3 Flåtesammensetning

Dersom flåtesammensetningen er *homogen* vil skipene bære de samme karakteristikkene, mens en *heterogen* flåte innebærer at skipene bærer ulike karakteristikk. I virkeligheten er skip gjerne ulike. I vår analyse benyttes derfor skip med ulike lastekapasiteter som igjen gir sitt utslag i ulike kostnader. Det medfører at den maritime flåten er *heterogen*.

3.3.4 Last

Enkeltlast betegner skip som kun bærer én last om gangen, mens *flere laster* betegner skip som bærer flere laster på samme tid. Med flere laster menes leveranser til flere ulike kunder, altså ikke flere ulike produkter. *Fastsatt last*

innebærer at størrelsen på lasten er forhåndsbestemt gjennom kontrakter, mens *fleksibel last* innebærer at størrelsen på lasten ikke er forhåndsbestemt, men bestemmes i modellen. Havnene langs norskekysten ligger tilnærmet langs den samme buen, hvilket innebærer at et skip på vei mot en spesifikk havn vil passere alle havner som har en kortere avstand til opprinnelsesstedet. Det gjør det naturlig å tillate at skip bærer flere laster samtidig og at flere havner besøkes før skipet returnerer. Siden det i analysen ses på bulkbasert pellets er det også naturlig å gjøre laststørrelsen til en variabel som skipets operatør kontrollerer. Lasten klassifiseres dermed som *flere fleksible laster*, noe som er likt med grunnproblemet til Christiansen og Fagerholt (2009).

3.4 KLASSIFISERING AV MODELLTEKNISKE DIMENSJONER

Problemstillingen kan også klassifiseres etter noen modelltekniske dimensjoner innenfor ruteplanlegging, slik Tabell 5 gir uttrykk for. Også denne tabellen er utarbeidet på bakgrunn av dimensjoner hentet fra Christiansen et al. (2007) og Andersson et al. (2010). Igjen er klassifiseringen for vår problemstilling markert med kursiv skrift og understrekning.

Tabell 5: Modellteknisk klassifisering av ruteplanlegging

Planleggingshorisont	Alternativer		
	<i>Strategisk</i>	<i>Taktisk</i>	Operasjonell
Etterspørsel	<i>Deterministisk</i>	Stokastisk	
Flyt	<i>Arc flow</i>	Path flow	
Ruteplanlegging	Enkeltbesøk	<i>Flere besøk</i>	Uten depot

3.4.1 Planleggingshorisont

Strategiske problemer tar for seg langsiktige beslutninger som utgjør grunnlag for taktisk- og operasjonell planlegging. Ved *taktisk* planlegging fokuseres det ofte på planlegging av mellomlang sikt, mens *operasjonell* planlegging er den mest kortsiktige formen for planlegging og blir gjerne utført når usikkerheten er høy og situasjonen dynamisk. Vår analyse utføres for å vurdere et fremtidig potensial, noe som gjør planleggingshorisonten langsiktig. For å vurdere lønnsomheten utarbeides det en struktur for distribusjonsnettverket, noe som blant annet avgjør hvilke havner som kan besøkes. Dette er beslutninger som setter rammer og betingelser for senere beslutninger. Modellen er med andre ord av *strategisk* karakter. For å få et grunnlag til å vurdere lønnsomheten er det nødvendig å utarbeide ruter og besøksmønstre for skipene i de ulike tidsperiodene. Det gir modellen også en *taktisk* planleggingshorisont.

3.4.2 Etterspørsel

Deterministisk etterspørsel innebærer at etterspørselen regnes som kjent og forutsigbar. *Stokastisk* etterspørsel medfører til motsetning at modellen håndterer usikkerheten i etterspørselen eksplisitt. For å redusere kompleksiteten gjøres modellen i vår analyse *deterministisk*, hvilket innebærer at all informasjon

regnes som kjent. Det omfatter også etterspørselen. Fremtidens etterspørsel av pellets er usikker, men modellen kan eksempelvis kjøres med ulike inndata for å skissere ulike scenarioer. Det vil teste effekten av usikkerheten. Valget av en deterministisk modell understøttes av at modellen ikke resulterer i noen større investeringer. Både skip og lagerfasiliteter leies inn. Det gjør en stokastisk analyse mindre aktuell.

3.4.3 Flyt

I *arc flow*-modeller benyttes binære variabler for å bestemme om et skip skal seile fra en spesifikk havn til en annen spesifikk havn. Modellen fastsetter buene for hvert enkelt skip, og summen av buene gir rutene. I *path flow*-modeller er rutene derimot predefinerte, og ved hjelp av binære variabler fastsetter modellen hvilken rute som skal tildeles hvilket skip. Problemet som skal betraktes i vår analyse har ikke tidligere blitt undersøkt. Det gjør det ønskelig med en eksplisitt formulering av rutene og deres restriksjoner, slik at karakteristikene ved problemet blir mest mulig synlige. For å bli fortrolig med problemet og dets natur benyttes det derfor en *arc flow*-formulering. Christiansen og Fagerholt (2009) sitt grunnproblem benytter seg også av en slik formulering.

3.4.4 Ruteplanlegging

Ruteplanlegging med *enkeltbesøk* beskriver et nettverk der et depot representerer start og slutt for rutene, og der det må returneres til depotet etter hvert enkelt besøk av andre noder. Ruteplanlegging med *flere besøk* skiller seg fra *enkeltbesøk* ved at flere noder kan besøkes før det returneres til depotet. *Uten depot* betegner et nettverk der det ikke eksisterer noen form for depot. Det har tidligere blitt kommentert at det i vår analyse tillates transport av flere laster samtidig. Det gjør det også naturlig å tillate at flere havner besøkes før skipet returnerer til produksjonshavnen. Det betyr at den maritime ruteplanleggingen kan klassifiseres som *flere besøk*, som er likt med grunnproblemet fra Christiansen og Fagerholt (2009).

4 MODELLUTVIKLING

Det er nå blitt gitt et lite innblikk i pelletsindustrien samt i litteratur og arbeider innenfor verdikjedestyring, ruteplanlegging og lagerstyring. Det gir et grunnlag til å ta fatt på problemstillingen som ble presentert under introduksjonen.

4.1 ANTAKELSER OG AVGRENSNINGER

For å besvare problemstillingen er det ønskelig med en modell som beskriver den virkelige verden i størst mulig grad. En modell som er autentisk med virkeligheten er imidlertid ikke realiserbart, da kompleksiteten vil bli for høy. Utfordringen blir derfor å definere et utvalg antakelser og avgrensninger som gjør modellen håndterbar og løselig, men som likevel gir et realistisk bilde av virkeligheten.

4.1.1 Produkt

Som tidligere kommentert avhenger kvaliteten på pellets av råmaterialet og produksjonsprosessen som ligger bak, men det er likevel det biobrensel med mest homogen kvalitet. Av den grunn anses pellets som et homogent produkt, og det antas i analysen at det finnes kun én type pellets.

4.1.2 Produksjon

Det finnes flere produsenter og importører av pellets i Norge. Biowood Norway skiller seg imidlertid ut som desidert størst med sin forventede produksjonskapasitet på 450 000 tonn pellets per år. Dette kvantum overgår både dagens og antatt fremtidig etterspørsel av pellets i Norge med god margin. Samtidig er produsenten tilrettelagt for maritim distribusjon med sin lokasjon på Averøya på kysten av Møre og Romsdal. Det er da ingen behov for landbasert transport før pelletsen kan lastes på skip. Følgelig avgrenses analysen ved at kun Biowood Norway inkluderes som produsent. Dette er da den eneste havnen der lasting foregår, ved de øvrige havnene foregår kun lossing. Modellen gjøres imidlertid så generell at en vilkårlig produsent eller importør av pellets kan overta rollen til Biowood, forutsatt at aktøren er lokalisert langs kysten.

Produksjonshavnen antas å ha en ubegrenset produksjonskapasitet. Det innebærer at ethvert behov for pellets antas tilgjengelig umiddelbart ved produksjonshavnen, såkalt momentanproduksjon. En slik antakelse kan forsvares med at Biowoods produksjonskapasitet er langt høyere enn den estimerte etterspørselen i Norge. Produksjonskostnadene til pellets er definert slik at de inkluderer råvarekostnader i tillegg til alle kostnader som påløper i produksjonen, deriblant kostnader for lagring hos produsenten. Produksjonskostnadene og markedsprisen til pellets antas som konstant.

4.1.3 Etterspørsel

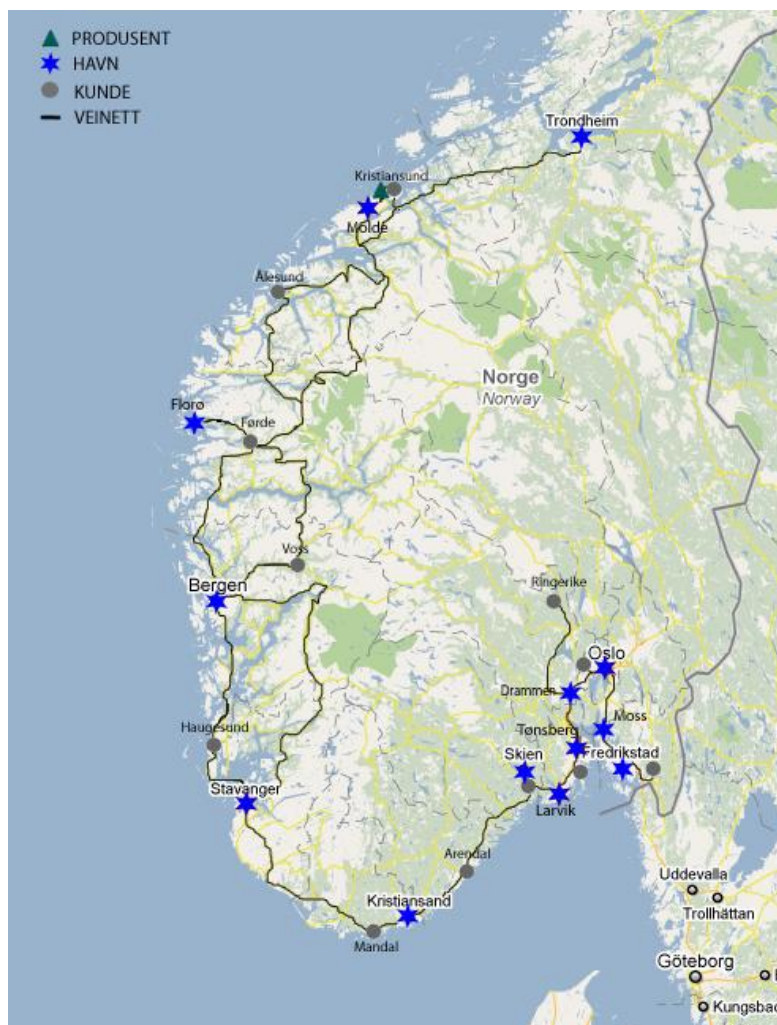
Det opereres med en antakelse om at etterspørselen etter pellets er kjent og at den er konstant innenfor en sesong som tilsvarer et 12 ukers intervall. I analysen foretas en aggregering av etterspørselen til ulike kunder. Kunder som befinner seg i samme geografiske område vil bli slått sammen og sett på som én enkel kundegruppe. Etterspørselen til denne kundegruppen er lik summen av

etterspørselen til de inngående enkeltindividene, mens lokasjonen blir et slags tyngdepunkt av lokasjonene som inngår. Antall enkeltkunder av pellets er stort. Uten en aggregering ville det ha blitt en svært arbeidskrevende prosess å innhente informasjon om etterspørsel og lokalisering til hver enkelt kunde. Det antas at aggregeringen ikke reduserer nøyaktigheten på analysen av betydelig karakter. Videre antas det at en havn kun kan betjene de kundegruppene som er lokalisert i en viss geografisk nærhet til havnen og at kundegruppene ikke kan videreselge pelletsen til øvrige kundegrupper.

For hver kundegruppe skilles det mellom etterspørsel som er til oppvarming av bygninger og etterspørsel som er til prosessvarme i industrien. Det antas at etterspørselen tilknyttet oppvarming ikke kontraktfestes. Det gjør det valgfritt hvor stor andel av en kundegruppens etterspørsel tilknyttet oppvarming som imøtekommes til enhver tid. Videre antas det at etterspørselen tilknyttet prosessvarme kontraktfestes for ett år. Det betyr at dersom det besluttes å betjene den industrielle etterspørselen til en kundegruppe, må all etterspørsel til denne industrigruppen imøtekommes til enhver tid i løpet av året. Bakgrunnen for denne antakelsen er de tidligere nevnte konsekvensene industribedrifter opplever ved mangel på brensel.

4.1.4 Geografi

Norge er et langstrakt land med relativt liten industri- og befolkningstetthet i de nordlige områdene. Sør-Norge kan skilte med langt mer industri og høyere befolkningstall. Forskjellen på nord og sør gir også sitt utslag på etterspørselen av pellets. Nettopp det gjør det mer sannsynlig at et maritimt distribusjonsnettverk er lønnsomt i sørlige deler av Norge enn i de nordlige delene. Med det som begrunnelse avgrenses lønnsomhetsanalysen til den delen av norskekysten som befinner seg sør for Trondheim. Den maritime transporten avgrenses altså til kyststrekningen mellom Trondheim og Fredrikstad. Figur 7 viser et kart over strekningen der aktuelle industrihavner, et sett med kunder, samt produsenten er markert. I tillegg er veinettet mellom havner og de kunder de kan betjene tegnet inn. For detaljer rundt valg av havner og kunder henvises det til Appendiks A1.



Figur 7: Kart over norskekysten sør for Trondheim

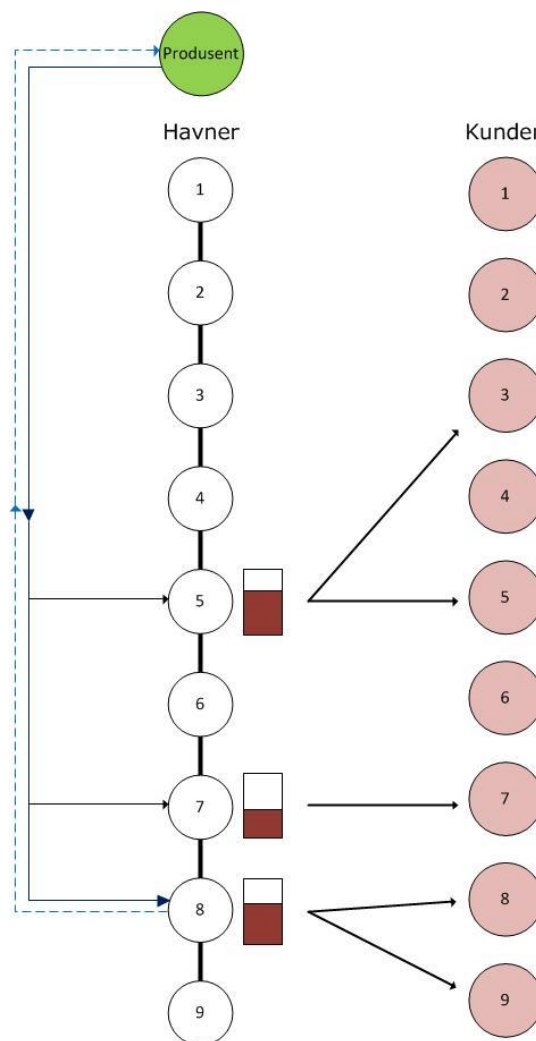
4.1.5 Tid

Modellen har et tidsperspektiv på 48 uker, noe som er ment å tilsvare ett år. En analyse på ett år er tilstrekkelig ettersom distribusjonsnettverket ikke krever noen større investeringer. Både skip og lagerfasiliteter leies. Det er for øvrig besluttet å diskretisere tidsaspektet. Det innebærer at tidshorizonten deles inn i et antall tidsperioder. Modellen gir da resultater som angir beslutning og status for hver enkelt tidsperiode, uten å skille på hva som foregår til hvilken tid innenfor en gitt tidsperiode. Dette reduserer detaljnivået på modellen, men det reduserer samtidig kompleksiteten betydelig. Tanken er at diskretiseringen gir et tilstrekkelig godt bilde av virkeligheten.

4.1.6 Seilemønster

Som tidligere kommentert ligger havnene langs norskekysten tilnærmet langs den samme buen, hvilket innebærer at et skip på vei mot en spesifikk havn vil passere alle havner som har en kortere avstand til produksjonshavnen. Dette illustreres i Figur 8. Den av havnene som besøkes og har størst avstand til produksjonshavnen, omtales som den siste havnen. Et skip antas å seile direkte

fra produksjonshavnen til det befinner seg utenfor den siste havnen som besøkes på ruten, for så å seile tilbake igjen til produksjonshavnen. Dette defineres som hovedruten, og inkluderer ikke selve innfarten til havnene. Besøk av en havn registreres som et midlertidig avvik fra hovedruten, og de ekstra transportkostnadene som følge av avviket inngår i havnens faste kostnader. Det gjelder også besøket av den siste havnen. Om en havn besøkes på utfarten fra produksjonshavnen eller på tilbakeveien, har ingen påvirkning på modellen. I virkeligheten vil det imidlertid lønne seg å losse på utfarten, for så å seile tilbake med tomt skip og da forbruke mindre drivstoff. Seilemønsteret skiller seg fra tradisjonell *arc flow* ved at det konstrueres buer mellom hovedruten og havnene, og ikke direkte mellom havnene. Hovedruten knytter havnene indirekte sammen. Modellen er så vidt oss bekjent nyskapende i måten den bruker den siste havnen som på en seilerute besøkes til å konstruere en hovedrute. En slik formulering bidrar til at den geografiske strukturen langs norskekysten utnyttes godt.



Figur 8: Illustrasjon av forenklet seilerute

4.1.7 Havnekostnader

Havnekostnader er definert slik at de består både av faste kostnader som avhenger av havn og skip, samt variable kostnader per tonn pellets losset som kun avhenger av havn. De faste kostnadene inkluderer skipets transportkostnader fra hovedruten inn til havnen og tilbake igjen til hovedruten, samt anløps- og kaiavgift. De variable kostnadene inneholder kostnader knyttet til lossing av varer.

4.1.8 Skips- og seilekostnader

Om skipene som benyttes leies inn i de perioder det er behov, eller om de eies og leies ut i de perioder det ikke er behov, betyr ingenting for modellen. Et skip som leies antas leid for en 3-månedersperiode, med start i begynnelsen av én av de fire tidligere omtalte sesongene. Kostnadene ved å eie eller leie et skip antas som konstant og kun avhengig av størrelsen på skipet. Kostnadene inkluderer kapitalkostnader, samt kostnader til mannskap og vedlikehold.

Seilekostnader angis per skip, og antas som avhengig av distanse mellom produksjonshavn og siste havn som besøkes. Hastigheten til skipene, drivstofforbruk og pris på drivstoff antas som konstant. Et skip må returnere til produksjonshavnen etter endt rute, og det antas da at skipet er tomt for varer. Det antas videre at transportkostnadene for utfarten er lik kostnadene for transport på tilbakeveien.

4.1.9 Landbaserte transportkostnader

Transportkostnader ved landbasert transport angis per tonn pellets og antas som avhengig av distanse mellom havn og kunde, der hastigheten til lastebilene antas som konstant. Drivstofforbruk og pris på drivstoff antas også som konstant. Det antas at lastebilene kun forsyner én kunde før de returnerer til sin respektive havn. På tilbakereisen antas det at lastebilene er tomme for varer. Det antas også her at transportkostnadene for utfarten er lik kostnadene for transport på tilbakeveien.

Det eksisterer ingen flåte av lastebiler, lastebilene leies inn ved behov. Tilgangen til lastebiler antas som ubegrenset. Kun den andelen av en lastebil som fylles med pellets antas å utgjøre kostnader, eventuell ledig kapasitet antas fylt med øvrige varer som ikke inngår i verdikjeden. Det fører til at antall lastebiler som benyttes mellom en havn og en kunde ikke nødvendigvis er heltallig. I tilfeller der det leveres fra et havnelager til en kunde lokalisert i samme by som havnen, inngår de landbaserte transportkostnadene i lagerkostnadene.

4.1.10 Lagring og last

Hver enkelt havn antas som utstyrt med et lager som potensielt kan benyttes til lagring av pellets. Lageret har et fastsatt maksimumsnivå. Dersom det besluttes å benytte et gitt lager, antas det at avtalen kontraktfestes for et helt år. Ved begynnelsen av den første tidsperioden antas lagerbeholdningen ved hver enkelt havn til å være lik en spesifikk verdi. Verdien bestemmes ut ifra etterspørselen til de kundene havnen kan betjene. Kundene har ingen lager, de antas å forbruke

den leverte mengden pellets umiddelbart. Flåten av skip antas som heterogen, hvilket innebærer at ulike skip kan ha ulike lastekapasiteter. En vesentlig faktor ved lagring og last er volum, og vi antar derfor en konstant massetetthet på pellets.

4.2 MODELLSTRUKTUR

Før den matematiske formuleringen presenteres vil den grunnleggende strukturen i modellen bli beskrevet.

4.2.1 Mengder og indekser

Modellen definerer en mengde I som inneholder alle havner i . Produksjonshavnen inngår ikke i denne mengden. Havnene ligger tilnærmet langs den samme buen langs norskekysten, hvilket innebærer at et skip på vei mot en spesifikk havn vil passere alle havner som har en kortere avstand til produksjonshavnen. I er ordnet slik at havnene er indeksert i den rekkefølgen de er lokalisert langs norskekysten. Det betyr at en gitt havn har høyere indeksverdi enn alle de havner som har en kortere avstand til produksjonshavnen. Et unntak er Trondheim som er eneste havn lokalisert nord for produsenten. For å løse dette settes sjøbasert avstand mellom produsent og Trondheim lik null, og følgelig blir de sjøbaserte transportkostnadene mellom de to havnene lik null. Transport mellom produsenten og Trondheim regnes som et midlertidig avvik fra hovedruten, og transportkostnadene inngår i Trondheims faste havnekostnader. Trondheim er av den grunn indeksert som nummer én. Et annet unntak fra tilnærmingen om lokasjon langs en bue er havnene i Oslo-regionen: Tønsberg, Drammen, Oslo, Moss og Fredrikstad. Disse havnene er spredt nærmest i en slags sirkel. Det håndteres ved at det opprettes et fiktivt punkt i Oslofjorden som det beregnes sjøbasert avstand til. Dette defineres som den sjøbaserte distansen fra produsenten til samtlige av de fem havnene. Den resterende distansen fra det fiktive punktet og inn til de aktuelle havnene inngår da i de faste havnekostnadene til de respektive havnene.

Videre defineres det en mengde K som inneholder alle kundegrupper k , og en delmengde K_i for hver havn. Delmengden inneholder alle de kundegrupper som havn i potensielt kan betjene. Om en kundegruppe inngår i en havns delmengde avgjøres av den geografiske nærheten kundegruppen har til havnen. Det sørges for at enhver kundegruppe kan betjenes av minimum én havn, samt at enhver havn kan betjene minimum én kundegruppe. Produsenten betegnes med o og tildeles en delmengde K_o som inneholder alle kundegrupper produsenten kan transportere direkte til, uten å gå via maritim transport. I_k er en delmengde bestående av alle havner som kan betjene kundegruppe k . Dersom produsenten o kan betjene kundegruppen k , inngår også o i I_k .

Mengden V inneholder alle skip v som potensielt kan benyttes. Med en variabel flåtestørrelse er det opp til modellen å bestemme hvilke skip som skal benyttes til ulike tider. Det er viktig at flåten som det leies inn skip fra er stor nok til ikke å legge noen begrensninger på løsningen.

Modellen inneholder en mengde P som inneholder alle sesonger p . Med sesong menes en 3-månedersperiode som tilsvarer enten høst, vinter, vår eller sommer. Det defineres i tillegg en mengde T som inneholder alle tidsperioder t . Én tidsperiode utgjør én uke. Delmengden T_p inneholder alle de tidsperioder som inngår i sesong p .

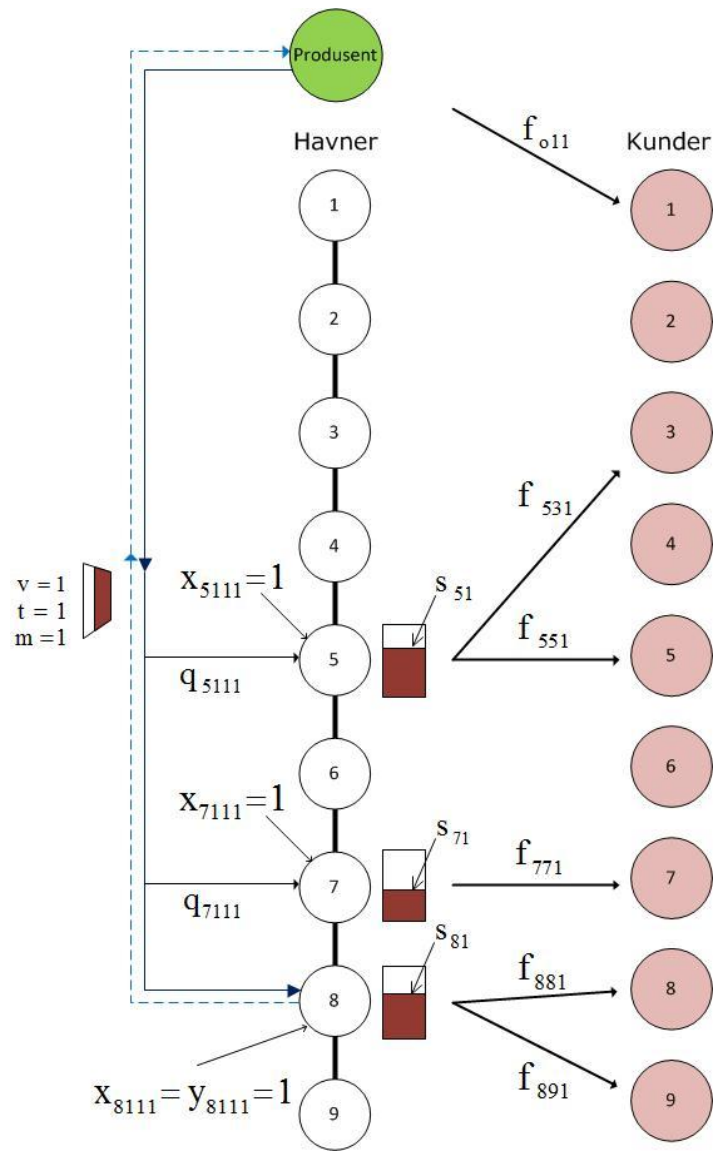
Det defineres en mengde M som inneholder alle nummer m på seileruter. Denne indeksen er nødvendig for å skille fra hverandre ulike ruter som seiles av samme skip i samme tidsperiode. Delmengden M_i inneholder alle nummer på seileruter som tillates i havn i . For å illustrere kan vi bruke havner lokalisert langt unna produksjonshavnen. Hit rekker man muligens kun å seile én rute i løpet av en tidsperiode. For en slik havn vil delmengden M_i kun inneholde verdien 1. Til havner lokalisert nærmere produksjonshavnen kan muligens to ruter seiles i løpet av en tidsperiode. Da vil delmengden M_i inneholde verdiene 1 og 2. Motstykket til M_i er I_m som er en delmengde bestående av alle havner som tillater m seileruter i løpet av en tidsperiode.

4.2.2 Variabler

Modellen inneholder binærvariabler x_{ivtm} som angir om en havn i besøkes av skip v i tidsperiode t på en seilerute m . Disse variablene sørger blant annet for at faste havnekostnader påløper ved besøk av havn. Videre opereres det med binærvariabler y_{ivtm} som angir om en havn i er siste havn som besøkes av skip v i tidsperiode t på seilerute m . Disse variablene konstruerer hovedrutene til de ulike skipene i de ulike tidsperiodene og gir seilekostnadene. En forutsetning for at variabelen skal tjene sitt formål er at havnene er indeksert slik tidligere beskrevet, det vil si at en gitt havn har høyere indeksverdi enn alle de havner som har kortere avstand til produksjonshavnen.

Det defineres binærvariable u_{vp} som angir om et skip v benyttes i sesong p . Kostnader ved å leie/eie skip er avhengig av denne variabelen. Binærvariabler w_i angir om et lager benyttes ved havn i . Disse variablene sørger blant annet for at faste lagerkostnader påløper ved bruk av lager. Det opereres med binærvariabler b_k som angir om kundegruppe k sitt industrielle behov for prosessvarme blir betjent. Variabelen har sitt utspring i at etterspørselen til industrikunder kontraktfestes. Enten så betjenes all industrietterspørsel til en kundegruppe eller så betjenes ingenting av den.

Modellen inneholder i tillegg kontinuerlige variabler q_{ivtm} som angir antall tonn pellets havn i får levert av skip v i tidsperiode t på seilerute m , f_{ikt} som angir antall tonn pellets havn i leverer til kundegruppe k i tidsperiode t , samt s_{it} som angir antall tonn pellets lagret ved havn i i tidsperiode t . Variablene f_{okt} angir antall tonn pellets transportert direkte fra produsent til kundegruppe k i tidsperiode t . Målfunksjonen betegnes med z og uttrykker verdikjedens totale profitt.



Figur 9: Illustrasjon av seilerute med variabler og indekser

4.3 DEKLARASJONER

Den matematiske formuleringen beskrives først ved å deklare indekser, mengder, konstanter og variabler.

4.3.1 Indekser

i, j :	Havn
k :	Kundegruppe
v :	Skip
t :	Tidsperiode
m :	Nummer på seilerute
p :	Sesong
o :	Produsent

4.3.2 Mengder

I :	Mengde av alle havner i
K :	Mengde av alle kundegrupper k
$K_i \subseteq K$:	Indeksert mengde av alle kundegrupper k som kan betjenes av havn i
$I_k \subseteq I$:	Indeksert mengde av alle havner i som kan betjene kundegruppe k
V :	Mengde av alle skip v
P :	Mengde av alle sesonger p
T :	Mengde av alle tidsperioder t
$T_p \subseteq T$:	Indeksert mengde av alle tidsperioder t som tilhører sesong p
M :	Mengde av alle nummer m på seileruter
$M_i \subseteq M$:	Indeksert mengde av alle nummer m på seileruter som tillates i havn i
$I_m \subseteq I$:	Indeksert mengde av alle havner i som tillater m seileruter i løpet av en tidsperiode

4.3.3 Konstanter

R :	Salgspris per tonn pellets
C^P :	Produksjonskostnader per tonn pellets
C_{iv}^H :	Faste kostnader ved avvik fra hovedruten og besøk av havn i av skip v
C_i^V :	Variable kostnader per tonn pellets losset ved havn i
C_{iv}^S :	Kostnader ved sjøbasert transport av skip v fra produksjonshavnen til havn i og tilbake til produksjonshavnen, angir hovedrutens transportkostnader
C_{ik}^L :	Kostnader per tonn pellets transportert landbasert mellom havn i og kundegruppe k
C_i^W :	Faste kostnader ved benyttelse av lager i havn i
D_{kt}^O :	Antall tonn pellets etterspurt av kundegruppe k til oppvarmingsformål i tidsperiode t
D_k^I :	Antall tonn pellets etterspurt av kundegruppe k per tidsperiode til industrielle formål
V_v^{KAP} :	Antall tonn pellets som er maksimum lastekapasitet hos skip v
V_v^{KOST} :	Fast kostnad per sesong skip v benyttes
\underline{S}_i :	Antall tonn pellets som er minimum lagernivå ved havn i
\bar{S}_i :	Antall tonn pellets som er maksimum lagernivå ved havn i
S_i^S :	Lagerbeholdning ved slutten av tidsperiode $t = 0$ for havn i
S_i^E :	Minimum lagerbeholdning ved slutten av tidsperiode $t = T$ for havn i
T_i^S :	Tiden det tar å seile til havnen i og tilbake til produsenten
T_i^H :	Tiden et skip bruker ved besøk av havn i
T^{ANT} :	Antall dager i én tidsperiode
M_i^{ANT} :	Antall seileruter som maksimalt tillates i løpet av en tidsperiode i havn i

4.3.4 Variabler

x_{ivtm} : Er lik 1 hvis havn i besøkes av skip v i tidsperiode t på seilerute nummer m , er ellers lik 0

y_{ivtm} : Er lik 1 hvis havn i er den siste som besøkes av skip v i tidsperiode t på seilerute nummer m , er ellers lik 0

u_{vp} : Er lik 1 hvis skip v benyttes i sesong p , er ellers lik 0

w_i : Er lik 1 hvis det benyttes lager i havn i , er ellers lik 0

b_k : Er lik 1 hvis industribehov ved kundegruppe k dekkes, er ellers lik 0

q_{ivtm} : Antall tonn pellets levert til havn i av skip v i tidsperiode t på seilerute nummer m

f_{ikt} : Antall tonn pellets levert fra havn i til kundegruppe k i tidsperiode t

f_{okt} : Antall tonn pellets levert fra produsent til kundegruppe k i tidsperiode t

s_{it} : Antall tonn pellets lagret hos havn i ved slutten av tidsperiode t

z : Verdikjedens totale profitt

4.4 GENERELL MATEMATISK FORMULERING

Den generelle matematiske formuleringen vil nå bli beskrevet stegvis med målfunksjon og tilhørende restriksjoner. For den matematiske formuleringen på kompakt form henvises det til Appendiks A2. Inngående elementer i formuleringen presenteres i kursiv skrift. For øvrig defineres indekser med små bokstaver, mengder med store bokstaver i fet skrift, konstanter med store bokstaver, mens variabler defineres med små bokstaver. Restriksjonene uttrykkes med variabler på venstre side av (u)likhetstegnet, mens konstanter plasseres på høyre side. For å oppnå økt leselighet uttrykkes hvert inntekts-/kostnadsledd i målfunksjonen separabelt, på tross av at enkelte ledd inkluderer sammenfallende variabler.

4.4.1 Målfunksjon

Max $z =$

$$\sum_{i \in IU\{o\}} \sum_{k \in K_i} \sum_{t \in T} R \cdot f_{ikt} \quad \text{Ledd: 1}$$

$$- \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M_i} C^P \cdot q_{ivtm} - \sum_{k \in K_o} \sum_{t \in T} C^P \cdot f_{okt} \quad \text{Ledd: 2 og 3}$$

$$- \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M_i} C_{iv}^S \cdot y_{ivtm} \quad \text{Ledd: 4}$$

$$- \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M_i} C_{iv}^H \cdot x_{ivtm} \quad \text{Ledd: 5}$$

$$- \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M_i} C_i^V \cdot q_{ivtm} \quad \text{Ledd: 6}$$

$$- \sum_{i \in IU\{o\}} \sum_{k \in K_i} \sum_{t \in T} C_{ik}^L \cdot f_{ikt} \quad \text{Ledd: 7}$$

$$- \sum_{i \in I} C_i^W \cdot w_i \quad \text{Ledd: 8}$$

$$- \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} V_v^{KOST} \cdot u_{vp} \quad \text{Ledd: 9}$$

Målfunksjonen uttrykker den totale profitten i verdikjeden og skal maksimeres. Profitten uttrykkes ved salgsinntekter minus kostnader som påløper under produksjon, leie av skip, seiling fra produksjonshavn til havnelager, besøk av og lossing i havner, bruk av havnelager, samt landbasert transport fra havnelager til sluttkunde. At profitten skal maksimeres innebærer at ikke all etterspørsel

nødvendigvis dekkes, kun den etterspørselen med positivt profittbidrag imøtekommes.

Ledd 1 i målfunksjonen uttrykker de totale salgsinntektene. Det gjøres ved at salgspris per tonn pellets multipliseres med antall tonn pellets levert til sluttkunde. Leveransene omfatter både kunder med oppvarmingsbehov og kunder med industrielle behov. Leveranser fra alle havner til deres respektive kundegrupper, samt leveranser fra produsent direkte til sine kundegrupper, summeres opp for alle tidsperioder.

Ledd 2 og 3 representerer de totale produksjonskostnadene. Ledd 2 gir produksjonskostnad per tonn pellets multiplisert med antall tonn pellets lastet på skip. Leveranser til alle havner på alle ruter med alle skip i alle tidsperioder summeres opp. Leveransene som går direkte fra produsent til sluttkunde lastes ikke på noe skip, slik at produksjonskostnadene for denne mengden pellets må beregnes separat. Det gjøres i ledd 3 av målfunksjonen som multipliserer produksjonskostnad per tonn pellets med antall tonn pellets fraktet landbasert fra produsent til sluttkunde. Leveranser til alle aktuelle kundegrupper i alle tidsperioder summeres opp.

Målfunksjonens ledd 4 gir de totale seilekostnadene for hovedrutene. Hovedruten har tidligere blitt definert som strekningen fra produksjonshavnen til siste havn som besøkes og tilbake igjen til produksjonshavnen. Multiplikasjon med en binærvariabel gjør at kostnaden kun inntreffer dersom den gitte havnen faktisk er den siste havnen som besøkes. Det summeres over alle havner fordi hvilken som helst havn kan være den siste som besøkes. Alle hovedruter til alle skip i alle tidsperioder summeres opp.

Ledd 5 uttrykker de totale faste kostnadene ved besøk av havner. Faste kostnader ved besøk av en gitt havn med et gitt skip multipliseres med en binærvariabel. Det gjør at kostnaden kun inntreffer dersom det gitte skipet faktisk besøker den gitte havnen i tidsperioden. Seilekostnader fra hovedruten og inn til havnen, og tilbake igjen til hovedruten, inngår i de faste havnekostnadene. Besøk av alle havner med alle skip på alle ruter i alle tidsperioder summeres opp.

I ledd 6 uttrykkes de totale variable kostnadene ved besøk av havner. Variable kostnader per tonn pellets losset i en gitt havn multipliseres med antall tonn pellets losset i havnen. Leveranser til alle havner med alle skip på alle ruter i alle tidsperioder summeres opp.

Ledd 7 angir de totale landbaserte transportkostnadene. Kostnad per tonn pellets transportert fra en gitt havn til en gitt kundegruppe multipliseres med antall tonn pellets transportert mellom den gitte havnen og den gitte kundegruppen i tidsperioden. Leveranser fra alle havner til deres respektive kundegrupper, samt leveranser fra produsent direkte til kundegrupper, i alle tidsperioder summeres opp.

Ledd 8 av målfunksjonen uttrykker de totale lagerkostnadene. Faste kostnader ved bruk av lager i en gitt havn multipliseres med en binærvariabel. Det gjør at kostnaden kun inntreffer dersom det faktisk benyttes et lager i den gitte havnen. Lagerhold ved alle havner summeres opp.

Ledd 9 er siste ledd i målfunksjonen og angir de totale faste skipskostnadene. Fast kostnad ved bruk av et skip i en sesong multipliseres med en binærvariabel som angir om skipet blir benyttet i den aktuelle sesongen. Det summeres over alle skip og alle sesonger.

4.4.2 Restriksjoner for siste havn

$$\sum_{i \in I_m} y_{ivtm} \leq 1 \quad \forall v \in V, t \in T, m \in M \quad (1)$$

Som tidligere kommentert defineres det en hovedrute som strekker seg fra produksjonshavnen til siste havn som besøkes og tilbake igjen til produksjonshavnen. (1) sikrer at det maksimalt er én havn som besøkes sist for et skip på en rute i en tidsperiode. Ulikhetstegnet gjør at et skip ikke tvinges til å seile noen hovedrute i en gitt tidsperiode dersom det ikke viser seg lønnsomt.

4.4.3 Restriksjoner for besøksrekkefølge

$$x_{ivtm} - \sum_{j \in I_m, j \geq i} y_{jvtm} \leq 0 \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T, m \in M_i \quad (2)$$

Med unntak av tidligere nevnte Trondheim og havnene i Oslo-regionen er havnene indeksert slik at en gitt havn har høyere indeksverdi enn alle de havner som har kortere avstand til produksjonshavnen. Det er en forutsetning for at (2) skal tjene sitt formål. Skipene har mulighet til å besøke de havner som er lokalisert mellom produksjonshavnen og siste havn som besøkes. (2) sørger for at et skip i en tidsperiode ikke besøker en havn etter at siste havn er besøkt.

4.4.4 Restriksjoner for skipslast

$$\sum_{i \in I_m} q_{ivtm} - V_v^{KAP} \cdot u_{vp} \leq 0 \quad \forall v \in V, p \in P, t \in T_p, m \in M \quad (3)$$

Den totale mengden et skip i en tidsperiode laster i produksjonshavnen tilsvarer den totale mengden skipet lossar i de ulike havnelagrene i den samme tidsperioden. (3) forhindrer dermed at et skip laster eller lossar mer pellets enn sin kapasitet. Ved at kapasiteten multipliseres med en binærvariabel sikres det at et skip må være i bruk for at det kan laste eller losse noe som helst.

4.4.5 Restriksjoner for havneleveranse

$$q_{ivtm} - \text{Min}\{\bar{S}_i - \underline{S}_i, V_v^{KAP}\} \cdot x_{ivtm} \leq 0 \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T, m \in M_i \quad (4)$$

(4) sikrer at et skip på en rute i en tidsperiode ikke leverer varer til en havn som ikke er besøkt. Restriksjonen er i realiteten en *Big M*-formulering. Det betyr at dersom havnen besøkes, så vil ikke restriksjonen være bindende eller påvirke løsningen. Verdien M søkes minst mulig for å gjøre problemet mest mulig kompakt.

4.4.6 Restriksjoner for øvre kundeleveranse

$$\sum_{i \in I_k} f_{ikt} - D_k^I \cdot b_k \leq D_{kt}^O \quad \forall k \in K, t \in T \quad (5)$$

(5) er nødvendig for å hindre at den totale mengden pellets som leveres fra havnelagre til en kundegruppe i en tidsperiode overskrider etterspørselen til kundegruppen i den samme tidsperioden. Det skilles mellom etterspørsel til henholdsvis oppvarmingsformål og industrielle formål. Mulighet til å dekke etterspørselen til en industriell kundegruppe forutsetter at det besluttes å betjene denne industrigruppen.

4.4.7 Restriksjoner for nedre kundeleveranse

$$\sum_{i \in I_k} f_{ikt} - D_k^I \cdot b_k \geq 0 \quad \forall k \in K, t \in T \quad (6)$$

Dersom det besluttes å betjene etterspørselen til en industrigruppe vil det fungere som en lovnad om å dekke all etterspørsel til denne gruppen til enhver tid. (6) uttrykker dette gjennom en nedre grense for kundeleveranse. Dersom det besluttes å ikke betjene en industrigruppe vil restriksjonen være redundant.

4.4.8 Restriksjoner for besøk av havn

$$\sum_{m \in M_i} x_{ivtm} - M^{ANT} \cdot w_i \leq 0 \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T \quad (7)$$

(7) har sin hensikt ved at et skip i en tidsperiode ikke tillates å besøke en havn som ikke har et havnelager. Restriksjonen er i realiteten en *Big M*-formulering. Det betyr at dersom havnen tildeles lager så vil ikke restriksjonen være bindende eller påvirke løsningen. Verdien M søkes minst mulig for å gjøre problemet mest mulig kompakt.

4.4.9 Restriksjoner for lagerbalanse

$$s_{it} + \sum_{k \in K_i} f_{ikt} - \sum_{v \in V} \sum_{m \in M_i} q_{ivtm} - s_{i(t-1)} = 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (8)$$

(8) sikrer at lagerbeholdningen ved hver enkelt havn oppdateres mellom de ulike tidsperiodene. En havns lagerbeholdning i slutten av en tidsperiode er lik havnens lagerbeholdning i slutten av foregående periode, pluss det som i mellomtiden er blitt levert til havnen fra ulike skip på ulike ruter, minus det som havnen har levert fra seg til ulike kunder. Det muliggjør at pellets kan mottas i en havn i en tidsperiode og sendes direkte videre til kunde uten at pelletsen plasseres på lager. (8) er gyldig også for tidsperiode 1 ved at det opprettes en variabel for lagerbeholdning i tidsperiode 0 som angir startlager.

4.4.10 Restriksjoner for tidsbruk

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} T_i^S \cdot y_{ivtm} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} T_i^H \cdot x_{ivtm} \leq T^{ANT} \quad \forall v \in V, t \in T \quad (9)$$

(9) sikrer at rutene et skip seiler i en tidsperiode ikke krever mer tid enn hva tidsperioden tillater. Det tas hensyn til både hovedrute og besøk av havner.

4.4.11 Restriksjoner for startlager

$$s_{i0} - S_i^S \cdot w_i = 0 \quad \forall i \in I \quad (10)$$

(10) fastsetter den initielle lagerbeholdningen ved alle havner. Lagerbeholdningen i den kunstige tidsperioden 0 settes til en konstant verdi forutsatt at havnen tildeles lager. Denne konstanten er dimensjonert ut ifra den etterspørselen havnen potensielt kan dekke.

4.4.12 Restriksjoner for sluttlager

$$s_{iT} - S_i^E \cdot w_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (11)$$

Modellen tar ikke hensyn til at distribusjonen i den virkelige verden fortsetter også etter at antall tidsperioder er utløpt. Det kan føre til at lagerbeholdningen ved de ulike havnene presses ned til et minimum i siste tidsperiode, fordi det gir lavere kostnader. Det gir imidlertid ugunstige vilkår for videre distribusjon. (11) sørger for at lagerbeholdningen i en havn ved slutten av siste tidsperiode er større enn eller lik en spesifisert verdi, forutsatt at havnen tildeles lager. Hensikten med en slik restriksjon er å forhindre uønskede sluttbetingelser.

Ifølge målfunksjonen mottas salgsinntekter ved leveranse fra havnelager til sluttkunde, mens produksjonskostnader oppstår ved leveranse fra produksjonshavn til havnelager. Den initielle lagerbeholdningen ved de ulike havnelagrene gjør det mulig at mengden levert fra havnelagrene til sluttkundene overstiger mengden levert fra produksjonshavn til havnelagrene. I et slikt tilfelle vil det mottas salgsinntekter for produkter det ikke er beregnet produksjonskostnader for, noe som vil gi et feilaktig bilde. (11) kan imidlertid forhindre dette ved at det kreves at lagerbeholdningen ved slutten av siste tidsperiode er større enn eller lik en verdi som tilsvarer eller overgår den initielle lagerbeholdningen. Levert mengde fra havnelagrene til sluttkundene vil da aldri overstige mengde levert fra produksjonshavn til havnelagrene.

4.4.13 Restriksjoner for lagerbeholdning

$$s_{it} - \underline{S}_i \cdot w_i \geq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (12)$$

$$s_{it} - \bar{S}_i \cdot w_i \leq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (13)$$

(12) sikrer at lagerbeholdningen i en havn i en tidsperiode er større enn et definert sikkerhetslager. I en deterministisk analyse som dette regnes etterspørselen som kjent, og det er følgelig ikke noe behov for et sikkerhetslager.

(13) sikrer at lagerbeholdningen i en havn i en tidsperiode er mindre enn lagerets maksimale kapasitet. Lagerbeholdningen settes til 0 dersom den gitte havnen ikke tildeles lager.

4.4.14 Ikke-negativitetskrav

$$q_{ivtm} \geq 0 \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T, m \in M_i \quad (14)$$

$$f_{ikt} \geq 0 \quad \forall i \in I \cup \{0\}, k \in K, t \in T \quad (15)$$

$$s_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \cup \{0\} \quad (16)$$

(14), (15) og (16) sørger for at de kontinuerlige variablene ikke tildeles negative verdier.

4.4.15 Binærkrav

$$x_{ivtm}, y_{ivtm} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T, m \in M_i \quad (17)$$

$$u_{vp} \in \{0,1\} \quad \forall v \in V, p \in P \quad (18)$$

$$w_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (19)$$

$$b_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K \quad (20)$$

(17), (18), (19) og (20) sørger for at binærvariablene tildeles verdien 0 eller 1.

5 TEKNISK ANALYSE

Den generelle matematiske modellen, eller grunnmodellen som den senere vil bli omtalt som, er blitt implementert i kommersiell programvare for optimering. For kildekode henvises det til Appendiks A3. Modellen er blitt benyttet på et case bestående av problemstillingens mest realistiske inndata. Vi vil nå diskutere de modelltekniske resultatene til grunnmodellen, deretter vurderes symmetri i modellen og hvordan denne eventuelt kan fjernes. Så betraktes den lineære relaxeringen til grunnmodellen og hvordan denne kan styrkes. Det er vektlagt at eventuelle restriksjoner som innføres for å effektivisere modellkjøringen ikke endrer selve problemet.

5.1 CASEBESKRIVELSE

I analysen inngår det totalt 13 industrihavner i tillegg til produksjonshavnen. Dette er et utvalg av de største industrihavnene på kyststrekningen Trondheim – Fredrikstad. Det er blitt valgt havner som sørger for at samtlige deler av strekningen er representert. Et skip kan seile opptil to ruter per tidsperiode. Det forutsetter imidlertid at seiletidene og tiden brukt i havnene ikke overskrider tidsperioden. En tidsperiode er definert som én uke, og analysen inneholder i alt 48 uker. Det er ment å tilsvare ett år som er oppdelt i fire ulike sesonger.

Antallet kunder i analysen er 25. Dette er resultatet av en aggregering av et mangfold mindre kunder. I analysen inneholder samtlige kystfylker mellom Trondheim og Fredrikstad minimum én kunde, og kundene er lokalisert i større byer og tettsteder. De ulike industrihavnene og kundene ble tidligere presentert i Figur 7. En industrihavn tillates kun å betjene de kundene som er lokalisert innenfor en rimelig geografisk avstand. Det er sikret at alle havner kan betjene minimum én kunde, og tilsvarende at alle kunder kan betjenes av minimum én havn.

Som tidligere kommentert er flåtestørrelsen variabel, slik at modellen velger ut de skipene som skal benyttes. Det må imidlertid defineres en flåte som skipene kan velges fra. I vår analyse består denne flåten av tre skip. To av skipene har lastekapasitet 1500 tonn, mens det resterende skipet har kapasitet 3000 tonn. Antall skip og deres størrelse er valgt på bakgrunn av den forventede etterspørselen langs norskekysten. Den forventede etterspørselen i det aktuelle området er 160 000 tonn pellets per år, der 112 000 tonn er knyttet til oppvarming av bygg, mens de resterende 48 000 er tilknyttet prosessvarme i industrien. Tallene er basert på dagens etterspørsel, økonomisk støtte gitt til pågående prosjekter som involverer pellets, samt forventet konvertering av lett-olje i industrien. Etterspørselen til oppvarming av bygg er fordelt slik at 25 % oppstår om høsten, 50 % om vinteren, 25 % om våren og ingenting om sommeren. Etterspørselen til prosessvarme i industrien er fordelt jevnt utover året, slik at 25 % faller innenfor hver av sesongene høst, vinter, vår og sommer. Salgspris er 1500 NOK per tonn pellets, mens produksjonskostnad er 1200 NOK per tonn.

For detaljert beskrivelse av samtlige av casets parametere, samt gjennomførelsen av datainnsamlingen, henvises det til Appendiks A1.

5.2 PROGRAMVARE OG MASKINTEKNISK YTELSE

Det finnes mange alternative programvarer for løsning av problemet, og metoder og løsningstider kan variere mellom de ulike programvarene. Spesifikasjonene til maskinvaren som benyttes påvirker også. I vårt tilfelle er programvaren som er blitt brukt *XPRESS-IVE v1.20.12* med *XPRESS-Optimizer 64 bit v19.00.00*. Valget av programvare skyldes først og fremst tilgjengelighet, erfaring fra tidligere, samt et velegnet grafisk brukergrensesnitt. Kildekoden til modellen er skrevet i *XPRESS-Mosel 64 bit v2.4.0* som er standard programmeringsspråk for *XPRESS-MP*. For detaljer henvises det til *FICO Xpress-Optimizer Reference Manual (Release 20.00)*. Standardinnstillinger og fullversjon av *XPRESS-MP* er blitt benyttet.

Programvaren er blitt kjørt på ett av NTNU sine cluster, *Solstorm*. Maskinvaren på clusteret er fordelt i fire racks: 0, 1, 2 og 3. Samtlige kjøring er utført på rack 1, der regnenodene har følgende tekniske spesifikasjoner: HP dl160 G5, 2 x Intel QuadCore E5472 3.0 GHz, 16Gb RAM, 72Gb SAS 15000 rpm.

5.3 MODELLTEKNISK ANALYSE AV GRUNNMODELL

Noen tekniske aspekter som er interessante ved en modellkjøring er størrelsen på problemet, løsningstiden og eventuelt *gap*. Med *gap* menes den prosentvise differansen mellom øvre grense på målfunksjonsverdien og beste løsning funnet. Det er ofte enklere å løse en relaksert versjon av det opprinnelige problemet til optimum enn selve problemet, og løsningen til enhver relaksert versjon vil være minimum like god som løsningen på det opprinnelige problemet. Det brukes i vårt tilfelle til å fastslå en øvre grense på målfunksjonsverdien og derav også et *gap*.

I programvaren som benyttes utføres preprocessing ved at redundante restriksjoner og variabler kuttes, noe som bidrar til å forenkle problemet. *Presolve* utfører slike kutt, og antall restriksjoner og variabler før og etter *presolve* blir derfor presentert. De modelltekniske resultatene av grunnmodellen gis i Tabell 6 og Tabell 7. Tabell 6 viser antall restriksjoner og variabler før og etter at *presolve* har utført sine kutt, samt løsningstid og målfunksjonsverdi for LP-relakseringen.

Tabell 6: Preprocessing av kjøring med grunnmodell

Antall restriksjoner		Antall variabler		LP-problem	
Før presolve	Etter presolve	Før presolve	Etter presolve	Løsnings-tid [s]	Mål.verdi [MNOK]
12 074	10 163	11 919	11 413	4	27,65

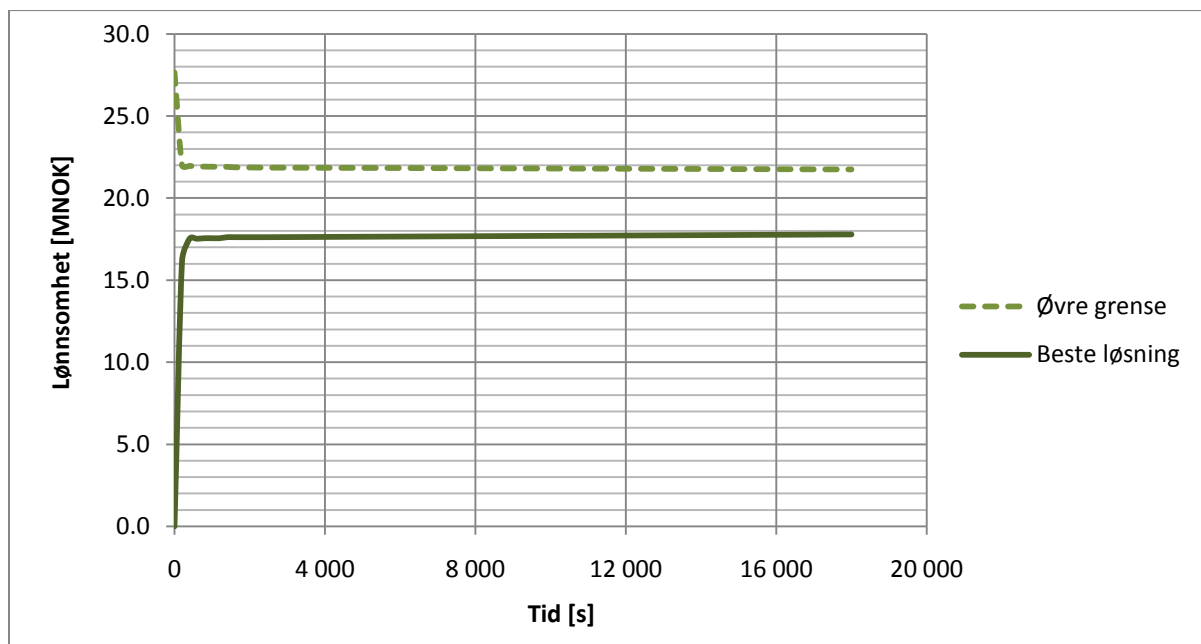
Tabell 7 tar for seg tekniske detaljer for løsning av det blandede lineære heltallsproblemet (MIP). Her presenteres den totale kjøretiden, tiden det tar å finne

første heltallsløsning, antall noder i *Branch & Bound (B&B)*-treet, målfunksjonsverdi, øvre grense på målfunksjonsverdien, samt gapet mellom målfunksjonsverdi og øvre grense.

Tabell 7: Løsning ved kjøring av grunnmodell

Blandet lineært heltallsproblem					
Kjøretid [s]	Tid første løsning [s]	Antall noder	Mål.verdi [MNOK]	Øvre grense [MNOK]	Gap
18 000	6	428 900	17,78	21,74	22,3 %

Som vi ser evner ikke programvaren å løse modellen til optimum og gir et gap på 22,3 %. Det betyr at den optimale løsningen kan maksimalt være 22,3 % bedre enn funnet løsning. Figur 10 viser hvordan gapet mellom målfunksjonsverdien og øvre grense reduseres med kjøretiden. Figuren illustrerer at gapet reduseres betraktelig den første tiden. For å redusere gapet ytterligere har modellen blitt kjørt over lengre tid, men vi ser at effekten er liten. På grunn av begrenset arbeidsminne hos maskinvaren må den maksimale kjøretiden settes til å være lik 18 000 sekunder.



Figur 10: Utvikling av beste løsning og øvre grense over tid

For ytterligere å redusere differansen mellom øvre grense og beste løsning er det forsøkt å utfordre standardinnstillingene ved XPRESS-MP. Dette er blant annet gjort ved å prioritere hvilke variabler det skal forgrenes først på i B&B-treet. Variablene som beslutter om en havn tildeles lager og de som beslutter om et skip benyttes i en sesong ble således prioritert høyt, grunnet deres store effekt på løsningen. Det ble også forsøkt med en mer aggressiv kuttstrategi, samt ulike forgreningsstrategier. Standardinnstillingene viste seg imidlertid som mer effektive og ga bedre resultater.

Et annet forsøk som er blitt utført er bruk av Special Ordered Sets (SOS). Dette er gjort ved at variabler defineres som medlemmer av et spesielt ordnet sett. Innføring av SOS1 kan gjøres som følge av restriksjon (1) i den generelle matematiske modellen. Den sier nemlig at et skip på en seilerute i en tidsperiode høyst kan ha én sistehavn som besøkes, altså høyst én binærvariabel av typen y_{ivtm} ulik null. Tanken er at havnene langs norskekysten er ordnet i en spesiell sekvens, noe SOS muligens kunne dra nytte av. Det er forsøkt med ulike vektinger av rekkefølgen til havnene, men bruken av SOS gir likevel ingen positiv effekt på resultatene.

5.4 SYMMETRIKUTT

Slik grunnmodellen er formulert finnes det symmetriske løsninger. Et eksempel på det er dersom flåten består av flere skip med samme lastekapasitet. Da vil det i praksis ikke spille noen rolle hvilket av de identiske skipene som seiler en gitt rute. Et annet eksempel på symmetri er de rutene som et skip seiler i løpet av en tidsperiode. Om en seilerute nummereres som én eller to påvirker ikke løsningen. De symmetriske løsningene øker antall mulige forgreninger i B&B-treet og gir dermed en lite effektiv bruk av internminnet. Som følge av dette er det ønskelig å fjerne de symmetriske løsningene.

5.4.1 Skipssymmetri

Skipssymmetri oppstår når flåten består av to eller flere identiske skip. I vårt tilfelle vil det si skip med lik lastekapasitet. Året er inndelt i fire sesonger og en binær variabel angir om et skip benyttes i en gitt sesong. I et tilfelle der kun ett skip benyttes i en gitt sesong er det vilkårlig hvilket av flere skip med lik kapasitet som benyttes. Dette fordi det kun er lastekapasitet som skiller skipene fra hverandre. Tabell 8 viser et eksempel på symmetri.

Tabell 8: Eksempel på effekt av kutt av skipssymmetri

		Skipsbruk uten symmetrikutt				Skipsbruk med symmetrikutt			
		Sesong				Sesong			
Skip	Kapasitet	1	2	3	4	1	2	3	4
1	1500	1	0	1	0	1	1	1	0
2	1500	0	1	0	0	0	0	0	0

Vi kan først fokusere på skipsbruken uten symmetrikutt. Tabellen viser en løsning der skip 2 kun blir benyttet i sesong 2, mens skip 1 er i bruk i de øvrige sesongene. Det er imidlertid tilfeldig hvilket av de to skipene som er benyttet i de enkelte sesongene. Det kunne like gjerne vært skip 1 som ble benyttet i sesong 2, og skip 2 i de øvrige sesongene. Det betyr at det eksisterer i alt åtte ulike løsninger som alle gir samme resultat. Ved innføring av symmetrikutt er det imidlertid ikke lenger tilfeldig hvilket skip som blir benyttet i en sesong. Symmetrikuttet sørger for at skip 1 alltid blir benyttet før skip 2 kan benyttes. Antall tillatte løsninger reduseres slik at det ikke lenger er åtte mulige løsninger

som gir samme resultat, men kun én mulig løsning. Løsningen med symmetrikutt gir samme resultat som løsningen uten symmetrikutt, men krever færre forgreninger i B&B-treet. Eksempelet i Tabell 8 viser at det ikke behøves å være tilgjengelig to skip for å oppnå løsningen, men at det er tilstrekkelig med ett skip med kapasitet 1500 tonn. I et tilfelle der det viser seg hensiktsmessig å benytte to skip med samme lastekapasitet i samme tidsperiode oppstår det en annen form for symmetri. Det er da vilkårlig hvilket av de to skipene som tildeles en gitt rute.

For å fjerne begge formene for skipssymmetri kan følgende restriksjon innføres:

$$\sum_{i \in I_m} i \cdot y_{ibtm} - \sum_{i \in I_m} i \cdot y_{iatm} \leq 0 \quad \forall a \in V, b \in V, t \in T, m \in M \quad (21)$$

$$| V_a^{CAP} = V_b^{CAP} \wedge a < b$$

Restriksjonen sier at dersom to skip har lik lastekapasitet, så skal det skipet med lavest indeksnummer seile den lengste ruten. Med lengste rute menes den ruten som besøker en siste havn som er lengst unna produsenten. Det gjør at det ikke lenger er vilkårlig hvilket skip som tildeles en gitt rute. Restriksjonen sørger samtidig for at dersom kun ett skip benyttes, så må det være det skipet med lavest indeksnummer.

5.4.2 Rutesymmetri

En ny form for symmetri dannes som følge av de ulike numrene et skips ruter i en tidsperiode kan ha. Dersom et skip kun seiler én rute i løpet av en tidsperiode, så er det vilkårlig om ruten indekseres som 1 eller 2. I et tilfelle der et skip seiler flere ruter i løpet av en tidsperiode er det vilkårlig hvilken rute som seiles først og hvilken deretter. Hvis et skip eksempelvis seiler en rute som ender i Trondheim og en rute som ender i Bergen i samme tidsperiode, så gir modellen uten symmetrikutt vilkårlig én av to løsninger: enten at Trondheimsruten seiles først og deretter Bergensruten, eller at Bergensruten seiles først og deretter Trondheimsruten. De to løsningene er identiske og påvirker ikke distribusjonen. Det skaper rutesymmetri.

For å fjerne rutesymmetrien kan følgende restriksjon innføres:

$$\sum_{i \in I_m} i \cdot y_{ivtm} - \sum_{i \in I_m} i \cdot y_{ivt(m-1)} \leq 0 \quad \forall v \in V, t \in T, m \in M \setminus \{1\} \quad (22)$$

Restriksjonen sier at et skips lengste rute i en tidsperiode skal nummereres med lavest indeks. Deretter nummereres skipets øvrige ruter i tidsperioden etter avtakende lengde. Det gjør det ikke lenger vilkårlig hvilket nummer en rute tildeles. Restriksjonen sørger samtidig for at dersom kun én rute seiles i en tidsperiode, så må den nummereres med indeksnummer 1.

5.5 LINEÆRRELAKSERING

Det opprinnelige problemet er beskrevet ved hjelp av en blandet lineær heltallsmodell (MIP). En lineær relaxering av problemet betyr at heltallskravene fjernes, og den optimale løsningen til relaxeringen vil da nødvendigvis være like god eller bedre enn den optimale løsningen til det opprinnelige problemet. I vårt tilfelle har vi et maksimeringsproblem, hvilket innebærer at målfunksjonsverdien i optimum vil være minst like høy i LP-relaxeringen som i det opprinnelige problemet. XPRESS-MP utnytter dette ved å løse LP-relaxeringen og bruke løsningen som en øvre grense for målfunksjonsverdien i det opprinnelige problemet. Den øvre grensen er nyttig i tilfeller der det identifiseres mulige løsninger på det opprinnelige problemet, men der ingen av dem kan bevises som optimale. Den øvre grensen bidrar da til å angi den potensielle avstanden mellom løsningene som er funnet og optimal løsning.

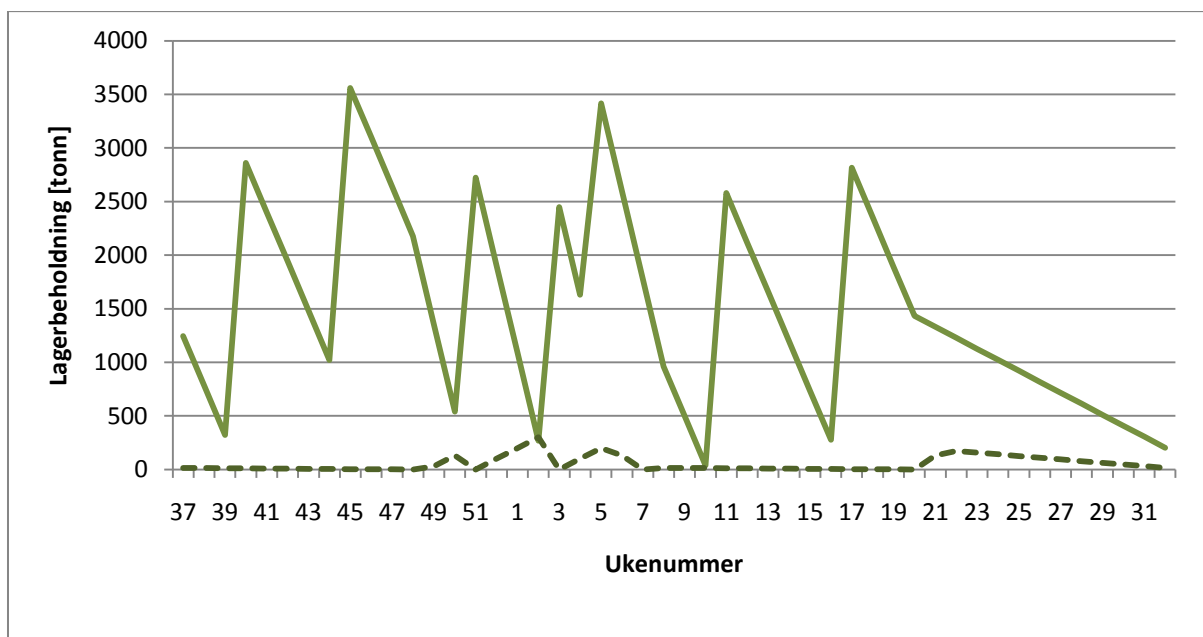
XPRESS-MP opererer i tillegg med noen algoritmer omtalt som *Root cutting & heuristics* som kutter bort enkelte løsninger som er tillatte i LP-relaxeringen, men som ikke er tillatte i det opprinnelige problemet. I vårt tilfelle reduserer algoritmene den øvre grensen fra 27,65 MNOK til 22,17 MNOK, og vi sier at den lineære relaxeringen styrkes. B&B reduserer den øvre grensen ytterligere til 21,74 MNOK. Sistnevnte reduksjon er riktignok på kun 2 %, noe som motiverer utarbeidelse av tilleggsrestriksjoner som styrker den lineære relaxeringen ytterligere. Med det menes restriksjoner som reduserer den øvre grensen til målfunksjonsverdien uten å påvirke problemet som beskrives. At det ikke påvirker problemet som beskrives betyr at tilleggsrestriksjonene ikke fjerner noen løsninger som tidligere har vært tillatte.

Målfunksjonen i modellen beskriver overskuddet i verdikjeden og inneholder inntekts- og kostnadsledd. Siden målet er å maksimere overskuddet vil inntektene maksimeres, mens kostnadene vil minimeres. Ved lineær relaxering fjernes binærkravene og de tidligere binærvariablene får en verdi mellom 0 og 1. Siden disse variablene inngår i kostnadsledd i målfunksjonen tar de verdier nærmere 0 enn 1 i løsningen til den lineære relaxeringen. Inntektsleddet i målfunksjonen består av kontinuerlige variabler, noe som gjør at binærvariablene kun settes store nok til at etterspørselen kan dekkes. Slik holdes kostnadene urealistisk lave. Dette illustreres indirekte i Figur 11, der lageret i Trondheim brukes som eksempel. Figuren viser lagerbeholdningen ved løsning av henholdsvis lineærrelaxeringen og det blandede lineære heltallsproblemet. Beholdningen ved lineærrelaxeringen er til enhver tid langt lavere enn beholdningen ved det blandede lineære heltallsproblemet. Ved løsningen av lineærrelaxeringen er det maksimalt 300 tonn pellets som lagres på samme tid.

Vi husker fra tidligere restriksjonen som sier at lagerbeholdningen i en havn i en tidsperiode skal være mindre enn eller lik lagerkapasiteten i havnen multiplisert med binærvariabelen som angir om det benyttes lager i havnen:

$$s_{it} - \bar{s}_i \cdot w_i \leq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (13)$$

Verdien på \bar{s}_i er 4000. Under lineærrelakseringen fjernes binærkravet til variabelen w_i og den tildeles følgende verdien $300/4000 = 0,075$. Til kontrast er verdien til w_i i det blendede lineære heltallsproblemet 1. Det synliggjør hvordan lagerkostnadene underestimeres grovt i lineærrelakseringen, noe som bidrar til å gi en stor differanse mellom målfunksjonsverdien til henholdsvis lineærrelakseringen og det opprinnelige blendede lineære heltallsproblemet.



Figur 11: Lagerbeholdning før innføring av lineærkutt

Det er ønskelig å presse opp verdiene til binærvariablene i LP-relakseringen, slik at de nærmer seg 1 dersom de gis en verdi ulik null. Dette for å redusere differansen mellom målfunksjonsverdien til LP-relakseringen og det opprinnelige problemet. For å oppnå dette er en rekke ulike tilleggsrestriksjoner, såkalte lineærkutt, blitt formulert og testet. Tre av dem har vist seg effektive og vil derfor bli trukket frem i denne sammenheng. Lineærkuttene kan virke overflødige og svake i forhold til de øvrige restriksjonene i grunnmodellen, men de viser seg effektive ved løsning av den lineære relakseringen. For hvert lineærkutt beskrives først rollen den har i det blendede lineære heltallsproblemet, deretter blir effekten på den lineære relakseringen presentert.

5.5.1 Lineærkutt 1

$$f_{ikt} - (D_{kt}^0 + D_k^1) \cdot w_i \leq 0 \quad \forall i \in I, k \in K_i, t \in T \quad (23)$$

MIP: Lineærkutt 1 sier at mengde pellets levert fra en havn til en kunde i en tidsperiode ikke skal overskride den totale etterspørselen til kunden i tilsvarende tidsperiode. Dersom ikke havnen tildeles lager så kan ingenting leveres fra havnen til kunden.

LP: Variablene f_{ikt} , som angir antall tonn pellets levert fra havnen i til kunden k i tidsperiode t , fastsetter inntektene i verdikjeden og søker høye verdier. Lineærkutt 1 utnytter de høye verdiene av f_{ikt} til å presse opp verdiene til w_i under den lineære relaxeringen. w_i er opprinnelig binærvariabler som angir om en havn i tildeles lager.

5.5.2 Lineærkutt 2

$$\sum_{j \in I_m, j \geq i} q_{jvtm} - \sum_{j \in I_m, j \geq i} V_v^{KAP} \cdot y_{jvtm} \leq 0 \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T, m \in M_i \quad (24)$$

MIP: Lineærkutt 2 sier at den totale mengden pellets et skip frakter etter en gitt havn i en tidsperiode på en seilerute skal være mindre enn skipets lastekapasitet. Dersom skipet har besøkt sin siste havn før den gitte havnen tillates det ikke å frakte pellets til havnene lokalisert etter den gitte havnen.

LP: Variablene q_{ivtm} angir antall tonn pellets levert av et skip v til havnen i ved tidsperiode t og seilerute m . Variablene fyller opp lagerbeholdningen i de ulike havnene, og er således en nødvendighet for å kunne levere til kunder og generere inntekter. Dette gjør at q_{ivtm} søker høye verdier, noe lineærkutt 2 utnytter til å presse opp verdiene til y_{ivtm} , som opprinnelig er binærvariabler som angir om en havn i er siste besøk for et skip på en seilerute m i tidsperiode t .

5.5.3 Lineærkutt 3

$$y_{ivtm} - x_{ivtm} \leq 0 \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T, m \in M_i \quad (25)$$

MIP: Lineærkutt 3 sier at den havnen som er sist på en rute må besøkes. I utgangspunktet kan det virke som en selvfølgelighet. Jo lengre rute desto høyere kostnader, noe som burde bety at skipene ikke seiler lenger enn til den siste havnen som faktisk besøkes. Fra tidligere husker vi imidlertid at det opereres med samme seiledistanse for alle havnene i Oslo-regionen. Dersom en havn i denne regionen skal besøkes, er det i grunnmodellen vilkårlig om den aktuelle havnen eller om noen av de etterfølgende settes som siste havn. Lineærkutt 3

fjerner denne symmetrien. Vi husker også at seiledistansen til Trondheim ble satt til null, noe som i grunnmodellen gjør det vilkårlig om det ikke seiles noen rute med siste havn eller om Trondheim settes som siste havn uten at noen havner besøkes. Lineærkutt 3 fjerner også denne symmetrien.

LP: Som følge av lineærkutt 2 ble verdiene til variablene y_{ivtm} presset opp. Lineærkutt 3 utnytter dette til å presse opp verdiene til variablene x_{ivtm} , som angir om en havn i besøkes av skip v i tidsperiode t på seilerute m .

5.6 MODELLTEKNISK ANALYSE AV TILLEGGSRESTRIKSJONER

Formulering av tilleggsrestriksjoner som fjerner symmetri og styrker lineærrelakseringen er nå blitt gitt, samtidig som teorien bak er beskrevet. En naturlig fortsettelse er å se hvordan restriksjonene påvirker modellkjøringene i praksis. Kjøringene sammenliknes og de mest effektive tilleggsrestriksjonene velges ut.

5.6.1 Symmetrikutt

Tabell 9 viser de ulike kjøringene som er blitt utført med symmetrikutt. Kjøringene omtales som SK1, SK2 og SK3, der SK er forkortelse for symmetrikutt.

Tabell 9: Oversikt over kjøring med symmetrikutt

Kjøring	Fjerning av	Restriksjoner
SK1	Skipssymmetri	Grunnmodell + (21)
SK2	Rutesymmetri	Grunnmodell + (22)
SK3	Skips- og rutesymmetri	Grunnmodell + (21) + (22)

Tabell 10 og Tabell 11 viser modelltekniske resultater av de ulike kjøringene. Betegnelsen GM benyttes om grunnmodell. Tabell 10 fokuserer på preprosessering og lineærrelaksering, mens i Tabell 11 blir resultater av det blandede lineære heltallsproblemet presentert.

Tabell 10: Preprosessering av kjøring med symmetrikutt

Kjøring	Antall restriksjoner		Antall variabler		LP-problem	
	Før presolve	Etter presolve	Før presolve	Etter presolve	Løsnings-tid [s]	Mål.verdi [MNOK]
GM	12 074	10 163	11 919	11 413	4	27,65
SK1	12 170	10 259	11 919	11 557	4	27,65
SK2	12 218	10 307	11 919	11 413	4	27,65
SK3	12 314	10 403	11 919	11 557	5	27,65

Fra Tabell 10 ser vi at antall restriksjoner etter presolve øker i takt med antall restriksjoner før presolve. Det indikerer at preprosesseringen ikke er særskilt effektiv for restriksjonene som innføres. Den lineære relakseringen gir omtrent samme målfunksjonsverdi i de fire kjøringene.

Tabell 11: Løsninger ved kjøring med symmetrikutt

Blandet lineært heltallsproblem						
Kjøring	Tid første løsn. [s]	Totaltid [s]	Antall noder	Målværdi [MNOK]	Øvre grense [MNOK]	Gap
GM	6	18 000	428 900	17,78	21,74	22,3 %
SK1	11	18 000	335 200	17,87	21,89	22,5 %
SK2	5	18 000	240 600	17,81	21,77	22,2 %
SK3	5	18 000	232 800	18,07	21,85	20,9 %

Fra Tabell 11 ser vi at innføring av symmetrikutt i grunnmodellen ikke endrer mye på gapet. Samtlige av kjøringene med symmetrikutt gir en løsning med bedre målfunksjonsverdi enn grunnmodellen. Dette på tross av at kjøringen SK3 kun rekker å gjennomgå drøye halvparten så mange noder som grunnmodellen i løpet av 18 000 sekunder. Det faktum at antall noder reduseres for kjøringene med symmetrikutt betyr at programvaren bruker mer tid i hver node. Symmetri-kuttene reduserer imidlertid også antall noder det er nødvendig å gjennomgå i B&B-treet, nettopp på grunn av fjerning av symmetri. Tabell 11 viser at det ikke er noen kjøringene som skiller seg særskilt ut, og derfor tas alle med videre i betraktningen.

5.6.2 Lineærkutt

Tabell 12 viser de ulike kjøringene som er blitt utført med tilleggsrestriksjoner for å styrke lineærrelakseringen. Først er hver og én tilleggsrestriksjon plassert alene sammen med grunnmodellen, deretter er parvise kombinasjoner satt sammen, før til slutt alle tre tilleggsrestriksjonene kjøres sammen med grunnmodellen.

Tabell 12: Oversikt over kjøringene med lineærkutt

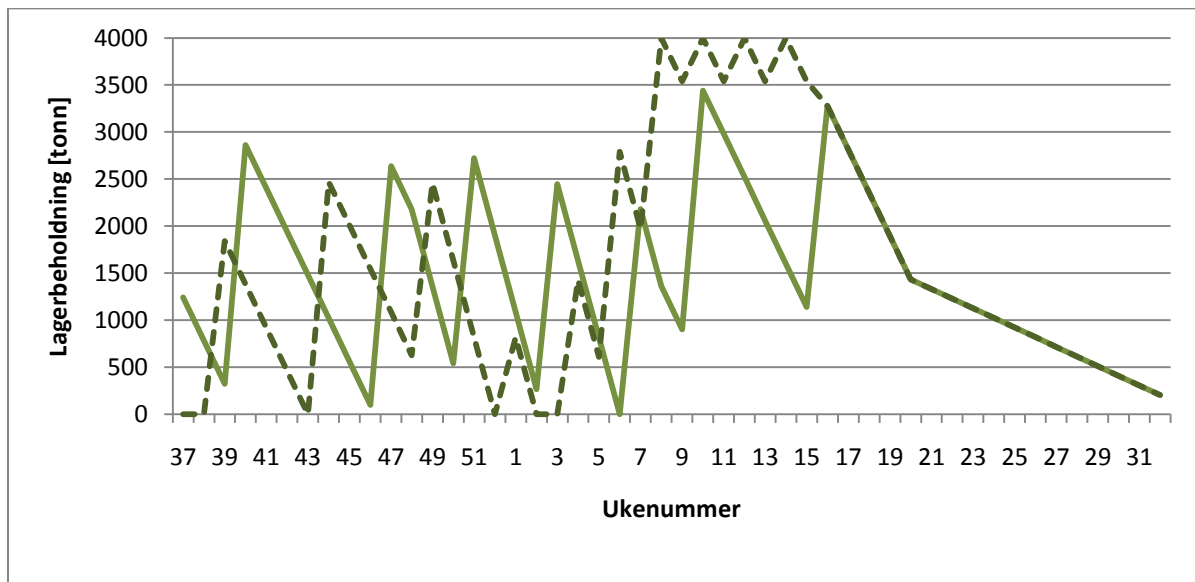
Kjøring	Restriksjoner
LP1	Grunnmodell + (23)
LP2	Grunnmodell + (24)
LP3	Grunnmodell + (25)
LP4	Grunnmodell + (23) + (24)
LP5	Grunnmodell + (23) + (25)
LP6	Grunnmodell + (24) + (25)
LP7	Grunnmodell + (23) + (24) + (25)

Som tidligere diskutert er ett av formålene med lineærkuttene å identifisere en lavest mulig øvre grense for målfunksjonsverdien. En øvre grense finnes ved løsning av en relaksering, hvilket gjør LP-løsningen interessant. Tabell 13 viser resultater fra preprosesseringen av kjøringene. Her ser vi at preprosesseringen ved mange av kjøringene er langt mer effektiv enn tidligere. På tross av at antall restriksjoner før presolve øker betraktelig, så øker ikke antall restriksjoner etter presolve i samme tempo.

Tabell 13: Preprosessering av kjøring med lineærkutt

Kjøring	Antall restriksjoner		Antall variabler		LP-problem	
	Før presolve	Etter presolve	Før presolve	Etter presolve	Løsnings-tid [s]	Mål.verdi [MNOK]
GM	12 074	10 163	11 919	11 413	4	27,65
LP1	27 674	13 320	11 919	11 413	4	23,01
LP2	15 818	12 755	11 919	11 413	6	24,38
LP3	14 666	12 179	11 919	11 557	6	27,65
LP4	31 418	15 912	11 919	11 413	3	20,04
LP5	30 266	15 336	11 919	11 557	3	23,01
LP6	18 410	14 483	11 919	11 557	7	24,38
LP7	34 010	17 640	11 919	11 557	5	20,04

For øvrig ser vi at målfunksjonsverdien til LP-problemet reduseres betraktelig ved innføring av tilleggsrestriksjoner i grunnmodellen. Det understøtter teorien bak tilleggsrestriksjonene, nemlig at de ville presse opp variablene som mister heltallskravet under LP-relakseringen. Figur 11 viste hvordan lagerbeholdningen ved havnen i Trondheim var urealistisk lav under lineærrelakseringen, og hvilke følger det fikk for lagerkostnadene. Det er da interessant å se den samme figuren på ny, etter at de tre tilleggsrestriksjonene som skal styrke lineærrelakseringen er lagt til grunnmodellen. Dette er illustrert i Figur 12.



Figur 12: Lagerbeholdning etter innføring av lineærkutt

Sammenliknet med Figur 11 ser vi at lagerbeholdningen har steget betraktelig i lineærrelakseringen. Ved løsningen av lineærrelakseringen er det maksimalt 4000 tonn pellets som lagres på samme tid, og variabelen w_i presses til verdien 1. Lagerkostnadene er dermed de samme i løsningen av lineærrelakseringen som i løsningen av det blandede lineære heltallsproblemet. Det viser at tilleggsrestriksjonene har hatt en positiv effekt, og at differansen mellom målfunksjons-

verdien til henholdsvis lineærrelakseringen og det blandede lineære heltallsproblemet er redusert.

Tabell 14 gir resultater for det blandede lineære heltallsproblemet, og det er fire kjøring som skiller seg ut. Kjøring LP2 gir høyest målfunksjonsverdi og lavest gap, mens kjøring LP7 gir lavest øvre grense. Kjøringene LP4 og LP6 gir også lave gap, og kjøringene gir samtidig lave verdier for øvre grense. Av den grunn tas kjøringene LP2, LP4, LP6 og LP7 med videre i betraktningen.

Tabell 14: Løsninger ved kjøring med lineærkutt

Blandet lineært heltallsproblem						
Kjøring	Tid første løsn. [s]	Totaltid [s]	Antall noder	Mål.verdi [MNOK]	Øvre grense [MNOK]	Gap
GM	6	18 000	428 900	17,78	21,74	22,3 %
LP1	14	18 000	353 600	17,91	21,58	20,5 %
LP2	12	18 000	276 400	18,03	19,92	10,5 %
LP3	6	18 000	324 600	17,57	21,90	24,7 %
LP4	4	18 000	217 200	17,89	19,90	11,2 %
LP5	7	18 000	307 000	17,65	21,91	24,1 %
LP6	20	18 000	175 800	17,82	19,82	11,2 %
LP7	5	18 000	198 200	17,86	19,76	10,6 %

5.6.3 Sammensetning av symmetrikutt og lineærkutt

I det følgende vil de utvalgte kjøringene som inkluderer symmetrikutt, og de utvalgte som inkluderer lineærkutt, bli satt sammen og testet. Vi husker det var vanskelig å skille de ulike kjøringene med symmetrikutt fra hverandre, og derfor ble både SK1, SK2 og SK3 tatt med videre. Det samme ble kjøringene LP2, LP4, LP6 og LP7. Tabell 15 og Tabell 16 viser resultater av nye kjøring der disse er blitt satt sammen i ulike kombinasjoner. For å eksemplifisere så består kjøring LP2+SK1 av grunnmodellen med tilleggsrestriksjonene fra kjøring LP2 og SK1.

Tabell 15: Preprosessering av kjøring med symmetri- og lineærkutt

Kjøring	Antall restriksjoner		Antall variabler		LP-problem	
	Før presolve	Etter presolve	Før presolve	Etter presolve	Løsnings-tid [s]	Mål.-verdi [MNOK]
GM	12 074	10 163	11 919	11 413	4	27,65
LP2+SK1	15 914	12 851	11 919	11 557	6	24,39
LP2+SK2	15 962	12 899	11 919	11 413	5	24,38
LP2+SK3	16 058	12 995	11 919	11 557	6	24,38
LP4+SK1	31 514	16 008	11 919	11 557	3	20,04
LP4+SK2	31 562	16 056	11 919	11 413	3	20,04
LP4+SK3	31 658	16 152	11 919	11 557	4	20,04
LP6+SK1	18 506	14 579	11 919	11 557	8	24,38

LP6+SK2	18 554	14 627	11 919	11 557	7	24,38
LP6+SK3	18 650	14 723	11 919	11 557	9	24,38
LP7+SK1	34 106	17 736	11 919	11 557	4	20,04
LP7+SK2	34 154	17 784	11 919	11 557	3	20,04
LP7+SK3	34 250	17 880	11 919	11 557	3	20,04

Vi ser av Tabell 15 at samtlige kjøringene gir en lavere målfunksjonsverdi ved lineærrelakseringen enn hva grunnmodellen gjør. De kjøringene som inkluderer LP4 og de som inkluderer LP7 blir løst på tilnærmet samme tid med samme målfunksjonsverdi. Kjøringene som inkluderer LP2 eller LP6 bruker til sammenlikning noe lengre tid og gir en høyere målfunksjonsverdi på lineærrelakseringen.

Tabell 16: Løsninger ved kjøringene med symmetri- og lineærkutt

Kjøring	Blandet lineært heltallsproblem					
	Tid første løsn. [s]	Totaltid [s]	Antall noder	Mål.verdi [MNOK]	Øvre grense [MNOK]	Gap
GM	6	18 000	428 900	17,78	21,74	22,3 %
LP2+SK1	7	18 000	218 000	17,87	19,93	11,6 %
LP2+SK2	11	18 000	266 400	18,19	19,93	9,6 %
LP2+SK3	11	18 000	246 200	17,94	19,92	11,0 %
LP4+SK1	4	18 000	199 600	18,04	19,84	10,0 %
LP4+SK2	4	18 000	187 600	18,31	19,84	8,4 %
LP4+SK3	5	18 000	175 600	18,29	19,91	8,9 %
LP6+SK1	8	18 000	202 800	17,97	19,77	10,0 %
LP6+SK2	9	18 000	173 400	17,80	19,77	11,1 %
LP6+SK3	10	18 000	158 200	17,85	19,81	11,0 %
LP7+SK1	5	18 000	170 600	17,76	19,77	11,3 %
LP7+SK2	4	18 000	193 000	17,81	19,80	11,2 %
LP7+SK3	3	18 000	157 200	17,98	19,74	9,8 %

Fra Tabell 16 ser vi at laveste øvre grense oppnås ved kjøring LP7+SK3 og den er på 19,74 MNOK. Kjøring LP4+SK2 skiller seg derimot ut med høyest målfunksjonsverdi og lavest gap, henholdsvis 18,31 MNOK og 8,4 %. Den økonomiske analysen tar sikte på å vise den potensielle lønnsomheten ved maritim distribusjon. Da er det ønskelig med en høyest mulig målfunksjonsverdi, og følgelig vil kjøring LP4+SK2 bli brukt videre i analysen.

5.7 REDUKSJON AV ANTALL VARIABLER OG RESTRIKSJONER

En måte å forbedre kjørerresultatene ytterligere på er å redusere antall variabler og restriksjoner. Samtlige kjøringene av caset som er beskrevet gir en løsning der kun ett skip med kapasitet 3000 tonn benyttes, og ingen på 1500 tonn. Det gjør det mulig å redusere antall variabler og restriksjoner ved å redusere antall skip i flåten det leies fra. Frem til nå har denne flåten vært bestående av tre skip. For å undersøke dette potensialet vil det nå bli utført kjøringene der flåtestørrelsen

reduseres stegvis. Først testes en flåte bestående av to skip: ett med lastekapasitet 3000 tonn og ett med 1500 tonn. Deretter testes en flåte bestående av ett skip med kapasitet 3000 tonn. Vi husker at kjøringen LP4+SK2 ga mest lovende resultater og den vil derfor bli benyttet. At kun rutesymmetri fjernes, og ikke skipssymmetri, er beleilig ettersom det nå ikke inngår noen skip i flåten med lik lastekapasitet. Tabell 17 viser resultater fra preprosesseringen.

Tabell 17: Preprosessering av kjøring med modifisert flåte

Skip	Antall restriksjoner		Antall variabler		LP-problem	
	Før presolve	Etter presolve	Før presolve	Etter presolve	Løsnings-tid [s]	Mål.-verdi [MNOK]
2 x 1500 1 x 3000	31 562	16 056	11 919	11 413	3	20,04
1 x 1500 1 x 3000	27 674	12 552	9 323	8 961	2	20,04
1 x 3000	23 786	9 048	6 727	6 509	1	19,94

Flåten bestående av 2 skip med kapasitet 1500 tonn og 1 skip med kapasitet 3000 tonn betegner kjøringen før flåtestørrelsen ble redusert. Sammenliknet med denne ser vi at reduksjonen i flåtestørrelsen har redusert antall variabler og restriksjoner både før og etter presolve betydelig. Målfunksjonsverdien i lineærrelakseringen er imidlertid den samme for flåten med tre skip som den med to skip, men noe lavere når det kun er ett skip tilgjengelig. Tabell 18 viser øvrige modelltekniske resultater av kjøringene. Her er også en kjøring med en flåte bestående av fire skip inkludert, der alle fire har lastekapasitet 1500 tonn. Hensikten er å vise at den øvre grensen med en slik flåte er lavere enn målfunksjonsverdien med de øvrige flåtene, og at en flåte med kun skip av kapasitet 1500 tonn vil bli utkonkurrert. Flåten med fire små skip gir økt fleksibilitet, men det veier ikke opp for økte kostnader forbundet med leie av skip og besøk av havner. Det er for øvrig viktig å være klar over at de øvre grensene til kjøring med ulike flåtestørrelse ikke er sammenliknbare.

Tabell 18: Løsninger ved kjøring med modifisert flåte

Blandet lineært heltallsproblem						
Skip	Tid første løsn. [s]	Totaltid [s]	Antall noder	Mål.verdi [MNOK]	Øvre grense [MNOK]	Gap
4 x 1500	7	18 000	205 200	13,98	14,92	6,7 %
2 x 1500 1 x 3000	4	18 000	187 600	18,31	19,84	8,4 %
1 x 1500 1 x 3000	3	18 000	285 200	18,32	19,69	7,5 %
1 x 3000	2	18 000	604 000	18,19	19,64	7,9 %

Tabellen viser at reduksjon i flåtestørrelsen ikke påvirker modellen entydig. En reduksjon fra tre til to skip gir forbedringer i målfunksjonsverdien, øvre grense og gap, mens en videre reduksjon til ett skip ikke forbedrer resultatene ytterligere. Dette på tross av at kjøringen med ett skip rekker å gå gjennom langt flere noder enn hva de øvrige kjøringene gjør. Konklusjonen blir at kjøring LP4+SK2 med redusert flåte til to skip gir den høyeste målfunksjonsverdien. Dette resultatet er fremkommet av en systematisk håndtering av grunnmodellen.

5.8 OPPSUMMERING AV TEKNISK ANALYSE

Som tidligere kommentert tar den økonomiske analysen sikte på å vise den potensielle lønnsomheten ved maritim distribusjon av trepellets langs norskekysten. Da er det naturlig nok ønskelig med en høyest mulig målfunksjonsverdi og det var også grunnen til at kjøring LP4+SK2 ble valgt ut. Kjøring LP4+SK2 består av grunnmodellen pluss restriksjon (22), (23) og (24). Dette inkluderer blant annet fjerning av den omtalte rutesymmetrien. I tillegg er flåten redusert til to skip: ett med lastekapasitet 3000 tonn og ett med kapasitet 1500 tonn. Det gir en målfunksjonsverdi på 18,32 MNOK. Før flåtestørrelsen ble redusert beskrev alle kjøringene det samme problemet. Det gjør at gapet kan beregnes manuelt ved å hente øvre grense fra den kjøringen med lavest øvre grense, og målfunksjonsverdi fra den kjøringen med høyest målfunksjonsverdi. Gapet blir da differansen mellom øvre grense og målfunksjonsverdi, dividert på målfunksjonsverdien. Kjøringen LP7+SK3 ga lavest øvre grense med 19,74 MNOK, mens kjøringen LP4+SK2 ga høyest målfunksjonsverdi med 18,32 MNOK. Det gir et gap på 7,8 %. Det betyr at det systematiske arbeidet har redusert differansen mellom målfunksjonens øvre grense og beste løsning fra 22,3 % til 7,8 %.

6 ØKONOMISK ANALYSE

Nå som den matematiske modellen er ferdigstilt og modellkjøringene er effektivisert følger det en økonomisk analyse. Det innebærer at løsninger trekkes frem og diskuteres, samtidig som ulike scenarioer undersøkes. Først presenteres verdikjedens totale inntekts- og kostnadsstruktur, deretter undersøkes de ulike inntekts- og kostnadsleddene nærmere. Sensitiviteten vil bli omtalt i forbindelse med nullpunktsanalyser, og ulike scenarioer vil bli skissert.

6.1 LØSNING VED HOVEDSCENARIO

Caset som studeres er det samme som ble presentert under den tekniske analysen. Flåten det kan leies skip fra er imidlertid endret i tråd med konklusjonen fra den tekniske analysen, og består nå av to skip: ett med lastekapasitet 3000 tonn og ett med kapasitet 1500 tonn. Caset omtales som et hovedscenario der de inndataene som er vurdert som mest realistiske er blitt brukt.

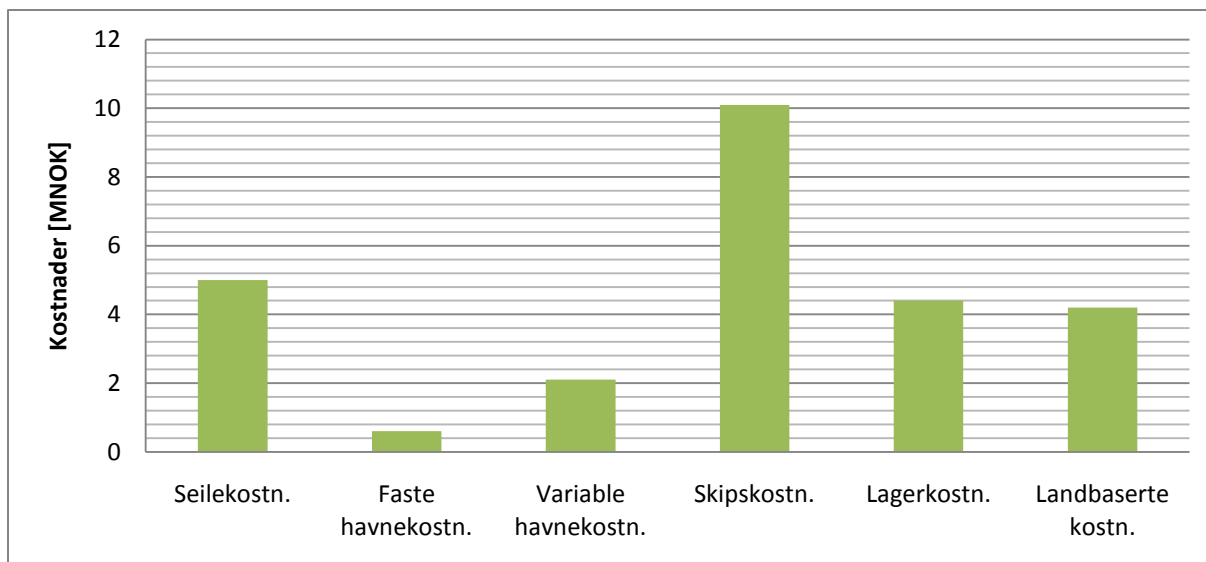
6.1.1 Inntekts- og kostnadsstruktur

Fra den beste løsningen ved hovedscenarioet viser det seg at distribusjonsnettverket er lønnsomt med et overskudd på 18,3 MNOK. Dette kommer frem av inntektene og kostnadene som er gjengitt i Tabell 19. Med en årlig salgsinntekt på 224,7 MNOK blir driftsmarginen på drøye 8,1 %. Det viser hvor mye profitt som genereres per krone omsatt.

Tabell 19: Inntekts- og kostnadsstruktur for verdikjeden

	[MNOK]
Salgsinntekter	224,7
Produksjonskostnader	-180,0
Skipskostnader	-10,1
Seilekostnader	-5,0
Lagerkostnader	-4,4
Landbaserte transportkostnader	-4,2
Variable havnekostnader	-2,1
Faste havnekostnader	-0,6
Profitt	18,3

Av kostnadene ser vi som ventet at produksjonskostnader er svært dominerende. Produksjonskostnader inkluderer kostnader knyttet til råvarer, produksjonsprosess og kapitalbehov. Fordelingen av de øvrige kostnadene er imidlertid mer interessant, og de er følgelig presentert i Figur 13. Skipskostnader omfatter kostnader ved leie av skip, og vi ser at dette er den største kostnaden med unntak av produksjonskostnader. Deretter følger henholdsvis seilekostnader, landbaserte transportkostnader og lagerkostnader. Variable og faste havnekostnader er de minste kostnadsleddene.



Figur 13: Grafisk fremstilling av kostnadsledd i verdikjeden

Seile- og skipskostnader utgjør samlet de maritime transportkostnadene og disse er langt høyere enn de øvrige kostnadene. Det understøtter beslutningen om å vie den maritime distribusjonen mest oppmerksomhet i analysen. Siden de maritime transportkostnadene er såpass mye høyere enn for eksempel lagerkostnadene, er det ønskelig å utnytte lagerkapasiteten mest mulig fremfor å leie mange skip som fyller på lagrene jevnlig.

6.1.2 Produksjon og salg

Det er tidligere blitt foretatt en antakelse som impliserer at mengde pellets produsert er lik mengde pellets solgt. Ettersom kvantumet er det samme er det kun differansen mellom salgspris og produksjonskostnad per tonn som skiller salgsinntekter fra produksjonskostnader. Som følge av dette henger salg og produksjon nøye sammen.

I analysen foregår all produksjon av pellets ved Biowoods anlegg på Averøya. Den beste løsningen gir en total produksjonsmengde på omlag 150 000 tonn per år. Som tidligere kommentert er produksjonskapasiteten til Biowood 450 000 tonn per år, hvilket gjør løsningen realiserbar. Fra casebeskrivelsen husker vi at den totale etterspørselen var estimert til 160 000 tonn per år, hvilket gjør at den beste løsningen dekker omtrent 94 % av den totale etterspørselen. Siden kundene er aggregert i modellen, så betyr det at de aller fleste kundene får hele sin etterspørsel dekt, mens noen få enkeltkunder får lite eller ingen leveringer. Samtlige industrikunder får all sin etterspørsel dekt, men enkelte kunder med oppvarmingsbehov mottar ikke full leveranse. Kundegruppen i Ringerike skiller seg spesielt ut ved at kun 30 % av etterspørselen dekkes. Det skyldes at etterspørselen til nærliggende kundegrupper er særdeles stor, og de prioriteres foran Ringerike siden de landbaserte distansene er kortere. Oslo opplever at 87 % av etterspørselen imøtekommes. Samtlige øvrige kundegrupper opplever at minimum 97 % av deres etterspørsel dekkes.

6.1.3 Flåtesammensetning

Kostnader ved leie av skip, omtalt som skipskostnader, er de nest største kostnadene etter produksjonskostnader. Som det kommer frem av casebeskrivelsen er det mulig å leie skip av to ulike lastekapasiteter: 1500 og 3000 tonn. I den beste løsningen er det ett skip med kapasitet på 3000 tonn som faktisk benyttes. Skipet leies inn i sesongene høst, vinter og vår. Det hadde vært mulig å benytte et skip med eksempelvis kapasitet 1500 tonn i tillegg, og på den måten dekket all etterspørsel. Det viser seg imidlertid ikke lønnsomt å leie inn et ekstra skip for å dekke denne lille andelen etterspørsel som ikke allerede er betjent. At ingen skip leies inn om sommeren er naturlig ettersom det da eksisterer etterspørsel fra kun industrikunder. Lagrene bygges opp i forkant av sommeren, noe som muliggjør at sommerens etterspørsel dekkes.

At skipskostnadene er såpass betydningsfulle understreker viktigheten av å utnytte skipene best mulig. Ved seiling av ruter i en tidsperiode som til sammen tar kortere tid enn én uke vil skipet bli liggende i ro i produksjonshavnen til neste tidsperiode begynner. Skipet genererer da ingen inntekter, men de faste kostnadene påløper like fullt. Det er derfor ønskelig å finne en flåtesammensetning der skipene ligger minst mulig i ro. Hvert skip i modellen tillates å seile opptil to ruter per uke, forutsatt at rutene ikke krever mer tid enn én uke. Seilingstiden til en rute avhenger av distansen til siste havn på ruten, samt antall besøk av havner underveis. Et mål på utnyttelsesgraden er hvor stor andel et skips totale seiletid utgjør av den totale tiden det har til rådighet. For den beste løsningen er utnyttelsesgraden til skipet 89,1 %, hvilket er vist i Tabell 20. Det betyr at skipet seiler i gjennomsnitt 6,2 dager per uke. En slik utnyttelsesgrad er god, ettersom det bør beregnes omtrentlig én dag per uke til vedlikehold og stell av skip.

Tabell 20: Utnyttelsesgrad i forhold til seiletid

Skip	Kapasitet [tonn]	Faktisk seiletid [dager]	Maks. seiletid [dager]	Utnyttelsesgrad, tid
1	3000	224,5	252,0	89,1 %
2	1500	N/A	N/A	N/A

Det finnes alternative måter å vurdere utnyttelsesgraden på. For eksempel kan det beregnes hvor stor andel av et skips lastekapasitet som utnyttes. Det kan gjøres ved å se antall tonn pellets et skip frakter i forhold til det skipet maksimalt kunne ha fraktet, noe som er gjort i Tabell 21.

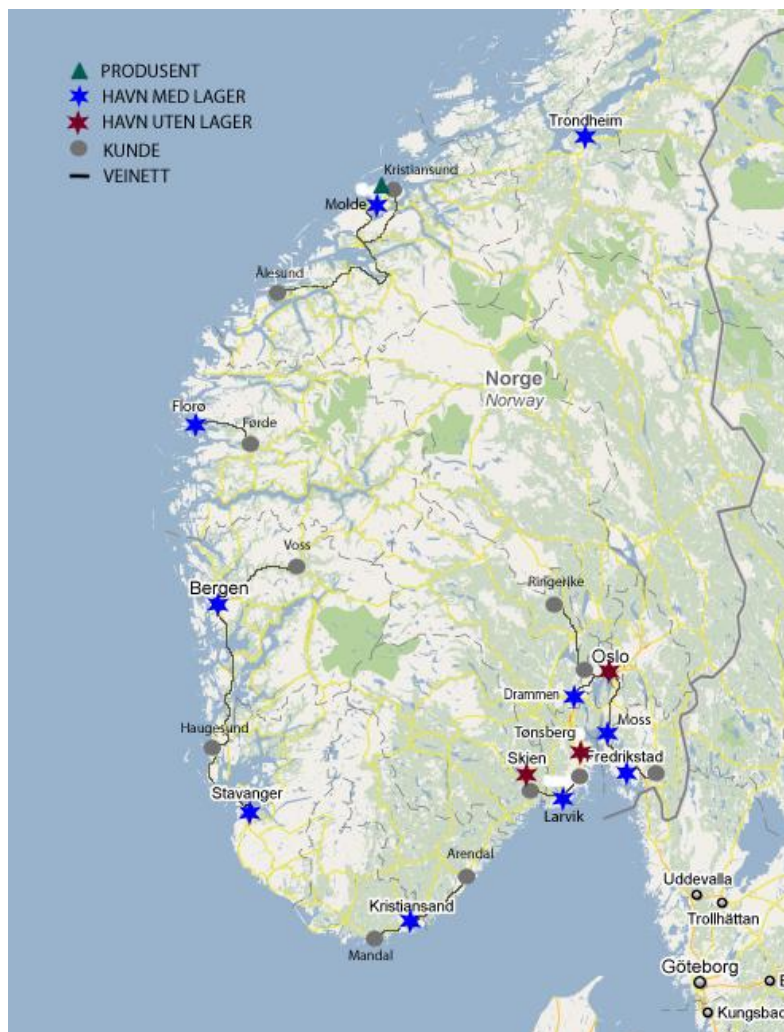
Tabell 21: Utnyttelsesgrad i forhold til lastmengde

Skip	Kapasitet [tonn]	Faktisk mengde fraktet [tusen tonn]	Maks. fraktet [tusen tonn]	Utnyttelsesgrad, last
1	3000	147 478	216 000	68,3 %
2	1500	N/A	N/A	N/A

Vi ser at å vurdere utnyttelsesgraden med utgangspunkt i last gir en lavere verdi enn å vurdere utnyttelsen med utgangspunkt i tid. Det er imidlertid viktig å merke seg at faktisk mengde fraktet er begrenset av den totale årlige etterspørselen. I vårt tilfelle er den 160 000 tonn. Den lave utnyttelsesgraden gjør det fristende å si at skipet er større enn det behøver å være. Noe som taler imot dette er at beste løsning foretrekker skip med kapasitet 3000 tonn fremfor skip med kapasitet 1500 tonn. Det skyldes at skipet i periodevis utnyttes maksimalt, som for eksempel før sommeren da lagrene skal fylles opp.

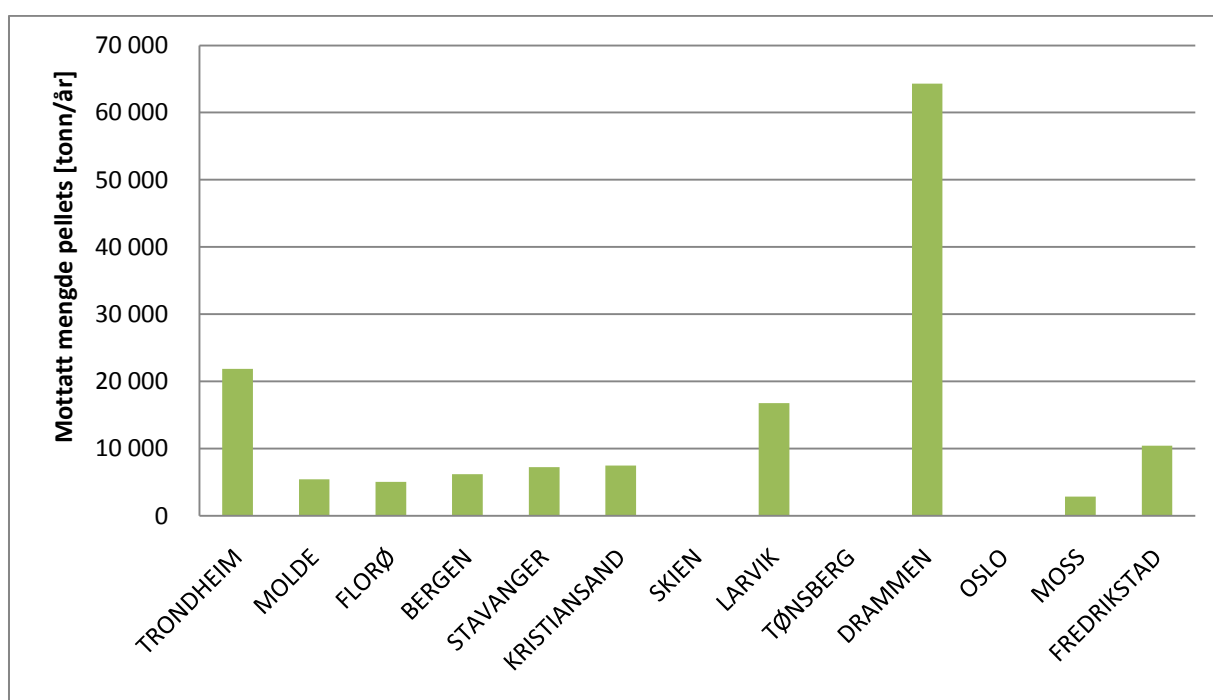
6.1.4 Bruk av havner

I den beste løsningen er det 10 av de 13 mulige industrihavnene som besøkes i løpet av året. Havnene som ikke besøkes er Skien, Tønsberg og Oslo, noe som fremkommer av Figur 14. At Oslo med sin høye etterspørsel ikke besøkes kan virke oppsiktsvekkende. Det kan imidlertid forklares med at Oslo opererer med høye havnekostnader, slik at det er mer hensiktsmessig å losse pellets i nærliggende havner og transportere landbasert til Oslo. Tilsvarende betjenes kundene i området rundt Tønsberg og Skien av havnen i Larvik.



Figur 14: Illustrasjon av distribusjonsnettverkets struktur

Det er tydelig å spore en trend i rutene som seiles, der havnene i henholdsvis Trondheim og Drammen besøkes svært ofte, samtidig som det leveres store kvantum. Drammen skiller seg spesielt ut. Dette kan ses av Figur 15. Det kan forklares med at både Trondheim og Drammen har forholdsvis høy etterspørsel, samtidig som Drammen forsyner kundene i Oslo-området med store mengder. Det er som tidligere nevnt kun ett skip med kapasitet på 3000 tonn som er i bruk. Etterspørselen er størst om vinteren og da besøkes naturlig nok havnene oftest. Om våren og høsten blir gjerne havner med mindre etterspørsel besøkt. Når de først besøkes, mottar de store kvanta. På den måten kan kundene forsynes fra lagerbeholdningen i lengre perioder. Som kommentert leies det ikke inn skip sommerstid, noe som gir sitt utslag på høy aktivitet i forkant av sommeren. Lagrene skal da fylles opp for å dekke den kommende etterspørselen.



Figur 15: Fordeling av pellets på havner

Den beste løsningen viser at det blir klare relasjoner mellom havner og de kundene de betjener. Disse relasjonene er vist i Tabell 22, og veinettet er tegnet inn i Figur 14. Som regel blir kunder betjent fra havnen som er nærmest lokalisert, men samme kunde kan være forsynt fra flere havner. Blant annet samarbeider Drammen, Moss og Fredrikstad om å forsyne Oslo. I Tabell 22 kan man se hvor stor andel av en kundes etterspørsel som blir dekt av en aktuell havn.

Tabell 22: Relasjoner mellom havner og kunder

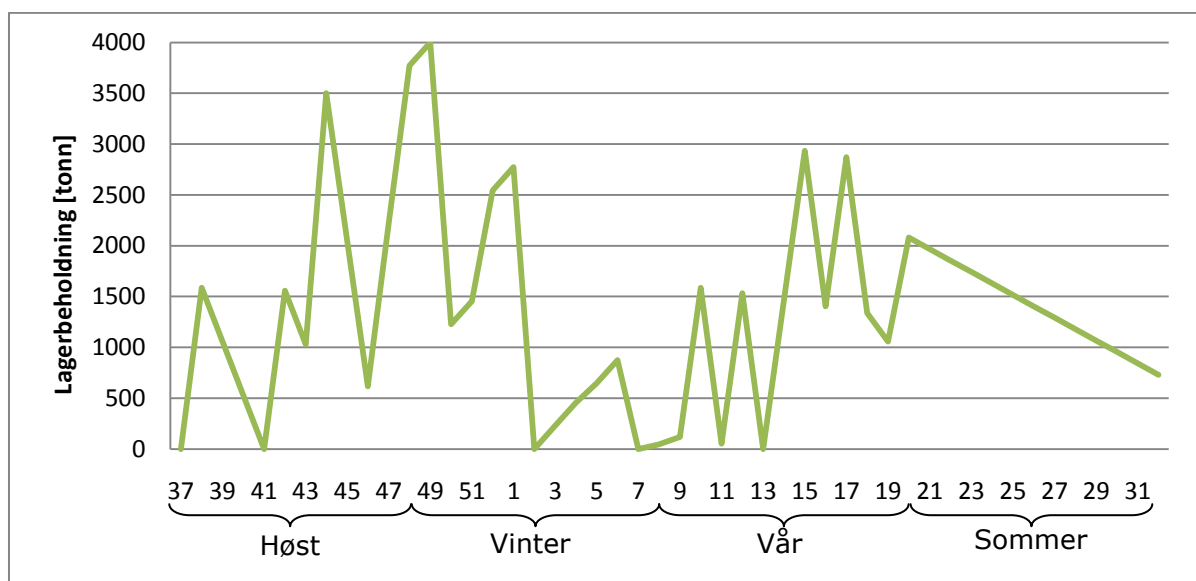
Havn	Kunde	Andel av kundes etterspørsel dekt av havn [%]
Trondheim	Trondheim	98,8
BIOWOOD	Kristiansund	100,0
	Ålesund	7,2
	Trondheim	3,3
Molde	Molde	100,0
	Ålesund	94,6
Florø	Florø	93,6
	Førde	91,7
	Voss	8,3
Bergen	Bergen	100
	Voss	90,3
	Haugesund	23,8
	Førde	3,3
Stavanger	Stavanger	100,0
	Haugesund	76,2
	Mandal	4,7
Kristiansand	Kristiansand	96,8
	Arendal	96,8
	Mandal	93,9
Larvik	Porsgrunn	100,0
	Skien	100,0
	Larvik	100,0
	Sandefjord	100,0
	Tønsberg	100,0
Drammen	Drammen	100,0
	Bærum	100,0
	Oslo	87,0
	Ringerike	27,5
Moss	Moss	99,2
	Sarpsborg	6,1
Fredrikstad	Fredrikstad	100,0
	Sarpsborg	93,9

Med tanke på forsyning er det Trondheim og Drammen som er de viktigste havnene. Disse to havnene forsyner henholdsvis 14,8 % og 43,6 % av den totale etterspørselen. Til sammen utgjør det mer enn halvparten av alt forbruk av pellets. Havnen i Trondheim forsyner kun kunder i Trondheimsområdet, mens havnen i Drammen betjener kundene i Drammen, Ringerike, Bærum og Oslo.

6.1.5 Lagerbeholdning

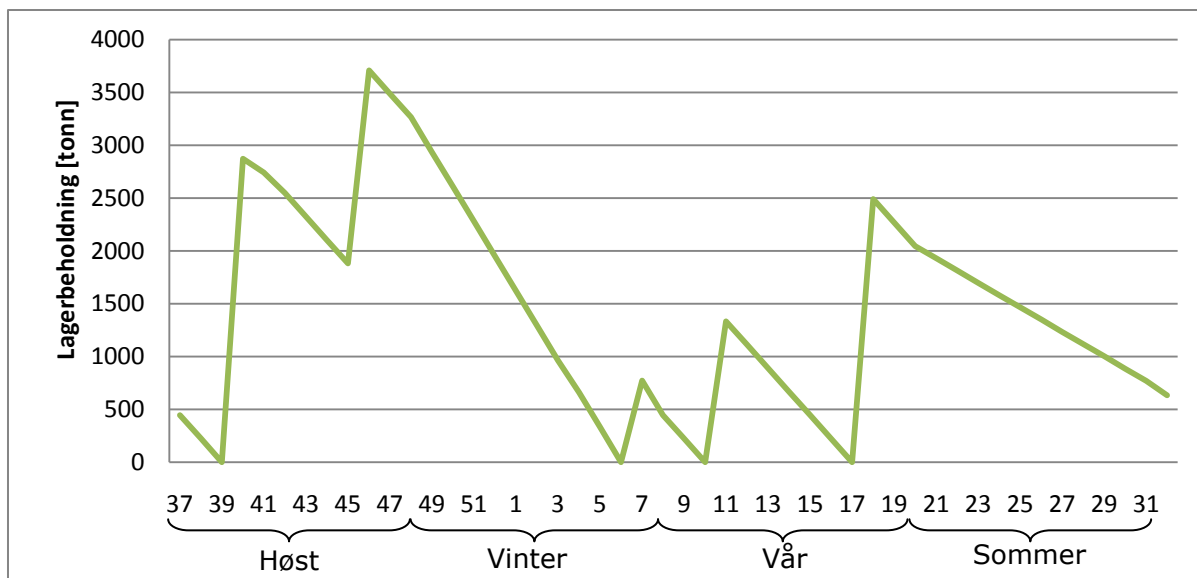
I den beste løsningen er det tydelig å spore to ulike trender med tanke på lagerbeholdning. Havnelageret i henholdsvis Drammen og Fredrikstad trekkes frem for å eksemplifisere hver sin trend.

Figur 16 viser endringer i lagerbeholdningen i Drammen, der den horisontale akse viser ukenummer, mens den vertikale akse viser antall tonn pellets lagret i havnen ved slutten av uken. Lagerbeholdningen er blitt tilnærmet med en kontinuerlig fordeling. Vi ser at det mottas jevnlig leveranser, slik at lageret veksler hyppig mellom lav og høy beholdning. Vi ser at lagerbeholdningen er høyere den siste måneden av høsten. Dette skyldes at lageret fylles opp før den kommende vinteren som har økt etterspørsel. På den måten avlastes skipet i de hektiske vintermånedene. Lagerbeholdningen i selve vinterperioden er liten til tross for store leveringer i hele perioden, noe som også skyldes den økte etterspørselen. Som tidligere kommentert leies det ikke inn noe skip om sommeren. Det gjør at lageret fylles opp på slutten av vårsesongen og avtar lineært hele sommeren.



Figur 16: Lagerbeholdning i Drammen ved hovedscenario

Havnelageret i Fredrikstad er et eksempel på en annen trend, slik vi ser av Figur 17. Havnen mottar kun fem leveranser i løpet av et år. Ved leveranse fylles lageret til et nivå som gjør at etterspørselen til de tilknyttede kundene kan dekkes for en lengre periode. Lagerbeholdningen avtar lineært frem til neste leveranse. Vi ser hvordan lagerbeholdningen avtar saktere etter uke 20. Det markerer inngangen til sommersesongen der det kun er industrien som etterspør pellets. Florø, Bergen og Stavanger har liknende struktur på sine lagre, med to til tre leveranser per år.



Figur 17: Lagerbeholdning i Fredrikstad ved hovedscenario

6.2 NULLPUNKTSANALYSE

Som nevnt innledningsvis er formålet med rapporten å anslå lønnsomheten ved maritim distribusjon av trepellets langs kysten av Norge. Lønnsomheten er naturlig nok sensitiv for endring i inndata. I den forbindelse vil det være interessant å utføre nullpunktsanalyser (*Break-even*). Det vil si analyser som fastslår hvor mye inndataene kan endres før lønnsomheten går akkurat i null.

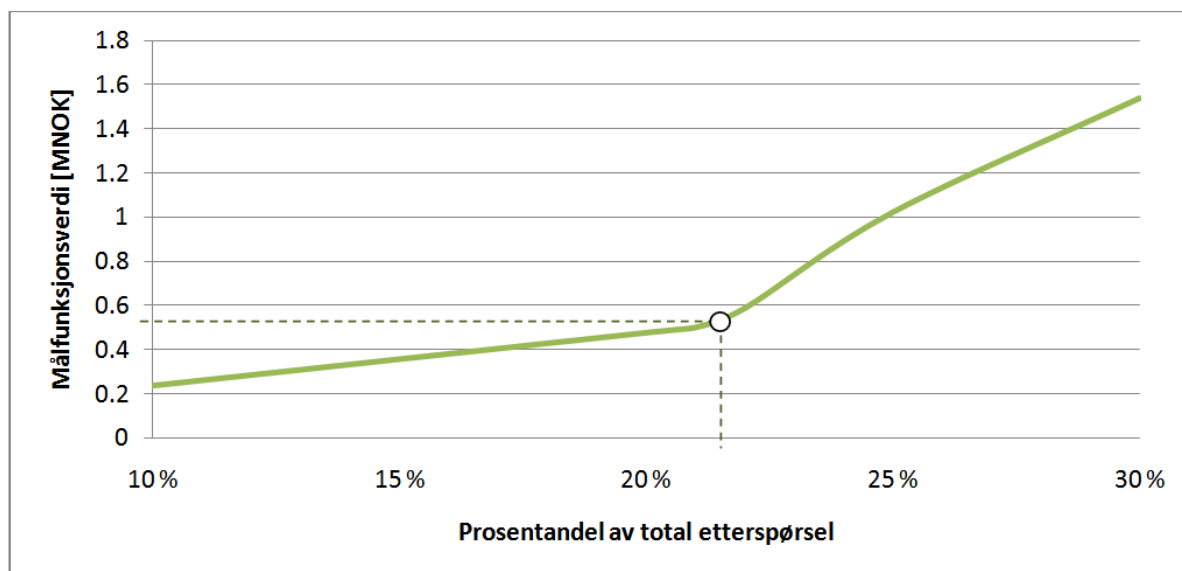
Som den økonomiske analysen av hovedscenarioet ga uttrykk for, så er salgsinntekter og produksjonskostnader de viktigste inntekts- og kostnadsleddene i modellen. Disse leddene avhenger i hovedsak av de to faktorene salgspris/produksjonskostnad per tonn og etterspørsel, der etterspørselen representerer mengde pellets produsert og solgt. Det gjør det naturlig å foreta en nullpunktsanalyse først av etterspørselen, deretter av differansen mellom salgspris og produksjonskostnad per tonn. Øvrige inndata beholdes uendret.

6.2.1 Nullpunktsanalyse av total etterspørsel

Under nullpunktsanalysen av etterspørselen er det den totale etterspørselen som endres, altså både etterspørsel knyttet til oppvarming og knyttet til industri. Det innebærer en antakelse om at disse endres i takt. Begrunnelsen for denne antakelsen er at mindre etterspørsel knyttet til oppvarming gir mindre pellets i omløp. Industribedrifter er avhengig av stor leveringssikkerhet og denne avtar dersom det er mindre pellets i omløp. Det kan gjøre industribedriftene mindre tilbøyelige til å konvertere til bruk av pellets, og industrietterspørselen avtar følgelig. Tilsvarende kan økt etterspørsel av pellets til oppvarming gi økt etterspørsel til bruk i industri.

Ingen lønnsomhet i den maritime distribusjonen betyr i vår modell at ingen skip benyttes. Nullpunktsanalysen viser at dersom den totale etterspørselen reduseres til under 22 % av hovedscenarioets nivå, hvilket tilsvarer drøye 35 000 tonn pellets per år, benyttes ingen skip. Dette er illustrert i Figur 18, der

nullpunktet er markert. Ved en slik etterspørsel gir modellen fremdeles et overskudd på drøye 0,5 MNOK. Det er landbasert transport direkte fra produsenten til nærliggende kunder som gir dette overskuddet. Det er oppsiktsvekkende at den forventede etterspørselen kan reduseres med nesten 80 % før den maritime distribusjonen viser seg ulønnsom. Det bidrar til å gjøre konklusjonen etter hovedscenarioet mer robust.



Figur 18: Nullpunktsanalyse av total etterspørsel

Prosentandeler høyere enn 30 % er ikke tatt med i Figur 18, men det kan nevnes at kurven stiger tilnærmet lineært i intervallet mellom 30 og 100 %. Stignings-tallet er omtrent som vist i intervallet mellom 25 og 30 %.

6.2.2 Nullpunktsanalyse av dekningsbidrag

Som kommentert er produsert mengde pellets lik solgt mengde. Det gjør at en reduksjon i salgspris gir samme effekt som en tilsvarende økning i produksjonskostnad per tonn. Av den grunn skiller det ikke på om det er salgsprisen eller produksjonskostnaden per tonn som endres. Det interessante er differansen mellom de to. Det kan ses på som et slags dekningsbidrag. En nullpunktsanalyse viser at dekningsbidraget må minimum være 175 NOK per tonn pellets for at maritim distribusjon skal være lønnsomt. Til sammenlikning var dekningsbidraget i hovedscenarioet 300 NOK per tonn.

Resultatet fra nullpunktsanalysen betyr at salgsprisen kan avta med inntil 8 % og den maritime distribusjonen er fremdeles lønnsom. På samme måte kan ikke produksjonskostnad per tonn økes med mer enn 10 % for at distribusjonen skal være lønnsom. Det er tydelig å se at lønnsomheten er langt mer sensitiv i forhold til dekningsbidrag enn i forhold til etterspørsel. Det har tidligere blitt vist hvordan salgspris varierer. Det er det vanskelig å gjøre noe med. Produksjonskostnadene kan det imidlertid gjøres noe med, og det er essensielt at disse holdes lavest mulig.

6.3 ØVRIGE SCENARIOER

For å utfordre inndataene i hovedscenarioet ytterligere vil det nå bli utført økonomiske analyser av flere ulike scenarioer. Vår optimeringsmodell er som tidligere kommentert deterministisk og betrakter ikke usikkerhet ved inndataene eksplisitt. Ved å gjennomføre ulike kjøringar der etterspørselen varieres, kartlegges likevel flere mulige utfall av distribusjonen.

6.3.1 Scenario med ingen industrietterspørsel

Etterspørselstallene for industrien er basert på dagens forbruk av lettolje. Konvertering fra fyring med lettolje til fyring med pellets er forholdsvis rimelig og enkelt. Det er likevel knyttet usikkerhet til hvor stor andel av industrien som faktisk vil foreta denne konverteringen. I verste fall, sett fra et lønnsomhetsperspektiv, faller all industrietterspørsel bort. I et slikt tilfelle ender distribusjonsnettverket opp med et overskudd på 10,5 MNOK. Av etterspørselen knyttet til oppvarming blir 99,6 % dekt. Det blir da benyttet ett skip med lastekapasitet på 3000 tonn både om høsten og vinteren, samt ett skip med kapasitet 1500 tonn om våren. Det er naturlig som følge av den høye etterspørselen om vinteren. Om høsten fylles lagerbeholdningene opp, mens om vinteren kreves store leveranser. Om våren er etterspørselen lav, og da er det tilstrekkelig med et skip med kapasitet 1500 tonn.

6.3.2 Scenarioer med varierende etterspørsel

Den totale etterspørselen bygger på forventede fremtidige verdier, og innebærer således usikkerhet. Av den grunn betraktes flere scenarioer som tar for seg ulike nivåer av den totale etterspørselen. De fem scenarioene presenteres i Tabell 23.

Tabell 23: Definisjon av øvrige scenarioer og deres bruk av skip

Scen.	Andel av total etterspørsel	Bruk av skipskapasitet [tusen tonn]				Utnyttelsesgrad	
		Sesong				Seiletid	Last
		1	2	3	4		
A	100 %	3,0	3,0	3,0	0,0	88,1 %	68,2 %
B	75 %	3,0	3,0	1,5	0,0	84,8 %	65,5 %
C	50 %	1,5	3,0	0,0	0,0	84,6 %	64,2 %
D	25 %	1,5	0,0	0,0	0,0	85,4 %	68,5 %
E	22 %	0,0	0,0	0,0	0,0	N/A	N/A

Det er kun etterspørselen som endres i scenarioene. Scenario A beskriver hovedscenarioet, mens i scenario B til D er den totale etterspørselen satt til å være en prosentandel av etterspørselen i hovedscenarioet. Scenario E beskriver den tidligere omtalte nullpunktsanalysen av den totale etterspørselen. Det er reduksjon av etterspørselen som er kritisk i forhold til lønnsomheten ved distribusjonsnettverket. Det er grunnen til at samtlige av scenarioene er blitt tildelt en etterspørsel lavere enn ved hovedscenarioet.

Vi ser av Tabell 23 at antall skip som blir brukt og deres kapasitet reduseres ettersom etterspørselen reduseres. Det interessante er at utnyttelsesgraden, både i forhold til seiletid og lastmengde, holder seg ganske stabil. Det indikerer at modellen er i stand til å designe flåter som er passende i forhold til flere etterspørselsnivåer. Denne fleksibiliteten bidrar til å forklare hvorfor lønnsomheten ikke er spesielt sårbar for endringer i etterspørselen. Tabell 24 beskriver noen av de økonomiske resultatene til scenarioene.

Tabell 24: Økonomiske resultater for de øvrige scenarioene

Scen.	# lager i bruk	# industri-kunder betjent	Fraktet [tusen tonn]	Etterspørsel dekt	Mål.verdi [MNOK]	Gap
A	10	25	150,0	93,8 %	18,32	8,4 %
B	10	25	119,5	99,8 %	12,28	2,2 %
C	8	22	73,0	93,2 %	6,19	7,2 %
D	6	18	26,8	70,8 %	0,98	7,4 %
E	0	4	6,2	24,3 %	0,53	0,0 %

Ved å sammenlikne scenario A med B ser vi at 25 % reduksjon av etterspørsel har liten effekt på distribusjonsnettverket. Det er de samme lagrene som benyttes og samtlige industrikunder betjenes. Noe som skiller de to er at i scenario B leies det om våren inn et skip med kapasitet på 1500 tonn fremfor 3000 tonn. Naturlig nok er målfunksjonsverdien i scenario B lavere enn i A, noe som skyldes den reduserte mengden pellets solgt. Vi ser imidlertid at den reduserte etterspørselen gjør skipene og lagerfasilitetene bedre i stand til å betjene kundene, ved at en større andel av etterspørselen imøtekommes.

Det er først i scenario C, når etterspørselen halveres i forhold til hovedscenarioet, at strukturen på verdikjeden endres nevneverdi. Færre havner tildeles lagerfasiliteter, noe som gjør at enkelte industrikunder ikke mottar leveranser. De tre industrikundegruppene som ikke betjenes er Mandal, Kristiansand og Arendal. Grunnen til det er at havnen i Kristiansand ikke tildeles lager, noe som gir høye landbaserte kostnader ved å betjene disse industrikundene. Scenario D opererer med en etterspørsel marginalt høyere enn nullpunktsomsetningen. Det gjør at ett skip med kapasitet 1500 tonn benyttes om høsten. Antall lager og industrikunder er redusert betraktelig fra de øvrige scenarioene. At kun 70,8 % av etterspørselen dekkes, skyldes at etterspørselen er for lav til å gjøre nevneverdige investeringer i skip og lagerfasiliteter.

7 VIDERE ARBEID

Etter gjennomført analyse vil det være hensiktsmessig å kommentere hvordan arbeidet kan videreføres i fremtiden. Den matematiske formuleringen kan bygges på og modifiseres, noe som vil kunne gi positive bidrag til en fremtidig analyse. Det kan nevnes at løsningene som ble funnet ikke ble bevist som optimale. Løsningen ved grunnmodellen var potensielt langt unna optimum, men etter testing med blant annet symmetri- og lineærkutt ble differansen mellom beste løsning og øvre grense redusert. Det finnes imidlertid et potensial for å redusere denne differansen ytterligere. Det kan gjøres ved innføring av flere kutt, eller ved utvikling av nye løsningsalgoritmer.

I vår analyse er det blitt utført en rekke kjøring som simulerer ulike scenarioer. Hensikten er å ta høyde for mulige endringer i inndata. Dette kan imidlertid også gjøres ved å håndtere usikkerheten i inndataene eksplisitt i modellen. I så måte vil modellen endre karakter fra deterministisk til stokastisk. En stokastisk modell vil bidra til å gjøre eventuelle investeringsbeslutninger mer robuste.

Som tidligere kommentert har problemet i vår analyse ikke tidligere blitt undersøkt. Det gjorde det ønskelig med en eksplisitt formulering av rutene og deres restriksjoner, slik at karakteristikene ved problemet skulle bli mest mulig synlige. For å bli fortrolig med problemet ble det benyttet en *arc flow*-formulering. Etter hvert som problemet og dets karakteristikk nå er blitt mer og mer kjent, kan problemet omformuleres til en flytmodell av typen *path flow*. Det kan være interessant ettersom *path flow* i enkelte sammenhenger har vist seg å være bedre egnet enn *arc flow* til å håndtere store problemer. *Path flow* kan med andre ord potensielt øke skalerbarheten til modellen, slik at flere skip, havner og kunder kan inngå. Det kan da også bli aktuelt å kjøre analysen over en lengre tidshorisont enn ett år.

En mulighet er å utvide formuleringen slik at skip og lagerfasiliteter også kan leies inn for korte perioder, såkalt *spot*. Dette kan være aktuelt for å dekke behovet i perioder med underkapasitet. Bruk av spot på skip åpner muligheten for å utnytte maritime distribusjonsnettverk langs norskekysten som allerede eksisterer i andre industrier. Dette er spesielt gunstig i perioder da det er lite kapasitetsbehov i industrien det leies skip fra, mens det er stort behov i industrien det leies skip til. Muligheter for å utnytte allerede eksisterende landbaserte distribusjonsnettverk kan også undersøkes.

I vår analyse er produksjonshavnen lokalisert nord for alle havner som kan besøkes, med unntak av Trondheim. Det utnyttes med en formulering som forutsetter at alle besøkshavner er lokalisert langs en bue som peker i én og samme retning fra produksjonshavnen. En slik formulering har vist seg naturlig for å besvare vår problemstilling. I fremtiden er det et potensial for å gjøre formuleringen enda mer generell. Formuleringen kan endres slik at seiling ut ifra produksjonshavnen i flere geografiske retninger tillates. Det kan eksempelvis gjøres ved å innføre en indeks som angir geografisk retning, og på den måten

definere en siste havn som besøkes og en hovedrute i hver av de ulike retningene. En slik formulering ville i vårt tilfelle åpnet muligheten for forsyning av kunder også nord for Trondheim. Andre muligheter som åpner seg er å erstatte produsenten med en annen produsent eller importør lokalisert vilkårlig langs norskekysten.

8 KONKLUSJON

Hovedscenarioet resulterer i en årlig profitt på 18,3 MNOK, og maritim distribusjon av trepellets langs norskekysten viser seg således som lønnsomt. Resultatet gir en driftsmargin på drøye 8 %. Det viser seg at 94 % av all etterspørsel dekkes på tross av at den er valgfri å imøtekomme. Samtlige industrikunder betjenes fullstendig. Analysen viser at dersom den årlige etterspørselen faller under 35 000 tonn i fylkene som grenser mot kyststripen mellom Trondheim og Fredrikstad, vil den maritime distribusjonen ikke lenger være lønnsom. Den forventede etterspørselen er til sammenlikning 160 000 tonn per år. En nullpunktsanalyse av differansen mellom salgspris og produksjonskostnad per tonn viser at differansen må minimum overstige 175 NOK. Følgelig vil en reduksjon i salgspris på mer enn 8 %, eller en økning i produksjonskostnad per tonn på mer enn 10 %, føre til at den maritime distribusjonen ikke lenger er lønnsom. Det viser at lønnsomheten er mer følsom for endringer i dekningsbidraget enn for endringer i etterspørselen.

I den beste løsningen leies det inn ett skip med kapasitet 3000 tonn høst, vinter og vår, mens ingen skip benyttes om sommeren. Seile- og skipskostnadene utgjør samlet de maritime transportkostnadene, og vi ser at disse kostnadene er langt høyere enn de øvrige kostnadene. Det gjør det interessant å betrakte skipets utnyttelsesgrad. Det viser seg at skipet utnytter 89,1 % av seiletiden det har til rådighet, mens det lastes med 68,3 % av kapasiteten det har til rådighet. Tallene indikerer at utnyttelsen er god, spesielt med tanke på at det er ønskelig med noe slakk. Full utnyttelse er ikke realiserbart.

10 av 13 mulige havner tildeles lagerfasiliteter, noe som gir en god geografisk spredning i distribusjonsnettverket. De tre havnene som ikke tildeles lager er alle lokalisert på Østlandet. Likevel er Østlandet godt representert i forhold til bruk av havner. Det er tydelig å spore en trend i skipsrutene, der havnene i henholdsvis Trondheim og Drammen besøkes svært ofte, samtidig som det leveres store kvantum. Besøksmønsteret er slik at mindre havner besøkes sjeldent, men når de først besøkes mottar de store kvantum. På den måten kan kundene forsynes fra lagerbeholdningen i lengre perioder.

Kjøring av ulike scenarioer der etterspørselen varieres viser naturlig nok at jo mer etterspørselen reduseres, desto færre havner tildeles lager, færre industrikunder betjenes, og mindre skip benyttes. Et interessant funn er imidlertid at utnyttelsesgraden til skipene holder seg noenlunde konstant mens etterspørselen varieres. Det gjelder både for utnyttelse i forhold til seiletid og lastmengde, noe som indikerer at modellen er i stand til å designe flåter som er passende til flere etterspørselsnivåer. Denne fleksibiliteten bidrar til å forklare hvorfor lønnsomheten ikke er spesielt sårbar for endringer i etterspørselen.

Grunnmodellen som kun inneholder de restriksjoner som er nødvendige for å beskrive problemet, makter ikke å bevise optimum. Differansen mellom målfunksjonens øvre grense og beste løsning funnet, det såkalte gapet, er stor.

Innføring av kutt som fjerner symmetri og tilleggsrestriksjoner som styrker lineærrelakseringen bidrar imidlertid til å redusere gapet fra 22,3 % til 7,8 % for hovedscenarioet. En differanse på 7,8 % regnes som akseptabelt tatt i betraktning usikkerheten i inndataene.

Endelig konklusjon blir at det i fremtiden vil være økonomisk lønnsomt med maritim distribusjon av trepellets langs norskekysten, forutsatt at den årlige etterspørselen overstiger 35 000 tonn i kystfylkene mellom Trondheim og Fredrikstad, og at differansen mellom salgspris og produksjonskostnad per tonn overgår 175 NOK.

9 BIBLIOGRAFI

Al-Khayyal, F. & Hwang, S.-J. 2007. Inventory constrained maritime routing and scheduling for multi-commodity liquid bulk. *European Journal of Operational Research*, 176, 106-130.

Andersson, H., Hoff, A., Christiansen, M., Hasle, G. & Løkketangen, A. 2010. Industrial aspects and literature survey: Combined inventory management and routing. *Computers and Operation Research*, 37, 1515-36.

Apxendex. 2011. Hentet 21. april 2011 fra "Market Pricing":
<http://www.apxendex.com/?id=315>

Askheim, L.F. 2011. Korrespondanse med Biowood Norway via e-post 23. februar 2011.

Bradley, D., Diesenreiter, F., Wild, M. & Tromborg, E. 2009. World biofuel maritime shipping study. *IEA Bioenergy*, 1-45.

Bunkerworld. 2010. Hentet 14. oktober 2010 fra "Bunkerworld Prices - LatestPrices": <http://www.bunkerworld.com/prices/>

Christiansen, M. 1999. Decomposition of a combined inventory and time constrained ship routing problem. *Transportation Science*, 33, 3-16.

Christiansen, M. & Fagerholt, K. 2009. Maritime inventory routing problems. In: Floudas, C. A. & Pardalos, P. M. (eds.) *Encyclopedia of Optimization*. New York: Springer, 1947-1955.

Christiansen, M., Fagerholt, K., Flatberg, T., Haugen, Ø., Kloster, O. & Lund, E. H. 2011. Maritime inventory routing with multiple products: A case study from the cement industry. *European Journal of Operational Research*, 208, 86-94.

Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B. & Ronen, D. 2007. Chapter 4: Maritime transportation. In: Barnhart, C. & Laporte, G. (eds.) *Handbooks in operations research and management science: Transportation*. Amsterdam: Elsevier, 14, 189-284.

Christopher, M. 2005. *Logistics and supply chain management: Creating value-added networks*, London, Pearson Education Limited.

Flatberg, T., Haavardtun, H., Kloster, O. & Løkketangen, A. 2000. Combining exact and heuristic methods for solving a vessel routing problem with inventory constraints and time windows. *Ricerca Operativa*, 29, 55-68.

Grønhaug, R., Christiansen, M., Desaulniers, G. & Desrosiers, J. 2010. A branch-and-price-and-cut method for a liquefied natural gas inventory routing problem. *Transportation Science*, 44, 400-415.

Grønhaug, R. 2010. Korrespondanse med Enova SF via e-post 13. september 2010.

- Grønhaug, R. 2011a. Muntlig korrespondanse med Enova SF 24. januar 2011.
- Grønhaug, R. 2011b. Muntlig korrespondanse med Enova SF 14. april 2011.
- Gunnarsson, H., Rönnqvist, M. & Carlsson, D. 2006. A combined terminal location and ship routing problem. *Journal of the Operations Research Society*, 57, 928-938.
- Gunnarsson, H., Rönnqvist, M. & Carlsson, D. 2007. Integrated production and distribution planning for Södra Cell AB. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 6, 25-45.
- Hwang, S.-J. 2005. *Inventory constrained maritime routing and scheduling for multi-commodity liquid bulk*. Ph.d. Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Ingeberg, K. 2010. Korrespondanse med Xrgia AS via e-post 5. oktober 2010.
- Lislebø, O. & Ingeberg, K. 2010. Scenarioanalyse - fungerende pelletsmarked. 1-56.
- Mani, S., Sokhansanj, S., Bi, X. & Turhollow, A. 2006. Economics of producing fuel pellets from biomass. *Applied engineering in agriculture*, 22(3), 421-26.
- Meyr, H., Wagner, M. & Rohde, J. 2002. Structure of advanced planning systems. In: Stadtler, H. & Kilger, C. (eds.) *Supply chain management and advanced planning - Concepts, models software and case studies*. Berlin, 99-104.
- Norsk bioenergiforening. 2010. Hentet 29. september 2010 fra "Bransjeregister": http://www.nobio.no/index.php?option=com_bransje&Itemid=114
- Norsk bioenergiforening. 2011a. Hentet 10. februar 2011 fra "Statistikk": http://www.nobio.no/images/stories/PDF/pris_og_salgsstatistikk_for_bioenergi_i_norge_2009.pdf
- Norsk bioenergiforening. 2011b. Hentet 22. mai 2011 fra "Statistikk": <http://www.nobio.no/images/stories/Statistikk/2010.pdf>
- Olsen, J. 2010. Korrespondanse med Wilh. Wilhelmsen Group via e-post 27. oktober 2010.
- Rakke, J. G., Stålhane, M., Rørholt Moe, C., Christiansen, M., Andersson, H., Fagerholt, K. & Norstad, I. 2010. A rolling horizon heuristic for creating a liquefied natural gas annual delivery program. *Transportation Research Part C*, doi: 10.1016/j.trc.2010.09.006.
- Sénéchal, S. & Grassi, G. 2009. Logistic management of wood pellets: Data collection on transportation, storage and delivery management. *EUBIA - European Biomass Industry Association*, 1-56.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P. & Simchi-Levi, E. 2003. *Designing and managing the supply chain: concepts, strategies and case studies*, New York, NY, McGraw-Hill Higher Education.

Sjølie, H. K. & Solberg, B. 2009. *Greenhouse gas implications by production of wood pellets at the Biowood Norway plant at Averøy, Norway*, Ås, Norwegian University of Life Sciences.

Skjevraak, G. 2010. Intervju gjennomført 13. oktober 2010 i Trondheim.

Spelter, H. & Toth, D. 2009. North America's wood pellet sector. *Department of agriculture, forest service, forest products laboratory*, 1-23.

Statistisk sentralbyrå. 2010. Hentet 20. september 2010 fra "Energibruk, etter kommune og energitype": <http://www.ssb.no/emner/01/03/10/energikomm/tab-2010-02-23-01.html>

Vi-Tre - Foredlet fjellskog. 2010. Hentet 18. september 2010 fra "Produktark": http://www.vi-tre.no/Customers/vitre/documents/pdf/Norsk_standard_for_trepellets.pdf

Viken skog. 2010. Hentet 23. september 2010 fra "Biobrensel, ved, flis og pellets": <http://www.viken.skog.no/default.php?aid=63>

World Shipping Register. 2010. Hentet 4. oktober 2010 fra "Sea Distances – Voyage Calculator": <http://www.e-ships.net/dist.htm>

10 APPENDIKS

A1 – Datainnsamling

Salgspris:

Modellen inneholder konstanten R som angir salgspris per tonn pellets, eksklusiv merverdiavgift. Merverdiavgiften ekskluderes fordi dette er penger som går fra sluttkunden til staten, og som dermed ikke bidrar til verdikjedens profitt. Verdi for salgspris er funnet ved å avrunde gjennomsnittlig pris for bulkbasert pellets i Norge i 2009. At tall for 2010 ikke er benyttet skyldes at de ikke var tilgjengelige på dette tidspunktet.

Salgspris pellets (øre/kWh) opplastet ved fabrikk eks. mva:

Småsekk	42,2
Storsekk	35,6
Bulk	31,1

(Norsk bioenergiforening, 2011a)

Rate:	4800 kWh/tonn pellets
Bulkpris per tonn:	1492,8 kr/tonn
Avrundet:	1500,0 kr/tonn

Produksjonskostnad:

Modellen inneholder konstanten C^P som angir produksjonskostnader per tonn pellets. Verdi for denne konstanten er funnet ved å summere opp anslagsvis råvare-, prosesserings- og kapitalkostnader.

Prosesseringskostnader	250 kr/tonn
Kapitalkostnader	100 kr/tonn
Råvarekostnader	850 kr/tonn
Produksjonskostnader	1200 kr/tonn

(Askheim, 2011)

Lastekapasitet på skip:

Modellen inneholder konstantene V_v^{KAP} som angir antall tonn pellets som er maksimal lastekapasitet hos skip v . Dette er verdier som ikke kan hentes fra noe sted, men som må fastsettes mest mulig hensiktsmessig. Det er to typer skip som er lettest tilgjengelige og som har fornuftig størrelse til å frakte pellets langs norskekysten. Det er skip som har kapasitet til å frakte opptil henholdsvis 1500 tonn og 3000 tonn pellets. (Skjevraak, 2010)

Leiekostnad for skip:

Modellen inneholder konstantene V_v^{KOST} som angir kostnad ved å leie skip v i én sesong. Utrekninger viser hvordan kostnadene for to skip med ulik kapasitet blir beregnet (Ingeberg, 2010). Først blir kostnad per distanse utledet, så regnes det på dags- og sesongrate per skip.

Antall tonn	1 500	3 000
DISTANSEKOSTNADER:		
Drivstoff	IFO	IFO
- Pris per volum [NOK/tonn]	3 000	3 000
- Forbruk per distanse [tonn/km]	0,015	0,022
Kostnad per distanse [NOK/km]	45	66
TIDSKOSTNADER:		
<i>Kapitalkostnader</i>		
Investeringsbeløp [NOK]	50 000 000	75 800 000
Antall år	20	20
Nominell rente	10 %	10 %
Annuitetsbeløp [NOK/år]	5 872 981	8 903 440
Dagrate kapital [NOK/dag]	16 090	24 393
<i>Lønnskostnader</i>		
Dagrate mannskap [NOK/dag]	6 700	10 414
<i>Vedlikeholdskostnader</i>		
Dagrate vedlikehold [NOK/dag]	3 207	5 203

Samlet

Dagrate per skip [NOK/dag]	25 997	40 010
Sesongrate per skip [NOK/sesong]	2 183 778	3 360 839

Sjøbaserte distanser:

Alle sjøavstander er kalkulert fra havnen i Kristiansund, ettersom det er havnen som er lokalisert nærmest pelletsprodusenten Biowood på Averøya. Legg merke til at Trondheim er tildelt avstanden null, mens alle havner i Oslo-fjorden har samme avstand. Dette er forklart under modellstrukturen i hovedrapporten. I de tilfellene det gjelder inngår de ekstra seilekostnadene i de faste havne-kostnadene.

Havn	Avstand fra Kristiansund* [nautiske mil]	Avstand fra Kristiansund [km]	Ekstra seilelengde ved besøk [km]	Dobbelt avstand korrigert for ekstra seillengde [km]
Trondheim	97,0	179,6	194,0	0,0
Molde	53,0	68,2	33,3	103,0
Florø	163,0	269,9	25,9	513,8
Bergen	232,0	429,7	18,5	840,8
Stavanger	321,0	594,5	44,4	1 144,5
Kristiansand	444,0	822,3	7,4	1 637,2
Skien	538,0	996,4	51,9	1 940,9
Larvik	532,0	985,3	9,3	1 961,3
Tønsberg**	560,0	1 037,1	7,4	2 074,2
Drammen**	560,0	1 037,1	144,5	2 074,2
Oslo	560,0	1 037,1	181,5	2 074,2
Moss**	560,0	1 037,1	59,3	2 074,2
Fredrikstad**	560,0	1 037,1	87,0	2 074,2

* Avstander fra Kristiansund er hentet fra www.e-ships.net/dist.htm
Kontrollert på "Sjøkart" (kart.gulesider.no)

** Alle havner i Oslo-fjorden har Oslo som siste havn.
Ekstra seilekostnader påløper havnen ved havnebesøk

Sjøbaserte kostnader:

Modellen inneholder konstantene C_{iv}^S som angir transportkostnader ved sjøbasert transport av skip v fra produksjonshavnen til havn i og tilbake igjen til produksjonshavnen. I henhold til antakelsene gjort tidligere er disse verdiene funnet ved å multiplisere skip v sitt drivstofforbruk per distanse (Olsen, 2010) med drivstoffpris (Bunkerworld, 2010) og distanse mellom produksjonshavn og havn i (World Shipping Register, 2010).

Havn	Kostnad fra Kristiansund (NOK), 1500 tonn	Kostnad fra Kristiansund (NOK), 3000 tonn
Trondheim	0	0
Molde	4 634	6 796
Florø	23 122	33 912
Bergen	37 836	55 493
Stavanger	51 504	75 539
Kristiansand	73 673	108 053
Skien	87 340	128 099
Larvik	88 257	129 444
Tønsberg	93 341	136 900
Drammen	93 341	136 900
Oslo	93 341	136 900
Moss	93 341	136 900
Fredrikstad	93 341	136 900

Seiletid:

Modellen inneholder konstantene T_i^S som angir tiden det tar å seile fra produksjonshavnen til havn i og tilbake igjen til produksjonshavnen. Denne tiden er beregnet ved å dele seiledistansen (World Shipping Register, 2010) på skipets hastighet (15 knop = 27,8 km/t). Det antas at et skip kan seile 18 timer per dag.

Havn	# dager for å seile til havn
Trondheim	0,7
BIOWOOD	0,0
Molde	0,3
Florø	1,1
Bergen	1,7
Stavanger	2,4
Kristiansand	3,3
Skien	4,0
Larvik	3,9
Tønsberg**	4,2
Drammen	4,4
Oslo	4,5
Moss	4,3
Fredrikstad	4,3

Seilingstidene danner utgangspunktet for konstantene M_i^{ANT} som angir antall seileruter som maksimalt tillates i løpet av én tidsperiode i havn i . Jo lengre seilingstid for å komme til en havn, desto færre seileruter tillates til havnen i løpet av en tidsperiode. Vi ser at en seilerute som ender i Kristiansand eller lenger vekk fra produksjonshavnen krever minimum $3,3 + 1 = 4,3$ dager. To eller flere slike seileruter tillates ikke i løpet av en tidsperiode som er på 7 dager. Det betyr at M_i^{ANT} er lik 1 for Kristiansand og havner lenger vekk. For øvrige havner er M_i^{ANT} satt lik 2. Dette på tross av at de havner lokalisert aller nærmest produsenten, f.eks. Molde, kan besøkes flere enn to ganger i løpet av en tidsperiode. En slik løsning fremstår imidlertid som svært lite sannsynlig.

Havnetid:

Modellen inneholder konstantene T_i^H som angir tiden det tar for et skip å avvike fra hovedruten og besøke havn i . Det innebærer å legge til kai, laste av pellets og forberede til videre seiling. Denne tiden er anslått til å være 1 dag per havn.

Havnekostnader:

Havnene er blitt valgt i samarbeid med Geir Skjevraak som har mye erfaring med pellets gjennom sitt arbeid i Statoil sin pelletssatsning.

I den matematiske modellen blir havnekostnader delt inn i faste- og variable kostnader. De faste kostnadene C_{iv}^H avhenger av innseilingsavstand til havn samt skipsstørrelse. De variable kostnadene C_i^V er oppgitt per metrisk tonn av varer som blir losset i havnen. Disse kostnadene avhenger av havnen lossingen foregår i.

Faste havnekostnader:

De faste havnekostnadene består av havneavgifter og kostnader for ekstra avstand skipene seiler når de avviker fra hovedruten for å besøke en havn. Havneavgifter består av anløps- og kaiavgifter som finnes for hver havn. I modellen vår seiler alle skip en hovedrute som går fra produksjonshavnen til en destinasjonshavn. Hvis skipet stopper ved en havn som er lokalisert på veien til destinasjonshavnen så må den avvike fra hovedruta. Denne innseilingsavstanden mellom hovedruta og havnen påfører skipet ekstra drivstoff- og tidskostnader. Disse kostnadene er en del av havnens faste kostnader.

Skipsstørrelse bestemmer anløps- og kaiavgifter som inngår i de faste havnekostnadene. Begge disse to avgiftene blir bestemt ut ifra båtens bruttotonnasje (BT)¹ eller skipets ytre mål G . Tommy Svendsen fra Oslo Havn KF har anslått at en last på 1500 tonn pellets vil kunne fraktes med et bulkskip på ca. 1500 BT (eller 300 G). En last på 3000 tonn pellets vil kreve et bulkskip på ca. 2500 bruttotonn (eller 500 G).

Anløpsavgiften påløper per anløp i avgiftsområde. Ved flere anløp til samme havn per døgn, betales avgiften bare en gang. Kaiavgiften betales per døgn båten ligger ved kaia. Liggetiden regnes fra fartøyet legger til og inntil det går fra kai. Kaiavgiften må betales for minst ett døgn. For beregning av anløps- og kaiavgiften brukes en tabell som viser avgiftsraten per bruttotonnasje. Båtene som går i rute får 10-20 % avslag på begge avgiftene i mange norske havner.

Andre gebyrer og avgifter som påløper skip ved havner og som regnes som faste kostnader per havn er blant annet sikkerhetsgebyr, gebyr for bruk av sjøområder, levering av vann, strøm og avfall, utleie av materiell og arbeidskraft. Mange av disse kostnadene er avhengig av mange ulike faktorer, men siden de er forholdsvis små, så holder vi dem på et gjennomsnittsnivå.

Havneavgiftene ble funnet på hjemmesidene til de ulike havnene under "Forskrift og havneregulativ", samt ved e-postutveksling med havneansatte.

¹ Bruttotonnasje(BT) er et mål for volumet av et skip, der man regner med rom for mannskapet, last og alle andre benyttede, innelukkede rom.

	<i>Havneavgift</i>		<i>Ekstra avstand</i>		<i>Totale faste havneknudnader</i>	
	<i>1500 tonn</i>	<i>3000 tonn</i>	<i>1500 tonn</i>	<i>3000 tonn</i>	<i>1500 tonn</i>	<i>3000 tonn</i>
<i>Havn</i>						
Trondheim	1 039,5	2 111,5	0,0	0,0	1 039,5	2 111,5
Molde	1 110,0	1 850,0	1 500,1	2 200,2	2 610,1	4 050,2
Florø	1 180,5	1 840,0	1 166,8	1 711,2	2 347,3	3 551,2
Bergen	1 251,0	1 831,0	833,4	1 222,3	2 084,4	3 053,3
Stavanger	1 704,0	2 624,0	2 000,2	2 933,6	3 704,2	5 557,6
Kristiansand	1 448,3	2 448,3	333,4	488,9	1 781,6	2 937,2
Skien	1 192,5	2 272,5	2 333,5	3 422,5	3 526,0	5 695,0
Larvik	1 122,0	2 010,0	416,7	611,2	1 538,7	2 621,2
Tønsberg	1 558,5	2 490,0	333,4	488,9	1 891,9	2 978,9
Drammen	1 995,0	2 970,0	3 833,6	5 622,7	5 828,6	8 592,7
Oslo	1 164,0	1 709,0	5 333,8	7 822,8	6 497,8	9 531,8
Moss	765,0	1 335,0	6 833,9	10 023,0	7 598,9	11 358,0
Fredrikstad	1 179,0	2 191,0	0,0	0,0	1 179,0	2 191,0

Variable havneknudnader:

Vareavgifter, kranleie, arbeidskraft og midlertidige lagerknudnader utgjør de variable knudnadene som påløper ved besøk av en havn. Vareavgiften beregnes for alle varer som fraktes med skip til eller fra havnen og som føres over kaier som eies eller disponeres av havnen. Beregningsgrunnlaget for vareavgiften er dens bruttovekt i metriske tonn. Hvis ikke vekten er oppgitt, regnes volumgods om til vektenhet. For tørr trelast er konverteringsraten som følger: 1 m³ = 0,650 tonn. Lagerknudnadene blir betalt til havnen for varer som lagres på havnevesenets kaier, arealer eller innretning over 48 timer etter lossing og over 48 timer før lastning tar til. Lagringsknudnader påløper per areal brukt eller per container plassert på havnens område. Knudnader forbundet med kranleie og arbeidskraft er anslått til å være 5 kr/tonn og legges til de havner som ikke kom med egne anslag for disse knudnadene.

Havn	Trondheim	Molde	Florø	Bergen	Stavanger	Kristiansand
V.kostnad. [kr/tonn]	13	11	13	12	9	11

Havn	Skien	Larvik	Tønsberg	Drammen	Oslo	Moss	Fredrikstad
V.kostnad. [kr/tonn]	13	18	14	13	14	21	24

Leiekostnader for lastebil:

Tidskostnadene for leie av lastebil er funnet ved å fordele de årlige kostnadene til trekkvogn, tilhenger og sjåfør på antall timer forventet kjøretid per lastebil per år (Ingeberg, 2010). Ved å anta en konstant hastighet på lastebilene er tidskostnadene blitt omregnet slik at de kan adderes til distansekostnadene, og resultatet er landbaserte transportkostnader per lastebil. Ved å dele denne kostnaden på lastekapasiteten til en lastebil er de landbaserte transportkostnadene per tonn funnet.

Antall tonn	33
-------------	----

TIDSKOSTNADER

Årlig kostnad [NOK/år]

- trekkvogn	1 400 000
- tilhenger	467 000
- sjåfør	500 000
Sum	2 367 000

Tid per sjåfør

- timer per uke	45
- uker per år	52
- timer per år	2 340
Antall sjåførere	1,5
Timer per år	3 510

Kostnad per tid [NOK/time]	674
----------------------------	-----

Snitthastighet [km/time]	50
--------------------------	----

Kostnad per distanse [NOK/km]	13,5
-------------------------------	------

DISTANSEKOSTNADER

Drivstoff

- Pris per volum [kr/l]	11
- Forbruk per distanse [l/km]	0,50

Kostnad per distanse [NOK/km]	6
-------------------------------	---

TOTALKOSTNADER

Kostnad per distanse [NOK/km]	19,0
-------------------------------	------

PER TONN

Kostnad per distanse [NOK/km]	0,575
-------------------------------	--------------

Landbaserte distanser:

Avstander mellom havner og kunder som blir betjent er hentet fra kart.gulesider.no. Tabellen viser dobbelt avstand – fram og tilbake. Dersom det står "N/A" i en rute, tillates ikke å levere fra havn til kunde.

Kunde/Havn	Tr.heim	Molde	Florø	Bergen	Stavanger	Kristiansand	Skien
Trondheim	0,0	431,0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Kristiansund	383,6	145,4	N/A	N/A	N/A	N/A	17,0
Molde	431,0	0,0	N/A	N/A	N/A	N/A	0,0
Ålesund	566,0	138,4	407,8	N/A	N/A	N/A	70,0
Førde	N/A	496,6	113,0	339,4	N/A	N/A	99,6
Florø	N/A	N/A	0,0	451,0	N/A	N/A	143,4
Bergen	N/A	N/A	451,0	0,0	357,4	N/A	N/A
Voss	N/A	N/A	459,0	197,2	N/A	N/A	N/A
Haugesund	N/A	N/A	N/A	232,8	100,6	N/A	N/A
Stavanger	N/A	N/A	N/A	357,4	0,0	N/A	N/A
Mandal	N/A	N/A	N/A	N/A	383,8	84,0	N/A
Kristiansand	N/A	N/A	N/A	N/A	466,0	0,0	N/A
Arendal	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	128,4	N/A
Porsgrunn	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	345,6	17,0
Skien	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	362,2	0,0
Larvik	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	70,0
Sandefjord	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	99,6
Tønsberg	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	143,4

Kunde/Havn	Larvik	Tønsberg	Drammen	Oslo	Moss	Fredrikstad
Arendal	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Porsgrunn	53,4	125,6	N/A	N/A	N/A	N/A
Skien	70,0	82,5	N/A	N/A	N/A	N/A
Larvik	0,0	76,0	N/A	N/A	N/A	N/A
Sandefjord	32,2	54,0	N/A	N/A	N/A	N/A
Tønsberg	76,0	0,0	117,8	N/A	N/A	N/A
Drammen	N/A	117,8	0,0	85,4	106,6	N/A
Ringerike	N/A	N/A	115,2	109,8	N/A	N/A
Bærum	N/A	N/A	56,8	27,8	N/A	203,2
Oslo	N/A	N/A	85,4	0,0	117,0	176,0
Moss	N/A	N/A	N/A	117,0	0,0	66,6
Sarpsborg	N/A	N/A	N/A	N/A	67,8	30,4
Fredrikstad	N/A	N/A	N/A	N/A	66,6	0,0

Landbaserte kostnader:

Modellen inneholder konstantene C_{ik}^L som angir kostnader per tonn pellets transportert landbasert mellom havn i og kunde k . I henhold til antakelsene gjort tidligere er de landbaserte transportkostnadene funnet ved å summere distanse- og tidskostnader. Distanssekostnadene er funnet ved å multiplisere drivstofforbruk per distanse med drivstoffpris (Ingeberg, 2010) med distanse mellom havn i og kunde k . Kostnadene i tabellen under er beregnet ved å multiplisere distanse med kostnad per distanse.

Kunde/Havn	Trondheim	Molde	Florø	Bergen	Stavanger	Kristiansand
Trondheim	0	248	N/A	N/A	N/A	N/A
Kristiansund	221	84	N/A	N/A	N/A	N/A
Molde	248	0	N/A	N/A	N/A	N/A
Ålesund	326	80	235	N/A	N/A	N/A
Førde	N/A	286	65	195	N/A	N/A
Florø	N/A	N/A	0	260	N/A	N/A
Bergen	N/A	N/A	260	0,0	206	N/A
Voss	N/A	N/A	264	114	N/A	N/A
Haugesund	N/A	N/A	N/A	134	58	N/A
Stavanger	N/A	N/A	N/A	206	0	N/A
Mandal	N/A	N/A	N/A	N/A	221	48
Kristiansand	N/A	N/A	N/A	N/A	268	0
Arendal	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	74
Porsgrunn	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	199
Skien	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	208
Larvik	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Kunde/Havn	Skien	Larvik	Tønsberg	Drammen	Oslo	Moss	Fredrikstad
Arendal	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Porsgrunn	10	31	72	N/A	N/A	N/A	N/A
Skien	0	40	83	N/A	N/A	N/A	N/A
Larvik	40	0	44	N/A	N/A	N/A	N/A
Sandefjord	57	19	31	N/A	N/A	N/A	N/A
Tønsberg	83	44	0	68	N/A	N/A	N/A
Drammen	N/A	N/A	68	0	49	61	N/A
Ringerike	N/A	N/A	N/A	66	63	N/A	N/A
Bærum	N/A	N/A	N/A	33	16	N/A	117
Oslo	N/A	N/A	N/A	49	0	67	101
Moss	N/A	N/A	N/A	N/A	67,3	0	38
Sarpsborg	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	39	18
Fredrikstad	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	38	0

Lagerkostnader:

Modellen inneholder konstantene C_i^W som angir faste lagerkostnader ved havn i . Det er blitt tatt utgangspunkt i et sylinderformet lager som rommer et visst volum pellets, og lageret har blitt tildelt en høyde samt en radius for grunnflaten. Lagerkostnadene beregnes etter arealet på grunnflaten. Grunnflaten er den samme i alle havner, så det er kostnaden per areal per døgn som skiller de ulike havnene fra hverandre. Disse verdiene er funnet på nettsidene til de respektive havnene eller ved korrespondanse med havneansatte via e-post. I de havnene der informasjonen har vist seg utilgjengelig, har et estimat blitt utarbeidet på bakgrunn av kostnader i havner av liknende størrelsesorden. Ettersom bruk av lagrene kontraktfestes for ett år om gangen, multipliseres lagerkostnadene per døgn med antall døgn analysen kjøres. Lagerkostnadene er oppgitt for en kvadratmeter per døgn i pakkhus eller skur ved havnen.

Havn	Trondheim	Molde	Florø	Bergen	Stavanger	Kristiansand
Lagring [kr/m ²]	8,22	4,7	2	4	3,2	4

Havn	Skien	Larvik	Tønsberg	Drammen	Oslo	Moss	Fredrikstad
Lagring [kr/m ²]	2	4	4	10	40	2	0,45

Pellets blir lagret i en silo på 4000 tonn pellets. Det blir tatt utgangspunkt i en silo med radius på 10 m og høyde på 20 m (tettheten til pellets er rundt 0,625 tonn/kubikkmeter). Dette gir en grunnflate på 314 kvadratmeter. Lageret må leies for et helt år.

Havn	Trondheim	Molde	Florø	Bergen	Stavanger	Kristiansand
[kr/år]	942 094	172 700	229 220	458 440	366 752	458 440

Havn	Skien	Larvik	Tønsberg	Drammen	Oslo	Moss	Fr.stad
[kr/år]	229 220	458 440	458 440	1 146 100	4 584 400	109 900	81 640

Nedre og øvre lagerbeholdning:

Modellen inneholder konstantene S_i og \bar{S}_i som angir henholdsvis minimum og maksimum lagernivå ved havn i . Siden modellen er deterministisk, så blir minimum lagernivå satt til å være 0 tonn. I praksis så opererer ofte lagrene med et sikkerhetslager. Maksimum lagernivå blir satt til å være 4000 tonn pellets (Skjevraak, 2010). Lagerbeholdningen i begynnelsen av året er lik halvparten av ukentlig etterspørsel i gitt område. Det kreves at lagerbeholdningen ved slutten av året er minimum den samme som ved starten av året.

Etterspørsel fra oppvarmingskunder:

Modellen inneholder konstantene D_{kt}^0 som angir antall tonn pellets etterspurt av oppvarmingskunde k i tidsperiode t . Verdiene er funnet ved først å fordele den nasjonale etterspørselen av pellets på de ulike fylkene som havnene er lokalisert i. Dagens etterspørsel er fordelt på bakgrunn av hvor mye biobrensel hvert enkelt fylke faktisk forbruker i løpet av et år (Statistisk sentralbyrå, 2010), mens fremtidens forventede etterspørselsøkning er fordelt på bakgrunn av hvor mye investeringsstøtte til pelletsrelaterte prosjekter hvert enkelt fylke har mottatt de siste årene (Grønhaug, 2010). Videre er fylkets etterspørsel blitt fordelt på de ulike kundene i fylket ut ifra innbyggertall. Jo høyere innbyggertall en kunde har i forhold til de øvrige kundene i fylket, desto større andel av fylkets etterspørsel tildeles kunden. Etterspørselstallene er så langt angitt per år. Året er blitt inndelt i fire sesonger: høst, vinter, vår og sommer. Årlig etterspørsel for hver enkelt kunde er blitt fordelt på de ulike sesongene (Skjevraak, 2010). Deretter er etterspørselstallene blitt delt på antall tidsperioder i sesongene, slik at de er angitt per tidsperiode. Det er viktig å merke seg at alle kundene som inngår i analysen er lokalisert i et fylke med kyststripe lokalisert sør for Trondheim. Det betyr at analysen ikke inkluderer kunder lokalisert på innlandet. Den aggregerte etterspørselen til alle kundene i analysen er dermed lavere enn den totale etterspørselen på landsbasis.

Data for 2009

	<i>Faktisk forbruk biobrensel [Gwh/år]</i>	<i>Vekt</i>	<i>Estimat forbruk pellets [tonn/år]</i>
<i>Totalt i Norge:</i>	12 445,20	100,00 %	43 000,00
Fylke			
Sør-Trøndelag	560,20	4,50 %	1 936,00
Møre og Romsdal	414,70	3,33 %	1 433,00
Sogn og Fjordane	249,40	2,00 %	862,00
Hordaland	563,20	4,53 %	1 946,00
Rogaland	458,20	3,68 %	1 583,00
Vest-Agder	307,00	2,47 %	1 061,00
Aust-Agder	233,40	1,88 %	806,00
Telemark	452,80	3,64 %	1 564,00
Vestfold	377,30	3,03 %	1 304,00
Buskerud	2 650,70	21,30 %	9 159,00
Oslo	465,40	3,74 %	1 608,00
Akershus	608,60	4,89 %	2 103,00
Østfold	1 709,60	13,74 %	5 907,00
Totalt for fylkene som er med:		72,73 %	

<i>Tildelt støtte [tonn/år]</i>	<i>Vekt</i>	<i>Estimat forbruk pellets 2013 [tonn/år]</i>
129 900,00	100 %	90 000,00
21 991,00	16,93 %	15 236,26
1 462,00	1,13 %	1 012,93
298,00	0,23 %	206,47
0,00	0,00 %	0,00
0,00	0,00 %	0,00
0,00	0,00 %	0,00
4 218,00	3,25 %	2 922,40
615,00	0,47 %	426,10
6 958,00	5,36 %	4 820,79
6 620,00	5,10 %	4 586,61
61 021,00	46,98 %	42 277,83
12 175,00	9,37 %	8 435,33
598,00	0,46 %	414,32
	89,27 %	80 339,03

Summen av estimert forbruk i 2009 og forventet forbruksvekst gir et estimat på total etterspørsel i 2013. At tall for 2009 er brukt skyldes at tall for 2010 ikke var tilgjengelig på dette tidspunkt. Etterspørselen blir så fordelt mellom byer ut ifra befolkningstallet i byene. Vinteretterspørsel utgjør 50 % av årlig etterspørsel, mens etterspørselen på vår/høst utgjør 25 %. Om sommeren antas oppvarmingskundene å ha ingen etterspørsel.

	<i>Befolkning i by</i>	<i>Sum befolkning i byer fra samme fylke</i>	<i>Vekting</i>	<i>Etterspørsel [tonn/år]</i>
Trondheim	172 000	172 000,00	100,00 %	17 172,26
Kristiansund	23 000	91 000,00	25,27 %	618,20
Molde	25 000		27,47 %	671,96
Ålesund	43 000		47,25 %	1 155,77
Førde	12 000	20 000,00	60,00 %	641,08
Florø	8 000		40,00 %	427,39
Bergen	258 000	272 000,00	94,85 %	1 845,84
Voss	14 000		5,15 %	100,16
Haugesund	34 000	159 000,00	21,38 %	338,50

Stavanger	125 000		78,62 %	1 244,50
Mandal	15 000	97 000,00	15,46 %	164,07
Kristiansand	82 000		84,54 %	896,93
Arendal	42 000	42 000,00	100,00 %	3 728,40
Porsgrunn	35 000	87 000,00	40,23 %	800,61
Skien	52 000		59,77 %	1 189,48
Larvik	42 000	124 000,00	33,87 %	2 074,52
Sandefjord	43 000		34,68 %	2 123,92
Tønsberg	39 000		31,45 %	1 926,34
Drammen	63 000	92 000,00	68,48 %	9 412,75
Ringerike	29 000		31,52 %	4 332,85
Bærum	112 000	112 000,00	100,00 %	10 538,33
Oslo	512 000	512 000,00	100,00 %	43 885,83
Moss	30 000	156 000,00	19,23 %	1 215,64
Sarpsborg	52 000		33,33 %	2 107,11
Fredrikstad	74 000		47,44 %	2 998,57

Etterspørsel fra industrikunder:

Modellen inneholder konstantene D_k^I som angir antall tonn pellets etterspurt av industrikunde k . Industrien krever stor leveringssikkerhet, og derfor kreves det at industrietterspørselen enten dekkes fullstendig eller ikke i det hele tatt. Ved inngåelse av kontrakt med en industrikunde blir etterspørselen lik hver eneste uke i løpet av hele året.

De tre vanligste typene brensel i industrien er lettolje, parafin og tungolje. Det er forholdsvis enkelt og rimelig å konvertere fra fyring med lettolje til fyring med pellets. Fremtidig etterspørsel fra industrien er derfor beregnet med utgangspunkt i dagens forbruk av lettolje på fylkesbasis (Grønhaug, 2011a). Fordelingen på kundegrupper er blitt gjort på samme måte som for oppvarmingskunder. I analysen blir det antatt at halvparten av lettoljen blir erstattet med pellets.

<i>Fylke</i>	<i>Industrietterspørsel [tonn/uke]</i>
Trondheim	205
Kristiansund	52
Molde	57
Ålesund	97
Førde	109
Florø	73
Bergen	150
Voss	8
Haugesund	53
Stavanger	195
Mandal	12
Kristiansand	63
Arendal	47
Porsgrunn	18
Skien	27
Larvik	107
Sandefjord	109
Tønsberg	99
Drammen	30
Ringerike	14
Bærum	35
Oslo	160
Moss	55
Sarpsborg	96
Fredrikstad	136

A2 – Matematisk formulering på kompakt form

$$\begin{aligned}
 \text{Max } z = & \sum_{i \in I \cup \{o\}} \sum_{k \in K_i} \sum_{t \in T} R \cdot f_{ikt} - \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M_i} C^P \cdot q_{ivtm} - \sum_{k \in K_o} \sum_{t \in T} C^P \cdot f_{okt} \\
 & - \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M_i} C_{iv}^S \cdot y_{ivtm} - \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M_i} C_{iv}^H \cdot x_{ivtm} \\
 & - \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M_i} C_i^V \cdot q_{ivtm} - \sum_{i \in I \cup \{o\}} \sum_{k \in K_i} \sum_{t \in T} C_{ik}^L \cdot f_{ikt} - \sum_{i \in I} C_i^W \cdot w_i \\
 & - \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} V_v^{KOST} \cdot u_{vp}
 \end{aligned}$$

slik at

$$\sum_{i \in I_m} y_{ivtm} \leq 1 \quad \forall v \in V, t \in T, m \in M \quad (1)$$

$$x_{ivtm} - \sum_{j \in I_m, j \geq i} y_{jvtm} \leq 0 \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T, m \in M_i \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I_m} q_{ivtm} - V_v^{KAP} \cdot u_{vp} \leq 0 \quad \forall v \in V, p \in P, t \in T_p, m \in M \quad (3)$$

$$q_{ivtm} - \text{Min}\{\bar{S}_i - \underline{S}_i, V_v^{KAP}\} \cdot x_{ivtm} \leq 0 \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T, m \in M_i \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I \cup \{o\}} f_{ikt} - D_k^I \cdot b_k \leq D_{kt}^O \quad \forall k \in K, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I \cup \{o\}} f_{ikt} - D_k^I \cdot b_k \geq 0 \quad \forall k \in K, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{m \in M_i} x_{ivtm} - M_i^{ANT} \cdot w_i \leq 0 \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T \quad (7)$$

$$s_{it} + \sum_{k \in K_i} f_{ikt} - \sum_{v \in V} \sum_{m \in M_i} q_{ivtm} - s_{i(t-1)} = 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} T_i^S \cdot y_{ivtm} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} T_i^H \cdot x_{ivtm} \leq T^{ANT} \quad \forall v \in V, t \in T \quad (9)$$

$$s_{i0} - S_i^S \cdot w_i = 0 \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$s_{iT} - S_i^E \cdot w_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$s_{it} - \underline{S}_i \cdot w_i \geq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (12)$$

$$s_{it} - \bar{S}_i \cdot w_i \leq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (13)$$

$$q_{ivtm} \geq 0 \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T, m \in M_i \quad (14)$$

$$f_{ikt} \geq 0 \quad \forall i \in I \cup \{0\}, k \in K, t \in T \quad (15)$$

$$s_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \cup \{0\} \quad (16)$$

$$x_{ivtm}, y_{ivtm} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T, m \in M_i \quad (17)$$

$$u_{vp} \in \{0,1\} \quad \forall v \in V, p \in P \quad (18)$$

$$w_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (19)$$

$$b_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K \quad (20)$$

A3 – Kildekode

```
!*****!  
! Dette er kildekode til en masteroppgave skrevet ved NTNU ved !  
! "Institutt for industriell økonomi og teknologiledelse" med !  
! fordypning i "Anvendt økonomi og optimering". Tittelen for oppgaven !  
! er "Optimeringsbasert beslutningsstøtte for distribusjon av fornybar !  
! energi i maritime verdikjeder". !  
! !  
! Problemstilling: Er det økonomisk lønnsomt å distribuere pellets !  
! ved hjelp av bulkbasert maritim transport langs norskekysten? !  
! !  
! Koden er skrevet av Kristian Andersen og Aslanbek Sjamsutdinov våren !  
! 2011 !  
!*****!
```

```
model OptimeringAvVerdikjedenTilPellets  
    ! Gjør at ";" skiller ulike uttrykk  
    options explterm  
    ! Slår av underforståtte deklarasjoner  
    options noimplicit  
    ! Gir tilgang til Xpress-Optimizer problemløser  
    uses "mmaxprs";  
  
parameters  
    ! Fil som data leses fra  
    DataFil = 'Inndata_301515.txt';  
  
    Original = true;  
    Presolve = true;  
    Heuristic = true;  
    ! Under "Branching" kan det velges mellom "Best" eller "Depth"  
    Branching = 'Best';  
    ! Under "Cutting" kan det velges mellom "Yes" eller "No"  
    Cutting = 'Yes';  
end-parameters  
  
declarations  
    ! Antall havner i modellen  
    nHavner : integer;  
    ! Antall kunder i modellen  
    nKunder : integer;  
    ! Antall skip i modellen  
    nSkip : integer;  
    ! Antall tidsperioder i modellen  
    nTidsperioder : integer;  
    ! Antall sesonger i modellen  
    nSesonger : integer;  
    !Antall besøk  
    nBesok : integer;  
    !Antall dager i en tidsperiode  
    nDager : integer;  
end-declarations  
  
initializations from DataFil  
    nHavner;  
    nKunder;  
    nSkip;  
    nTidsperioder;  
    nSesonger;
```

```

nBesoek;
nDager;
end-initializations

declarations
! Sett av indekser for havner
Havner      : set of integer;
! Sett av indekser for kunder
Kunder      : set of integer;
! Sett av indekser for skip
Skip        : set of integer;
! Sett av indekser for tidsperioder
Tidsperioder : set of integer;
! Sett av indekser for sesonger
Sesonger    : set of integer;
! Sett av indekser for antall besøk
Besoek      : set of integer;
end-declarations

!*****!
! INDEKSER!
!*****!

Havner      := 1 .. nHavner;
Kunder      := 1 .. nKunder;
Skip        := 1 .. nSkip;
Tidsperioder := 1 .. nTidsperioder;
Sesonger    := 1 .. nSesonger;
Besoek      := 1 .. nBesoek;

finalize(Havner);
finalize(Kunder);
finalize(Skip);
finalize(Tidsperioder);
finalize(Sesonger);
finalize(Besoek);

!*****!
! KONSTANTER!
!*****!

declarations
! Salgspris per tonn pellets
SALGSPRIS      : real;
! Produksjonskostnad per tonn pellets
PRODUKSJONSKOSTNAD : real;
! Fast kostnad ved besøk av en havn av et skip
FASTHAVNEKOSTNAD  : array(Skip, Havner) of real;
! Variabel kostnad per tonn pellets losset ved en havn
VARIABELHAVNEKOSTNAD : array(Havner) of real;
! Kostnad ved sjøbasert transport med et skip mellom produsent og
! en havn
SJOETRANSPORTKOSTNAD : array(Skip, Havner) of real;
! Kostnad per tonn pellets transportert landbasert mellom en havn
! og en kunde
LANDTRANSPORTKOSTNAD : array(Havner + {nHavner+1}, Kunder)
of real;
! Lagerkostnad per år ved en havn
LAGERKOSTNAD      : array(Havner) of real;
! Antall tonn pellets etterspurt av en kunde per tidsperiode i en
! sesong

```

```

ETTERSPOERSEL           :   array(Kunder, Sesonger) of real;
! Antall tonn pellets etterspurt av en industrikunde per tidsperiode
! i en sesong
INDUSTRIETTERSPOERSEL   :   array(Kunder) of real;
! Antall tonn pellets som er maksimum lastekapasitet hos et skip
SKIPSKAPASITET         :   array(Skip) of real;
! Antall tonn pellets som er minimum lagernivå hos havn
MINLAGERNIVAA          :   array(Havner) of real;
! Antall tonn pellets som er maksimum lagernivå hos havn
MAXLAGERNIVAA          :   array(Havner) of real;
! Matrise som viser hvilke havner som kan forsyne hvilke kunder
! Er lik 1 hvis det tillates transport mellom en havn og en kunde,
! er ellers lik 0
HAVNKUNDEMATRISSE      :   array(Kunder, Havner + {nHavner+1})
                          of integer;

! Navn på de ulike havnene
HAVNENAVN              :   array(Havner) of string;
! Navn på de ulike kundene
KUNDENAVN              :   array(Kunder) of string;
! Definerer lagerbeholdning ved de ulike havnene ved begynnelsen av
! første periode
STARTLAGER             :   array(Havner) of real;
! Definerer lagerbeholdningen ved de ulike havnene ved slutten av
! siste periode
SLUTTLAGER             :   array(Havner) of real;
! Fast kostnad ved bruk av et skip i en sesong
FASTSKIPSKOSTNAD       :   array(Skip) of real;
! Matrise som viser hvilken sesong en gitt tidsperiode tilhører
TIDSPERIODESESONG      :   array(Tidsperioder) of real;
!Tiden det tar å seile direkte fra produsent til en havn og tilbake
! igjen til produsenten
SJOETID                :   array(Havner) of real;
!Tiden det tar å besøke en havn
HAVNETID               :   array(Havner) of real;
! Matrise som viser hvilke seileruter en havn kan besøkes på
TILLATTEBESOEKIHAVN   :   array(Havner) of real;

PROSENT                :   real;
end-declarations

```

initializations from DataFil

```

SALGSPRIS;
PRODUKSJONSKOSTNAD;
FASTHAVNEKOSTNAD;
VARIABELHAVNEKOSTNAD;
SJOETRANSPORTKOSTNAD;
LANDTRANSPORTKOSTNAD;
LAGERKOSTNAD;
ETTERSPOERSEL;
INDUSTRIETTERSPOERSEL;
SKIPSKAPASITET;
MINLAGERNIVAA;
MAXLAGERNIVAA;
HAVNKUNDEMATRISSE;
HAVNENAVN;
KUNDENAVN;
STARTLAGER;
SLUTTLAGER;
FASTSKIPSKOSTNAD;
TIDSPERIODESESONG;
SJOETID;

```

```

HAVNETID;
TILLATTEBESOEKIHAVN;
end-initializations

PROSENT :=1;

!*****!
!  VARIABLER
!*****!

declarations
! Binær variabel som er lik
!  1 hvis havnen hh besøkes av skip ss i tidsperiode tt på seilerute
!  nummer bb,
!  0 ellers
erHavnenBesoekt :   dynamic array(Havner, Skip, Tidsperioder, Besoek)
                  of mpvar;

! Binær variabel som er lik
!  1 hvis havnen hh er den siste som besøkes av skip ss i tidsperiode
!  tt på seilerute nummer bb,
!  0 ellers
erSisteHavn      :   dynamic array(Havner, Skip, Tidsperioder, Besoek)
                  of mpvar;

! Binær variabel som er lik
!  1 hvis det opprettes lagerfasiliteter ved havn hh,
!  0 ellers
harLager         :   dynamic array(Havner)   of mpvar;

! Kontinuerlig variabel som viser antall tonn pellets levert til
! havn hh av skip ss i tidsperiode tt på seilerute nummer bb
havneLeveranse  :   dynamic array(Havner, Skip, Tidsperioder, Besoek)
                  of mpvar;

! Kontinuerlig variabel som viser antall tonn pellets levert fra
! havn hh til kunde kk i tidsperiode tt
kundeLeveranse  :   dynamic array(Havner + {nHavner+1}, Kunder,
                  Tidsperioder) of mpvar;

! Kontinuerlig variabel som viser antall tonn pellets lagret hos
! havn hh ved slutten av tidsperiode tt.
! Tidsperiode 0 viser lagernivå ved begynnelsen av periode 1
havneLager     :   dynamic array(Havner, Tidsperioder + {0})
                  of mpvar;

! Binær variabel som er lik
!  1 hvis skip ss brukes i sesong tau,
!  0 ellers
brukerSkip      :   dynamic array(Skip, Sesonger) of mpvar;

! Binær variabel som er lik
!  1 hvis skip ss brukes i sesong tau,
!  0 ellers
erIndustrienBetjent :   dynamic array(Kunder) of mpvar;

end-declarations

! Oppretter variabler og innfører evt. binærkrav

forall (hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek |

```

```

bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh)) do

create(erHavnenBesoekt(hh,ss,tt,bb));
erHavnenBesoekt(hh,ss,tt,bb) is_binary;

create(erSisteHavn(hh,ss,tt,bb));
erSisteHavn(hh,ss,tt,bb) is_binary;

create(havneLeveranse(hh,ss,tt,bb));
end-do

forall(hh in Havner) do
create(harLager(hh));
harLager(hh) is_binary;
end-do

forall(hh in Havner, tt in Tidsperioder + {0}) do
create(havneLager(hh,tt));
end-do

forall(ss in Skip, tau in Sesonger) do
create(brukerSkip(ss,tau));
brukerSkip(ss,tau) is_binary;
end-do

forall(kk in Kunder) do
create(erIndustrienBetjent(kk));
erIndustrienBetjent(kk) is_binary;
end-do

! Oppretter kundeLeveranse variabler kun hvis det tillates transport
! mellom havnen og kunden
forall(hh in Havner + {nHavner+1}, kk in Kunder, tt in Tidsperioder |
HAVNKUNDEMATRISSE(kk,hh) = 1) do
create(kundeLeveranse(hh,kk,tt));
end-do

!*****!
! RESTRIKSJONER !
!*****!

declarations
TotalProfit : lincnr;

sisteHavnCon : dynamic array(Skip, Tidsperioder, Besoek)
of lincnr;
ruteRekkefolgeCon : dynamic array(Havner, Skip, Tidsperioder,
Besoek) of lincnr;
totalLeveringTilHavnCon : dynamic array(Skip, Tidsperioder,Besoek,
Sesonger) of lincnr;
leveringTilHavnCon : dynamic array(Havner, Skip, Tidsperioder,
Besoek) of lincnr;
minEttersporselCon : dynamic array(Kunder,
Tidsperioder) of lincnr;
maxEttersporselCon : dynamic array(Kunder, Sesonger,
Tidsperioder) of lincnr;
sjekkForLagerCon : dynamic array(Havner, Skip, Tidsperioder)
of lincnr;
lagerBalanseCon : dynamic array(Havner, Tidsperioder)
of lincnr;

```

```

tidCon          : dynamic array(Skip, Tidsperioder)
                 of linctr;
startLagerCon   : dynamic array(Havner) of linctr;
sluttLagerCon   : dynamic array(Havner) of linctr;
lagerMinCon     : dynamic array(Havner, Tidsperioder)
                 of linctr;
lagerMaxCon     : dynamic array(Havner, Tidsperioder)
                 of linctr;

kutt1           : dynamic array(Havner, Kunder, Sesonger,
                                Tidsperioder) of linctr;

kutt2           : dynamic array(Havner, Skip, Tidsperioder,
                                Besoek) of linctr;
kutt3           : dynamic array(Havner, Skip, Tidsperioder,
                                Besoek) of linctr;
ruteSymmetri1   : dynamic array(Skip, Tidsperioder, Besoek)
                 of linctr;

skipSymmetri0   : dynamic array(Skip, Skip, Tidsperioder,
                                Besoek) of linctr;

```

end-declarations

```

!*****!
!  MODELLEN  !
!*****!

```

! Målet er å maksimere den totale profitten i verdikjeden.

! Profitten består av følgende deler:

```

TotalProfit :=
  ! Salgsinntekter
  sum(hh in Havner + {nHavner+1}, kk in Kunder, tt in Tidsperioder)
    SALGSPRIS*kundeLeveranse(hh, kk, tt) -
  ! Produksjonskostnader
  sum(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek |
    bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
    PRODUKSJONSKOSTNAD*havneLeveranse(hh, ss, tt, bb) -
  sum(kk in Kunder, tt in Tidsperioder)
    PRODUKSJONSKOSTNAD*kundeLeveranse(nHavner+1, kk, tt) -
  ! Faste havnekostnader
  sum(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek
    | bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
    FASTHAVNEKOSTNAD(ss, hh)*erHavnenBesoekt(hh, ss, tt, bb) -
  ! Variable havnekostnader
  sum(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek |
    bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
    VARIABELHAVNEKOSTNAD(hh)*havneLeveranse(hh, ss, tt, bb) -
  ! Sjøbaserte transportkostnader
  sum(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek |
    bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
    SJOETRANSPORTKOSTNAD(ss, hh)*erSisteHavn(hh, ss, tt, bb) -
  ! Landbaserte transportkostnader
  sum(hh in Havner + {nHavner+1}, kk in Kunder, tt in Tidsperioder)
    LANDTRANSPORTKOSTNAD(hh, kk)*kundeLeveranse(hh, kk, tt) -
  ! Lagerkostnader
  sum(hh in Havner)
    LAGERKOSTNAD(hh)*harLager(hh) -
  ! Faste skipskostnader
  sum(ss in Skip, tau in Sesonger)

```

```

FASTSKIPSKOSTNAD(ss)*brukerSkip(ss,tau);

! Sikrer at det for et skip i en tidsperiode er nøyaktig én havn som
! besøkes sist på ruten
forall(ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek) do
    sisteHavnCon(ss, tt, bb):=
        sum(hh in Havner | bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
        erSisteHavn(hh, ss, tt, bb) <= 1;
end-do

! Sikrer at en havn ikke kan besøkes av et skip i en tidsperiode dersom
! siste havn allerede er besøkt
forall(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek |
    bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh)) do
    ruteRekkefolgeCon(hh, ss, tt, bb):=
        erHavnenBesoekt(hh, ss, tt,bb) -
        sum(h1 in hh .. nHavner)erSisteHavn(h1,ss,tt,bb) <= 0;
end-do

! Sikrer at et skip ikke lastes med mer enn sin kapasitet i
! noen tidsperioder
forall(ss in Skip, tt in Tidsperioder,bb in Besoek, tau in Sesonger |
    tau = TIDSPERIODESESONG(tt)) do
    totalLeveringTilHavnCon(ss,tt,bb,tau):=
        sum(hh in Havner | bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
        havneLeveranse(hh,ss,tt,bb) -
        SKIPSKAPASITET(ss)*brukerSkip(ss,tau) <= 0;
end-do

! Sikrer at et skip i en tidsperiode kun leverer til havner som er besøkt
forall(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek |
    bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh)) do
    leveringTilHavnCon(hh, ss, tt,bb):=
        havneLeveranse(hh,ss,tt,bb) -
        erHavnenBesoekt(hh,ss,tt,bb)*minlist(MAXLAGERNIVAA(hh)-
        MINLAGERNIVAA(hh),SKIPSKAPASITET(ss))<= 0;
end-do

! Sikrer at den minste leveransen til kunde er enten null eller det som
! kreves for industrien
forall(kk in Kunder, tt in Tidsperioder) do
    minEtterspørselCon(kk, tt) :=
        sum(hh in Havner + {nHavner+1})
        kundeLeveranse(hh, kk, tt) >=
        erIndustrienBetjent(kk)*PROSENT*0.5*INDUSTRIETTERSPOERSEL(kk);
end-do

! Sikrer at den totale leveransen til kunde ikke overstiger
! kundens og evt. industriens etterspørsel
forall(kk in Kunder, tau in Sesonger, tt in Tidsperioder |
    tau = TIDSPERIODESESONG(tt)) do
    maxEtterspørselCon(kk, tau, tt) :=
        sum(hh in Havner + {nHavner+1})
        kundeLeveranse(hh, kk, tt) - erIndustrienBetjent(kk)*
        PROSENT*0.5*INDUSTRIETTERSPOERSEL(kk) <=
        PROSENT*ETTERSPOERSEL(kk, tau);
end-do

! Sikrer at en havn ikke besøkes hvis den ikke har lager
forall(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder) do
    sjekkForLagerCon(hh, ss, tt):=

```



```

        sum(bb in Besoek | bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
        erHavnenBesoekt(hh, ss, tt, bb) - nBesoek*harLager(hh) <= 0;
end-do

! Ny lagerbeholdning avhenger av gammel beholdning og
! mengde transportert til og fra lageret
forall(hh in Havner, tt in Tidsperioder) do
    lagerBalanseCon(hh, tt) :=
        havneLager(hh, tt) + sum(kk in Kunder) kundeLeveranse(hh, kk, tt) -
        sum(ss in Skip, bb in Besoek | bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
        havneLeveranse(hh, ss, tt, bb) - havneLager(hh, tt-1) = 0;
end-do

! Sikrer at et skip ikke bruker mer tid på sine ruter i en tidsperiode
! enn det tidsperioden tillater
forall(ss in Skip, tt in Tidsperioder) do
    tidCon(ss, tt) :=
        sum(hh in Havner, bb in Besoek | bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
        SJOETID(hh)*erSisteHavn(hh, ss, tt, bb) +
        sum(hh in Havner, bb in Besoek | bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
        HAVNETID(hh)*erHavnenBesoekt(hh, ss, tt, bb) <= nDager;
end-do

! Setter lagernivået ved hver enkelt havn i tidsperioden 0 til
! en spesifikk verdi
forall(hh in Havner) do
    startLagerCon(hh) :=
        havneLager(hh, 0) - STARTLAGER(hh)*harLager(hh) = 0;
end-do

! Sikrer at lagernivået ved hver enkelt havn i siste tidsperiode er
! større enn eller lik en spesifikk verdi
forall(hh in Havner) do
    sluttLagerCon(hh) :=
        havneLager(hh, nTidsperioder) - SLUTTLAGER(hh)*harLager(hh) = 0;
end-do

! Sikrer at hvis en havn har et lager så er beholdningen høyere enn
! en nedre grense
forall(hh in Havner, tt in Tidsperioder) do
    lagerMinCon(hh, tt) :=
        havneLager(hh, tt) - MINLAGERNIVAA(hh)*harLager(hh) >= 0;
end-do

! Sikrer at hvis en havn har et lager så er beholdningen lavere enn
! en øvre grense
forall(hh in Havner, tt in Tidsperioder) do
    lagerMaxCon(hh, tt) :=
        havneLager(hh, tt) - MAXLAGERNIVAA(hh)*harLager(hh) <= 0;
end-do

forall(hh in Havner, kk in Kunder, tau in Sesonger, tt in Tidsperioder |
    tau = TIDSPERIODESESONG(tt)) do
    kutt1(hh, kk, tau, tt) :=
        kundeLeveranse(hh, kk, tau) - PROSENT*(ETTERSPOERSEL(kk, tau) +
        0.5*INDUSTRIETTERSPOERSEL(kk))*harLager(hh) <= 0;
end-do

forall(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek) do
    kutt2(hh, ss, tt, bb) := sum(h1 in Havner | h1 >= hh and

```

```

TILLATTEBESOEKIHAVN(h1) >= bb) havneLeveranse(h1,ss,tt,bb) <=
sum(h2 in Havner | h2 >= hh and TILLATTEBESOEKIHAVN(h2) >= bb)
SKIPSKAPASITET(ss)*erSisteHavn(h2,ss,tt,bb);
end-do

forall(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder,
bb in Besoek | TILLATTEBESOEKIHAVN(hh) >= bb) do
kutt3(hh,ss,tt,bb) := erSisteHavn(hh,ss,tt,bb) <=
erHavnenBesoekt(hh,ss,tt,bb);
end-do

forall(ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek | bb >= 2) do
ruteSymmetri1(ss,tt,bb) := sum(h1 in Havner) h1*
erSisteHavn(h1,ss,tt,bb-1) - sum(h2 in Havner |
TILLATTEBESOEKIHAVN(h2) >= 2) h2*
erSisteHavn(h2,ss,tt,bb) >= 0;
end-do

forall(s1 in Skip, s2 in Skip, tt in Tidsperioder,
bb in Besoek | SKIPSKAPASITET(s1) = SKIPSKAPASITET(s2) and s1 > s2) do
skipSymmetri0(s1,s2,tt,bb) :=
sum(h1 in Havner)h1*erSisteHavn(h1,s1,tt,bb) -
sum(h2 in Havner)h2*erSisteHavn(h2,s2,tt,bb) <= 0;
end-do

setparam('xprs_verbose',true);
! Skriver ut logg ved et bestemt antall noder
setparam('xprs_miplog',-200);
! Stopper optimeringen etter et bestemt antall sekunder
setparam('xprs_maxtime',-18000);

if (not Original) then
if (not Presolve) then
! Oppgaven er ikke forenklet
setparam('xprs_presolve',0);
end-if

if (not Heuristic) then
! Ingen heuristikkstrategier
setparam('xprs_heurstrategy',0);
end-if

if (Branching = 'Depth') then
! Dybde først: velg mellom de dypeste nodene
setparam('xprs_nodeselection',5);
end-if

if (Branching = 'Best') then
! Beste først: Velg mellom alle aktuelle noder
setparam('xprs_nodeselection',2);
end-if

if (Cutting = 'No') then
! Ingen kuttstrategi
setparam('xprs_cutstrategy',0);
end-if

```

```

    if (Cutting = 'Yes') then
        ! Aggressiv kuttestrategi
        setparam('xprs_cutstrategy',3);
    end-if
end-if

maximize(TotalProfit);

fopen("OUTPUT_Modell.txt",
                                           F_OUTPUT);

writeln;
! Skriver ut målfunksjonsverdien
writeln('Verdi på verdikjeden er: ', strfmt(getsol(TotalProfit),-1,2));

    writeln;
    writeln;

! Skriver ut kostnadsleddene som målfunksjonen består av
writeln('Profitt består av følgende: ');

writeln(strfmt('Salgsinntekter ',-25),strfmt(getsol(
    sum(hh in Havner+{nHavner+1}, kk in Kunder, tt in Tidsperioder)
    SALGSPRIS*kundeLeveranse(hh, kk, tt) ),-10,1));

writeln(strfmt('Produksjonskostnad',-25),strfmt(getsol(
    sum(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek |
    bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
    PRODUKSJONSKOSTNAD*havneLeveranse(hh, ss, tt, bb) )+
    getsol(sum(kk in Kunder, tt in Tidsperioder)
    PRODUKSJONSKOSTNAD*kundeLeveranse(nHavner+1, kk, tt) ),-10,1));

writeln(strfmt('Faste havnekostnader',-25),strfmt(getsol(
    sum(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek
    | bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
    FASTHAVNEKOSTNAD(ss, hh)*erHavnenBesoekt(hh, ss, tt, bb) ),-10,1));

writeln(strfmt('Variable havnekostnader',-25),strfmt(getsol(
    sum(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek |
    bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
    VARIABELHAVNEKOSTNAD(hh)*havneLeveranse(hh, ss, tt, bb) ),-10,1));

writeln(strfmt('Sjøtransportkostnader',-25),strfmt(getsol(
    sum(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek |
    bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
    SJOETRANSPORTKOSTNAD(ss, hh)*erSisteHavn(hh, ss, tt, bb) ),-10,1));

writeln(strfmt('Landtransportkostnader',-25),strfmt(getsol(
    sum(hh in Havner + {nHavner+1}, kk in Kunder, tt in Tidsperioder)
    LANDTRANSPORTKOSTNAD(hh, kk)*kundeLeveranse(hh, kk, tt) ),-10,1));

writeln(strfmt('Lagerkostnader',-25),strfmt(getsol(
    sum(hh in Havner)LAGERKOSTNAD(hh)*harLager(hh) ),-10,1));

writeln(strfmt('Skipskostnader',-25),strfmt(getsol(
    sum(ss in Skip, tau in Sesonger)brukerSkip(ss, tau)*
    FASTSKIPSKOSTNAD(ss) ),-10,1));
writeln;

```

```

writeln;

! Samlet mengde pellets levert til havner og mottatt av kunder
writeln('Totalt mengde pellets levert til: ');
writeln(strfmt('havn:',-10), getsol(
    sum(hh in Havner, ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek)
        havneLeveranse(hh,ss,tt, bb)));
writeln(strfmt('kunde:',-10), getsol(
    sum(hh in Havner+{nHavner+1}, kk in Kunder, tt in Tidsperioder)
        kundeLeveranse(hh,kk,tt)));

writeln;
writeln;

! Skriver ut transportnettverket for hver tidsperiode.
! Hvor mye hver skip leverer til havn, hvor mye som ligger på lageret,
! og hvor mye som blir sendt videre til kunder
writeln('*****');
forall(tt in Tidsperioder) do
writeln('Periode: ', tt);
forall(hh in Havner) do

forall (ss in Skip, bb in Besoek |
    (getsol(havneLeveranse(hh,ss,tt,bb))>0.1 and
    sum(kk in Kunder)getsol(kundeLeveranse(hh,kk,tt)) > 0.1) ) do

    writeln('Skip ', ss, ' leverer ', strfmt(
        getsol(havneLeveranse(hh,ss,tt,bb)),-6,2), " til ",
        HAVNENAVN(hh), ' på rute nummer ', bb ) ;
end-do

if (getsol(sum(kk in Kunder)kundeLeveranse(hh,kk,tt))>0 ) then

    writeln(HAVNENAVN(hh), ' [Sluttlager for perioden: ',
        getsol(havneLager(hh,tt)), ' ]');

    forall(kk in Kunder | getsol(kundeLeveranse(hh,kk,tt))>0.1) do
    writeln(strfmt(' --> ',54), getsol(kundeLeveranse(hh,kk,tt)), ' ',
        KUNDENAVN(kk));
    end-do
end-if

end-do

writeln('Levert fra BIOWOOD: ');

forall(kk in Kunder | getsol(kundeLeveranse(nHavner+1,kk,tt))>0.1) do
writeln(strfmt(' --> ',54), getsol(kundeLeveranse(nHavner+1,kk,tt)), ' ',
        KUNDENAVN(kk));
end-do

writeln('*****');
end-do

writeln;

writeln('Verdi på verdikjeden er: ', strfmt(getsol(TotalProfit),-1,2));

```

```

! Skriver ut hvilke skip som benyttes i de ulike sesongene
writeln;
writeln;
writeln("Skipsbruk i forskjellige sesonger:");
writeln(strfmt('Skip',-7),strfmt('Kap.',-10), strfmt('Sesong 1',-15),
strfmt('Sesong 2',-15), strfmt('Sesong 3',-25), strfmt('Sesong 4',-25) );
forall(ss in Skip) do
    writeln(' ',strfmt(ss,-5),strfmt(SKIPSKAPASITET(ss),-13),
    strfmt(getsol(brukerSkip(ss,1)),-15),
    strfmt(getsol(brukerSkip(ss,2)),-15),
    strfmt(getsol(brukerSkip(ss,3)),-25),
    strfmt(getsol(brukerSkip(ss,4)),-25) );
end-do

! Skriver ut de totale faste kostnadene for skip
writeln("Faste skipskostnader utgjør: ",
    sum(ss in Skip, tau in Sesonger)FASTSKIPSKOSTNAD(ss)*
    getsol(brukerSkip(ss,tau)) );

writeln;
writeln;

!*****!
! SKIPSUTNYTTELSE !
!*****!

writeln('Skipsutnyttelse i forhold til skipskapasitet:');

writeln(strfmt('Skip',-7),strfmt('Kapasitet',-10), strfmt('Levert',-15),
strfmt('Max.levering',-15), strfmt('Utn.rate',-25) );

forall(ss in Skip) do

    write(' ',strfmt(ss,-7), strfmt(SKIPSKAPASITET(ss),-10),

    strfmt(getsol(sum(hh in Havner, tt in Tidsperioder, bb in Besoek )
havneLeveranse(hh,ss,tt,bb) ),-15,1),

    strfmt(getsol(sum(tt in Tidsperioder, bb in Besoek, tau in Sesonger |
tau = TIDSPERIODESESONG(tt) )SKIPSKAPASITET(ss)*
brukerSkip(ss,tau)),-15,1) );

    if ( getsol(sum(tt in Tidsperioder, bb in Besoek, tau in Sesonger |
tau= TIDSPERIODESESONG(tt) )SKIPSKAPASITET(ss)*
brukerSkip(ss, tau) )> 0 ) then

        writeln(strfmt(getsol(100 * (
sum(hh in Havner, tt in Tidsperioder, bb in Besoek)
havneLeveranse(hh,ss,tt,bb) )/(getsol(
sum(tt in Tidsperioder, bb in Besoek, tau in Sesonger |
tau= TIDSPERIODESESONG(tt) )SKIPSKAPASITET(ss)*
brukerSkip(ss, tau)))) , -15,1));
    else
        writeln('NA');
    end-if
end-do

```

```

writeln(strfmt('For alle skip',-19), strfmt(getsol(
sum(ss in Skip, hh in Havner, tt in Tidsperioder, bb in Besoek)
      havneLeveranse(hh,ss,tt, bb)),-15,2),
strfmt(getsol(sum(ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek)
      SKIPSKAPASITET(ss) ),-15,1),
strfmt(getsol(100* (
  sum(ss in Skip, hh in Havner, tt in Tidsperioder, bb in Besoek)
      havneLeveranse(hh,ss,tt, bb) ) /
  (sum(ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek)
      SKIPSKAPASITET(ss))),-15,1) );

writeln;
writeln;

!*****!
!   Utnyttelse av tid                               !
!*****!

writeln('Skipsutnyttelse i forhold til tid:');

writeln(strfmt('Skip',-7),strfmt('Kapasitet',-10), strfmt('Sjøtid',-15),
strfmt('Tot.tid',-15), strfmt('Utn.rate',-25) );

forall(ss in Skip) do

  write("  ", strfmt(ss,-7), strfmt(SKIPSKAPASITET(ss),-10),
    strfmt(getsol(sum(hh in Havner, tt in Tidsperioder, bb in Besoek )
      (erHavnenBesoekt(hh,ss,tt,bb)*HAVNETID(hh)+
        erSisteHavn(hh,ss,tt,bb)*SJOETID(hh)) ),-15,1),

  strfmt(getsol(sum(tt in Tidsperioder, tau in Sesonger |
    tau = TIDSPERIODESESONG(tt))brukerSkip(ss,tau)*nDager),-15,1));

  if (getsol( sum(tt in Tidsperioder, tau in Sesonger |
    tau = TIDSPERIODESESONG(tt) ) brukerSkip(ss,tau)*nDager) >0) then
    writeln(strfmt(getsol(100* (
      sum(hh in Havner, tt in Tidsperioder, bb in Besoek )
      (erHavnenBesoekt(hh,ss,tt,bb)*HAVNETID(hh)+
        erSisteHavn(hh,ss,tt,bb)*SJOETID(hh)) ) /
      (getsol(sum(tt in Tidsperioder, tau in Sesonger |
        tau=TIDSPERIODESESONG(tt))brukerSkip(ss,tau)*nDager))),-15,1));
  else
    writeln(strfmt('NA',-15));
  end-if
end-do

if( getsol(sum(ss in Skip, tt in Tidsperioder, tau in Sesonger |
  tau = TIDSPERIODESESONG(tt)) brukerSkip(ss,tau)*nDager) > 0 ) then

writeln(  strfmt('For alle skip',-19),

strfmt(getsol(
  sum(ss in Skip, hh in Havner, tt in Tidsperioder, bb in Besoek )
  (erHavnenBesoekt(hh,ss,tt,bb)*HAVNETID(hh)+
    erSisteHavn(hh,ss,tt,bb)*SJOETID(hh)) ),-15,1),

strfmt(getsol(sum(ss in Skip, tt in Tidsperioder, tau in Sesonger |
  tau = TIDSPERIODESESONG(tt) ) brukerSkip(ss,tau)*nDager ),-15,1),

strfmt(getsol(100* (

```

```

sum(ss in Skip, hh in Havner, tt in Tidsperioder, bb in Besoek )
(erHavnenBesoekt(hh,ss,tt,bb)*HAVNETID(hh)+
erSisteHavn(hh,ss,tt,bb)*SJOETID(hh)) ) /
getsol(sum(ss in Skip, tt in Tidsperioder, tau in Sesonger |
tau = TIDSPERIODESESONG(tt) brukerSkip(ss,tau)*nDager) ,-15,1) );

writeln;

end-if

writeln;

! Skriver ut levering, behov og graden av dekt behov til hver kunde
writeln('Totalt mengde av pellets levert til kunde ');

writeln(strfmt('Kunde:',-15), strfmt('Levering ',-15),
strfmt('Etterspørsel ', -15), strfmt('Utn.Rate',-15) );

forall(kk in Kunder) do
if ( sum(tt in Tidsperioder, tau in Sesonger |
tau = TIDSPERIODESESONG(tt)) (PROSENT*(ETTERSPOERSEL(kk,tau)+
getsol(erIndustrienBetjent(kk))*0.5*INDUSTRIETTERSPOERSEL(kk)))
>0) then
writeln(strfmt(KUNDENAVN(kk),-15),

strfmt(sum(hh in Havner+{nHavner + 1}, tt in Tidsperioder) getsol(
kundeLeveranse(hh,kk,tt)),-15,1),

strfmt(sum(tt in Tidsperioder, tau in Sesonger |
tau = TIDSPERIODESESONG(tt))PROSENT*(ETTERSPOERSEL(kk,tau)+
getsol(erIndustrienBetjent(kk))*0.5*INDUSTRIETTERSPOERSEL(kk)),-15,1), '
',

strfmt((100*sum(hh in Havner+{nHavner + 1}, tt in Tidsperioder) getsol(
kundeLeveranse(hh,kk,tt)))/(sum(tt in Tidsperioder, tau in Sesonger |
tau = TIDSPERIODESESONG(tt))PROSENT*(ETTERSPOERSEL(kk,tau)+
getsol(erIndustrienBetjent(kk))*0.5*INDUSTRIETTERSPOERSEL(kk))),
-15,1));

end-if
end-do
! Totalt levert, etterspurt og prosentandeller tilfredstilt
writeln(strfmt('Alle kunder',-15),

strfmt(sum(kk in Kunder,hh in Havner, tt in Tidsperioder) getsol(
kundeLeveranse(hh,kk,tt)),-15,1),

strfmt(sum(kk in Kunder, tt in Tidsperioder, tau in Sesonger |
tau= TIDSPERIODESESONG(tt))PROSENT*(ETTERSPOERSEL(kk,tau)+
getsol(erIndustrienBetjent(kk))*0.5*INDUSTRIETTERSPOERSEL(kk))),
-15,1),' ',

strfmt((100*
sum(kk in Kunder, hh in Havner+{nHavner + 1}, tt in Tidsperioder)
getsol(kundeLeveranse(hh,kk,tt)) ) / (
sum(kk in Kunder, tt in Tidsperioder, tau in Sesonger |
tau = TIDSPERIODESESONG(tt))PROSENT*(ETTERSPOERSEL(kk,tau)+
getsol(erIndustrienBetjent(kk))*0.5*INDUSTRIETTERSPOERSEL(kk))),
-15,1));

```

```

writeln;

!*****!
!   Skriver ut havner uten lager                                     !
!*****!

writeln('Havner uten lager: ');
forall(hh in Havner | getsol(harLager(hh)) <>1) writeln(HAVNENAVN(hh),
                                                         '(' , hh, ')');

writeln;

! Skriver ut havner som ikke får levering.(Test for at det er samme
! havner som de som ikke har lager)
forall(hh in Havner |sum(ss in Skip, tt in Tidsperioder, bb in Besoek)
      getsol(havneLeveranse(hh,ss,tt,bb)) <0.1 and getsol(harLager(hh))>0)
      writeln(HAVNENAVN(hh), "(" , hh, ") har lager men får ikke levering");

writeln;
writeln;

!*****!
!   Viser hvilke industrikunder som er betjent                       !
!*****!

forall(kk in Kunder) do
writeln("erIndustrienBetjent(", kk,") = ",
      getsol(erIndustrienBetjent(kk)) );
end-do
writeln;
writeln;
writeln;

!*****!
!   Skriver ut lagerbeholdningene til hver havn                     !
!*****!

writeln("Lagerbeholdning til hver havn");
write("Havn:          ");
forall(tt in Tidsperioder) write(tt, " ");
writeln;
forall(hh in Havner) do
  write(HAVNENAVN(hh), "          ");
  forall(tt in Tidsperioder) do
    write(getsol(havneLager(hh,tt)) , " ");
  end-do
  writeln;
end-do

writeln;
writeln;

!*****!
!   Mengde pellets mottatt i hver havn                               !
!*****!

writeln("Mengde pellets mottatt i hver havn");
forall(hh in Havner) do
  writeln("Havn ", HAVNENAVN(hh), " : ", sum(ss in Skip,

```



```

        tt in Tidsperioder, bb in Besoek | bb <= TILLATTEBESOEKIHAVN(hh))
        getsol(havneLeveranse(hh,ss,tt,bb)), " tonn" );
end-do

writeln;
writeln;

!*****!
!   Prosent kunde Ks etterspørsel dekt av havn H                               !
!*****!

writeln("Prosent kunde K etterspørsel dekt av havn H");
forall(hh in Havner, kk in Kunder | HAVNKUNDEMATRISSE(kk, hh) = 1) do
write("Havn ", HAVNENAVN(hh), " leverer til kunde ", KUNDENAVN(kk), " : ");
    writeln(100*getsol(sum(tt in Tidsperioder)kundeLeveranse(hh, kk, tt) )/
        getsol(sum(tt in Tidsperioder, tau in Sesonger |
            tau = TIDSPERIODESESONG(tt))PROSENT*(ETTERSPOERSEL(kk, tau) +
            0.5*INDUSTRIETTERSPOERSEL(kk)) )
        );
end-do

fclose(F_OUTPUT);

end-model

```

A4 – Presentasjon holdt for Enova SF 27.05.11

Slide 1

1



NTNU
Det skapende universitet

**Optimeringsbasert beslutningsstøtte for distribusjon av
fornybar energi i maritime verdikjeder**

Masteroppgave


Kristian Andersen
Aslanbek Sjamsutdinov

27.05.2011

www.ntnu.no


For øyeblikket i avslutningsfasen av arbeidet med en masteroppgave kalt "Optimeringsbasert beslutningsstøtte for distribusjon av fornybar energi i maritime verdikjeder". Oppgaven er skrevet i samarbeid med Enova der Roar Grønhaug har vært kontaktperson.

2



Agenda

- Introduksjon
- Analyse
- Økonomiske resultater
- Diskusjon/spørsmål



NTNU
Det skapende universitet

www.ntnu.no

Vi vil først ha en kort introduksjon der vi presenterer oss selv og bakgrunnen for oppgaven vi har skrevet. Vi vil så fortelle litt om hvordan analysen ble utført og hvilke verktøy som ble brukt. Deretter presenteres de økonomiske resultatene, før vi til slutt tar imot litt spørsmål og åpner for diskusjon.

3

Masteroppgaven anslår lønnsomheten ved maritim distribusjon av trepellets langs norskekysten

Bakgrunn for masteroppgaven


- Enova betrakter pellets som gunstig til oppvarming og vil øke dets omsetning
- All innenlands distribusjon foregår i dag landbasert
- Distribusjonsnettverket langs norskekysten er svakt
- Enova vil vurdere lønnsomheten ved etablering av maritim distribusjon

Muligheter ved bruk av optimering

- Matematisk modell til hjelp for planlegging og økonomisk styring
- Finner nettverket og distribusjonen som maksimerer verdikjedens profitt
- Løsningen som genereres representerer potensiell lønnsomhet

Sénéchal & Grassi, 2009

"In the case of pellets the road transport over long distances (more than 200-300 km) is not very economical..."

 **NTNU**
Det skapende universitet

www.ntnu.no

Masteroppgaven har som formål å anslå lønnsomheten ved maritim distribusjon av trepellets langs norskekysten. Trevirke som er blitt tørket og komprimert til pellets har et høyt energiinnhold, er fornybart og regnes i mange sammenhenger som klimanøytralt. Enova betrakter trepellets som gunstig til oppvarmingsformål og ønsker med det at pellets skal erstatte energikilder som ikke er klimanøytrale. Det forutsetter imidlertid økt produksjon og distribusjon av pellets her til lands. Per i dag foregår distribusjonen ved landbasert transport, og det eksisterer få distribusjonsnettverk langs kysten av Norge. Enova ønsker av den grunn å vurdere lønnsomheten ved å realisere dette ubenyttede potensialet.

Lønnsomheten er anslått ved bruk av fagdisiplinen optimering. Vi har utviklet en modell som genererer et distribusjonsnettverk optimalt med tanke på profitt. Dette nettverket benyttes til å representere den potensielle lønnsomheten. Modellen fungerer således som optimeringsbasert beslutningsstøtte for å anslå lønnsomheten ved maritim distribusjon av trepellets.



Agenda

Introduksjon

Analyse

Økonomiske resultater

Diskusjon/spørsmål



Verdikjeden til trepellets kan deles opp i fem hovedledd. Inngående råvarer er sagflis, spon og annet trevirke. Dette råmaterialet er primært biprodukter og avfall fra skogsvirke og sagbruk. Under produksjonen tørkes og komprimeres trevirket til pellets. Lagring i distribusjonssentre har sin verdi ved at de fanger opp forskjeller mellom produksjons- og forbruksmønsteret. Samtidig skaper distribusjonssentrene en større nærhet til sluttkonsumentene, som igjen reduserer leveringstiden og øker leveringsikkerheten. Siloer brukt til lagring av f.eks. korn og sement kan også brukes til lagring av pellets. Utsalgsstedene selger pellets i tre ulike former: småsekk, storsekk og bulk. Forbrukerne er gjerne individuelle husstander med oppvarmingsbehov, varmesentraler og fjernvarmeanlegg. I tillegg har vi industri med behov for prosessvarme. I analysen vår deler vi inn i to segmenter: oppvarmingsbehov og industrielt behov.

I vår analyse benyttes Biowood som produsent. Det er det to grunner til: For det første er Biowood tilrettelagt for maritim distribusjon med sin lokasjon på Averøya på kysten av Møre og Romsdal. For det andre vil Biowood bli den desidert største produsenten i Norge med en forventet produksjonskapasitet på 450 000 tonn pellets per år. Analysen vår tar utgangspunkt i produksjon på Averøya, sjøbasert transport

fra Averøya til ulike industrihavner langs norskekysten, lagring i disse havnene, og videre landbasert transport fra havnene ut til sluttkundene. Sjøtransporten er utført med bulkskip, mens landtransporten er utført med lastebiler. Vi har begrenset oss til Midt-Norge og Sør-Norge, da det er disse regionene som har størst befolknings- og industritetthet.

6

En strategisk/taktisk optimeringsmodell utvikles som følge av at analysen har en langsiktig planleggingshorisont

$$\begin{aligned} \text{Max } z = & \sum_{i \in I, l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} R \cdot f_{ikt} - \sum_{k \in K} A \cdot D_k^l \cdot b_k \\ & - \sum_{i \in I, l \in L} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} C^p \cdot q_{ivtm} - \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} C^k \cdot f_{akt} - \sum_{i \in I, l \in L} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} C_{iv}^s \cdot y_{ivtm} \\ & - \sum_{i \in I, l \in L} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} C_{iv}^H \cdot x_{ivtm} - \sum_{i \in I, l \in L} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} C_{iv}^L \cdot q_{ivtm} - \sum_{i \in I, l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} C_{ik}^c \cdot f_{ikt} \\ & - \sum_{i \in I} C_i^W \cdot w_i - \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} V_p^{\text{KOST}} \cdot u_{pp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{ivtm} - \sum_{j \in I, l \in L} y_{jvmt} & \leq 0 & \forall i \in I, v \in V, t \in T, m \in M_t & \quad (2) \\ \sum_{i \in I, l \in L} q_{ivtm} - V_p^{\text{KAP}} \cdot u_{pp} & \leq 0 & \forall v \in V, p \in P, t \in T, m \in M & \quad (3) \\ q_{ivtm} - \text{Min}\{\bar{S}_i - \bar{S}_i, V_p^{\text{KAP}}\} \cdot x_{ivtm} & \leq 0 & \forall i \in I, v \in V, t \in T, m \in M_t & \quad (4) \\ \sum_{i \in I, l \in L} f_{ikt} - D_k^l \cdot b_k & \leq D_{kt}^D & \forall k \in K, t \in T & \quad (5) \\ \sum_{i \in I, l \in L} f_{ikt} - D_k^l \cdot b_k & \geq 0 & \forall k \in K, t \in T & \quad (6) \\ \sum_{i \in I, l \in L} x_{ivtm} - M_i^{\text{NNT}} \cdot w_i & \leq 0 & \forall i \in I, v \in V, t \in T & \quad (7) \end{aligned}$$

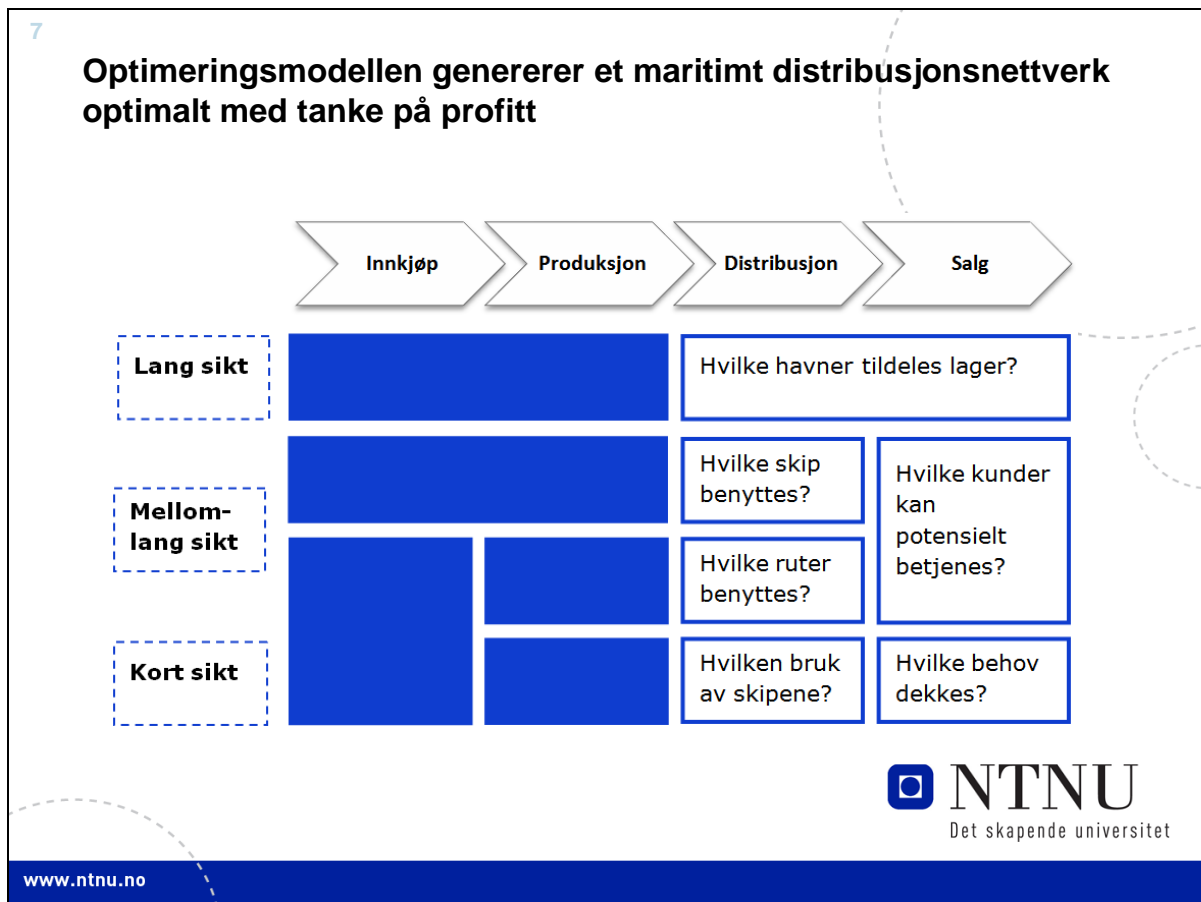
Steg i modellutviklingen

- Matematisk formulering skrevet på papir
- Omfattende datainnsamling
- Programmeringskode skrevet i Mosel og implementert i XPRESS-MP
- Modellkjøring utført på cluster ved NTNU med drøye 27 000 restriksjoner og 9 000 variabler
- Gjentatte tester og forbedringer utført på modell



Det å anslå lønnsomheten ved maritim distribusjon innebærer å vurdere et fremtidig potensial. Det viktigste er å skape et overordnet bilde som omfatter de mest grunnleggende elementene ved distribusjonen. Som følge av det har vi utviklet en strategisk/taktisk optimeringsmodell.

Det hele begynte med matematiske formuleringer som beskrev problemet vi sto ovenfor. Vi ser et lite utdrag av den her til venstre. Vi vil ikke gå i detalj på denne, ettersom det nok ikke er det mest interessante for Enova. Formuleringen ga en indikasjon på hvilken informasjon vi måtte ha, og vi igangsatte en omfattende datainnsamling. Blant annet har vi lest en rekke artikler og rapporter på området, og kommunisert med involverte aktører: systematisk kontaktet flere rederier og samtlige aktuelle havner. Etter datainnsamlingen har formuleringen blitt programmert og implementert. Modellkjøringer er blitt utført på cluster ved NTNU for å oppnå ekstra datakraft, noe som var nødvendig med drøye 27 000 restriksjoner og 9 000 variabler.



Resultatene fra optimeringsmodellen forteller hvilke havner som bør tildeles lagerfasiliteter, hvilke skip som bør leies inn i hvilke sesonger, hvilke skip som bør besøke hvilke havner når og hvilke kvantum som skal losses, samt hvor mye som skal lagres i de ulike havnene til enhver tid og sendes ut til kunder. Ved å utvikle nettverket og gjennomføre distribusjonen slik modellen foreslår, oppnås optimal profitt i verdikjeden. Denne profitten blir brukt til å representere lønnsomheten ved distribusjonen. Det er viktig å være klar over at en modell nødvendigvis er en forenkling av virkeligheten. Det betyr at løsningen er optimal gitt de antakelser og forutsetninger modellen bygger på.



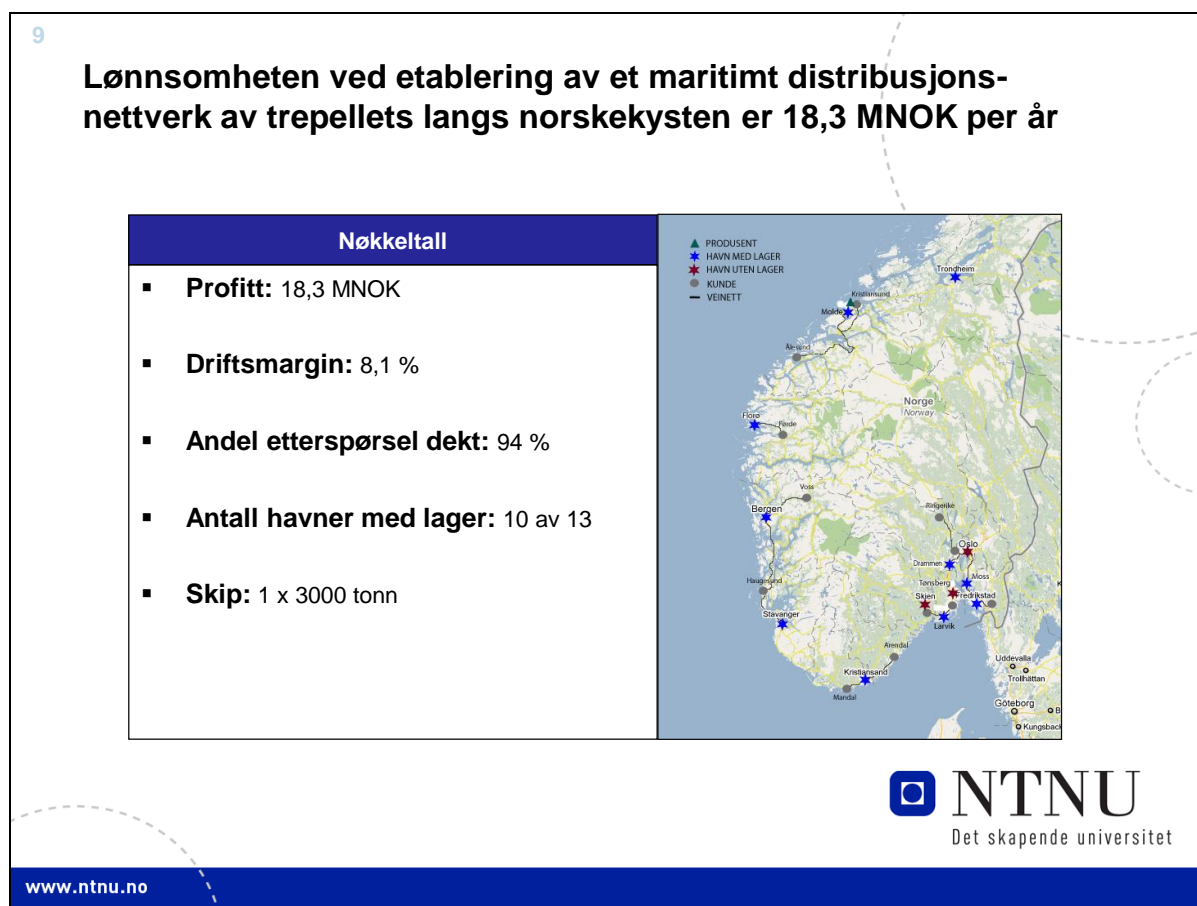
Agenda

Introduksjon

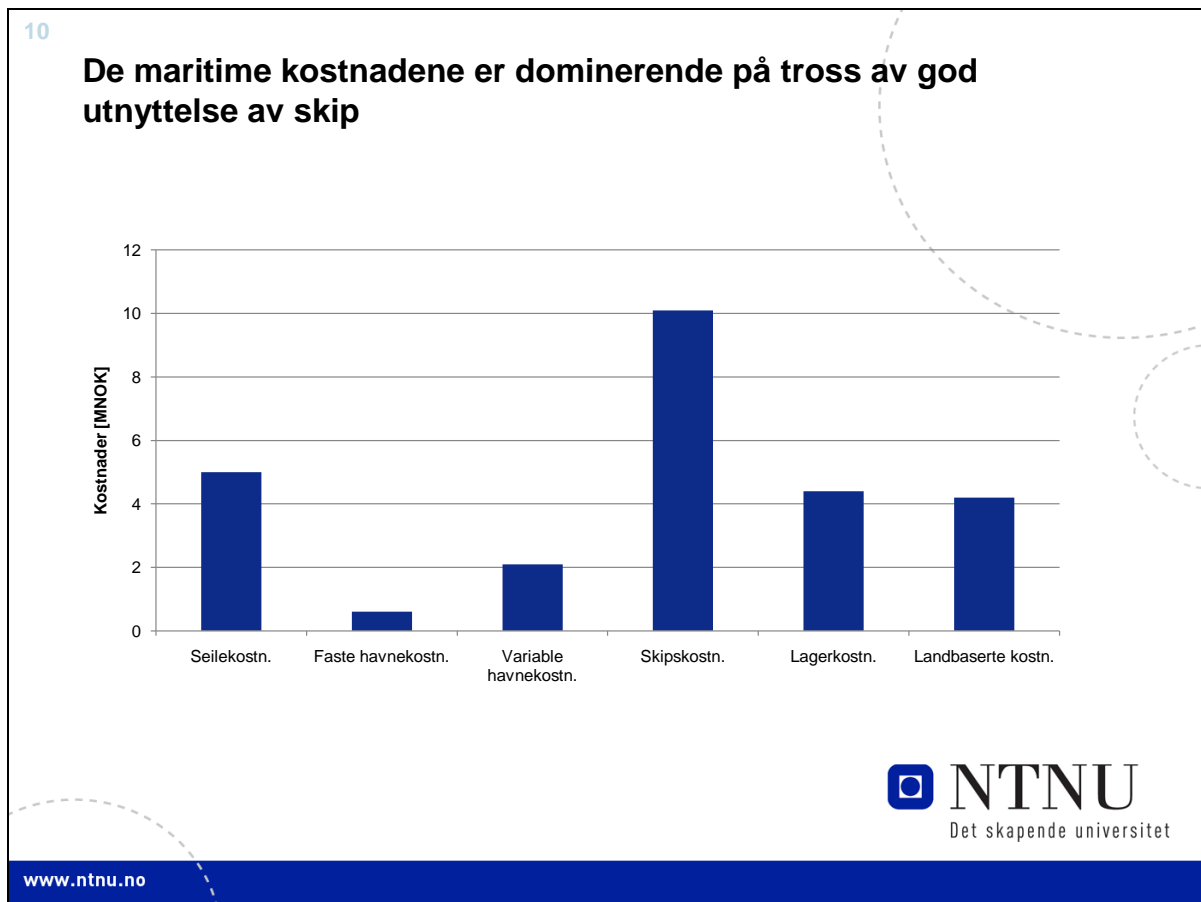
Analyse

Økonomiske resultater

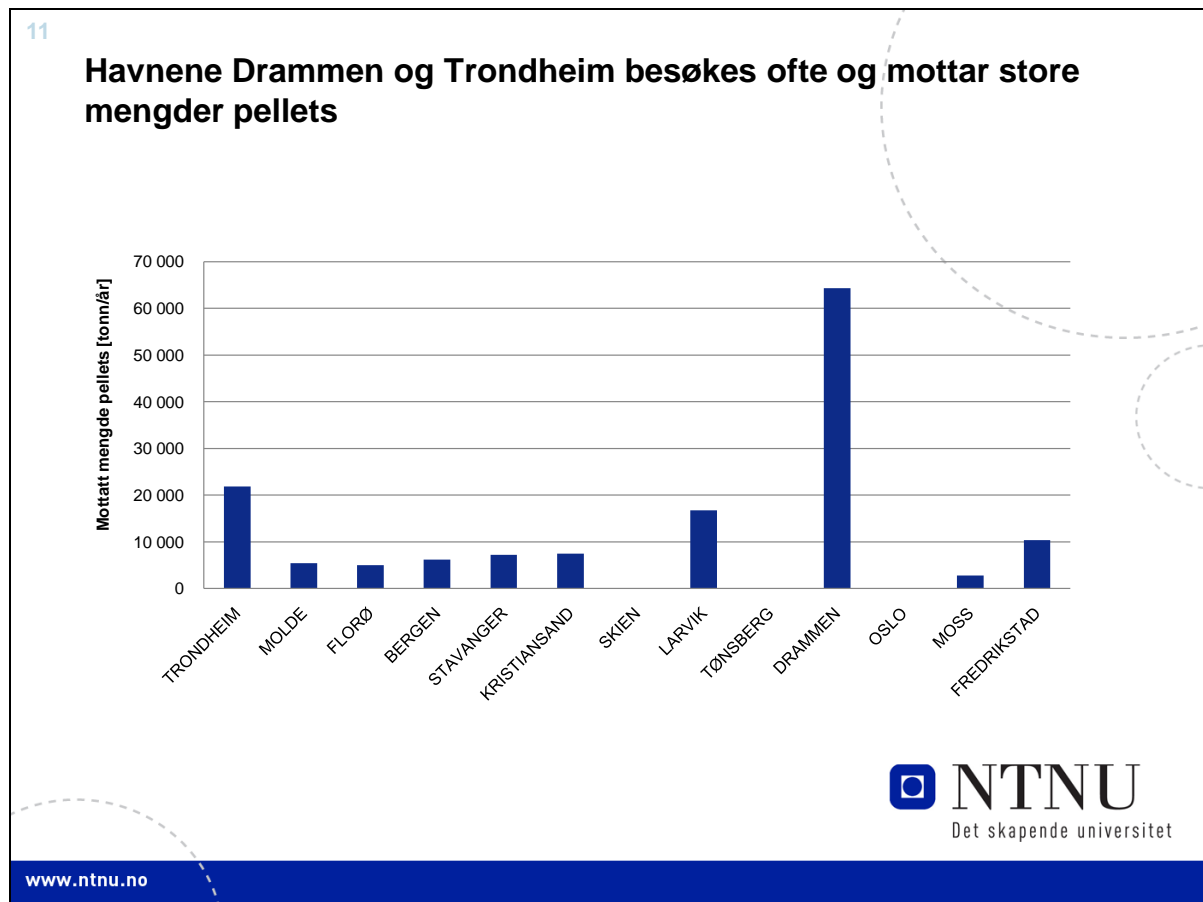
Diskusjon/spørsmål



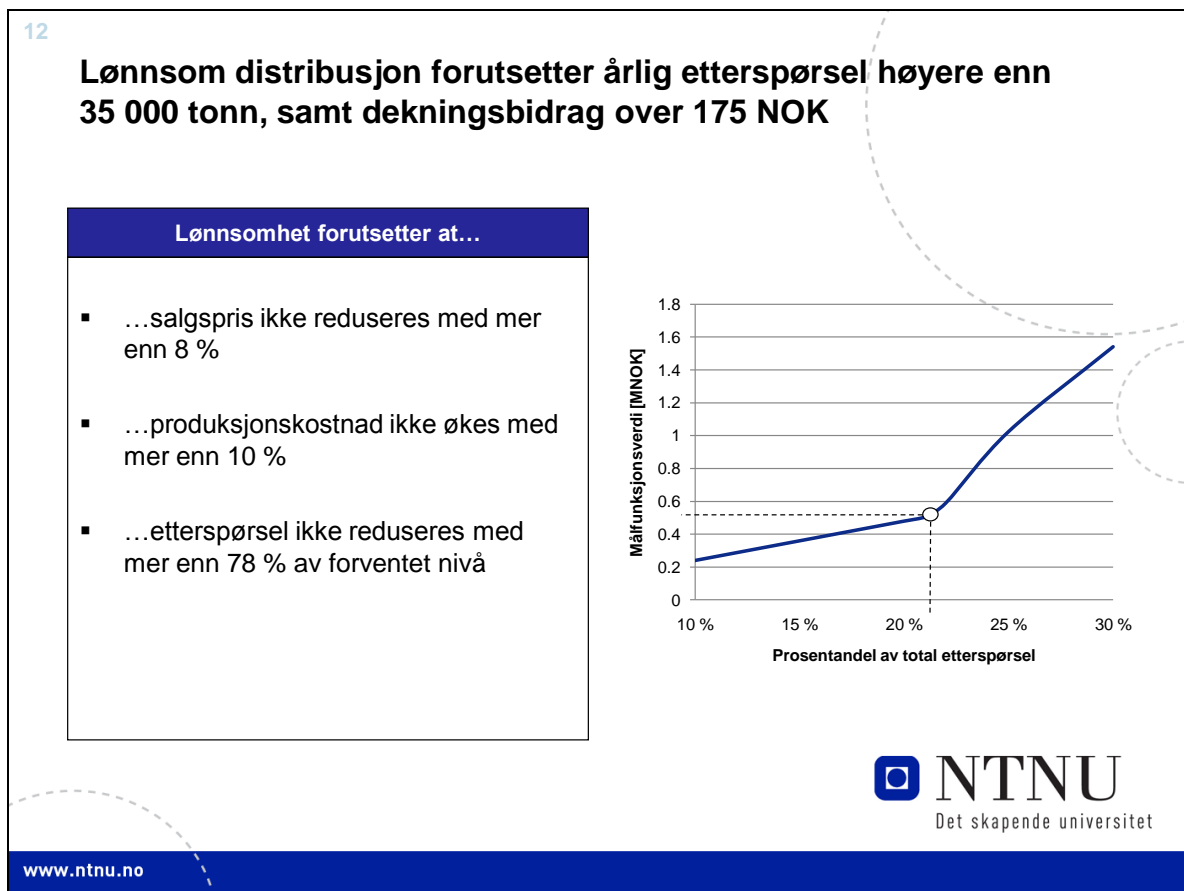
Den økonomiske analysen avslører en årlig profitt på 18,3 MNOK, og maritim distribusjon av trepellets langs norskekysten viser seg således som lønnsomt. Med en salgsinntekt på 225 MNOK gir det en driftsmargin på drøye 8 %. Driftsmargin på 8 % betyr at produsenten tjener 8 øre på hver krone de selger for. 94 % av all etterspørsel dekkes på tross av at den er valgfri å imøtekomme. Samtlige industrikunder betjenes fullstendig. 10 av 13 mulige havner tildeles lagerfasiliteter, noe som gir en god geografisk spredning i distribusjonsnettverket. De tre havnene som ikke tildeles lager er alle lokalisert på Østlandet. Likevel er Østlandet godt representert i forhold til bruk av havner.



Råvare- og produksjonskostnader er naturlig nok størst med klar margin. De øvre kostnadsleddene er vist i figuren. Det leies inn ett skip med lastekapasitet 3000 tonn høst, vinter og vår, mens det ikke leies inn noen skip sommerstid. Skipskostnader representerer leie av skip, mens seilekostnader representerer bruk av skip. Samlet utgjør de maritime kostnader, og vi ser de er dominerende. Det gjør det interessant å se hvor godt skipene utnyttes. Det viser seg at skipet utnytter nesten 90 % av seiletiden det har til rådighet, mens det lastes med nesten 70 % av kapasiteten det har til rådighet. Tallene indikerer at utnyttelsen er god, spesielt med tanke på at det er ønskelig med noe slakk. Full utnyttelse er ikke realiserbart.



Det er tydelig å spore en trend i rutene som seiles, der havnene i henholdsvis Trondheim og Drammen besøkes svært ofte, samtidig som det leveres store kvantum. Det kan forklares med at både Trondheim og Drammen har forholdsvis høy etterspørsel, samtidig som Drammen forsyner kundene i Oslo-området med store mengder. Det blir klare relasjoner mellom havner og hvilke kunder de betjener. Som regel blir kunder betjent fra havnen som er nærmest lokalisert, men samme kunde kan være forsynt fra flere havner. At Oslo med sin høye etterspørsel ikke tildeles lagerfasiliteter kan virke oppsiktsvekkende. Det kan imidlertid forklares med at Oslo opererer med høye havnekostnader, slik at det er mer hensiktsmessig å losse pellets i nærliggende havner og transportere landbasert til Oslo.



Som nevnt innledningsvis er formålet med rapporten å anslå lønnsomheten ved maritim distribusjon av trepellets langs kysten av Norge. Lønnsomheten er naturlig nok sensitiv for endring av inndata. I den forbindelse vil det være interessant å utføre nullpunktsanalyser (*Break-even*). Det vil si analyser som fastslår hvor mye inndataene kan endres før lønnsomheten går akkurat i null. Nullpunktsanalysen viser at dersom den totale etterspørselen reduseres til under 35 000 tonn pellets per år, benyttes ingen skip. Ved en slik etterspørsel gir modellen fremdeles et overskudd på drøye 0,5 MNOK. Det er landbasert transport direkte fra produsenten til nærliggende kunder som gir dette overskuddet. Det er oppsiktsvekkende at den forventede etterspørselen kan reduseres med nesten 80 % før den maritime distribusjonen viser seg ulønnsom.

I analysen er produsert mengde pellets lik solgt mengde. Det gjør at en reduksjon i salgspris gir samme effekt som en tilsvarende økning i produksjonskostnad per tonn. Av den grunn skilles det ikke på om det er salgsprisen eller produksjonskostnaden per tonn som endres. Det interessante er differansen mellom de to. Det kan ses på som et slags dekningsbidrag. En nullpunktsanalyse viser at dekningsbidraget må minimum være 175 NOK per tonn pellets for at maritim distribusjon skal være

lønnsomt. Resultatet fra nullpunktsanalysen betyr at salgsprisen kan avta med inntil 8 % og den maritime distribusjonen er fremdeles lønnsom. På samme måte kan ikke produksjonskostnad per tonn økes med mer enn 10 % for at distribusjonen skal være lønnsom. Det er tydelig å se at lønnsomheten er langt mer sensitiv i forhold til dekningsbidrag enn i forhold til etterspørsel.

Etterspørselstallene for industrien er basert på dagens forbruk av lettolje. Konvertering fra fyring med lettolje til fyring med pellets er forholdsvis rimelig og enkelt. Det er likevel knyttet usikkerhet til hvor stor andel av industrien som faktisk vil foreta denne konverteringen. I verste fall, sett fra et lønnsomhetsperspektiv, faller all industrietterspørsel bort. I et slikt tilfelle ender distribusjonsnettverket opp med et overskudd på 10,5 MNOK.

Den totale etterspørselen bygger på forventede fremtidige verdier, og innebærer således usikkerhet. Av den grunn betraktes flere scenarioer som tar for seg ulike nivåer av den totale etterspørselen. Vi ser at antall skip og deres kapasitet reduseres ettersom etterspørselen reduseres. Det interessante er at utnyttelsesgraden, både i forhold til seiletid og lastmengde, holder seg ganske stabil. Det indikerer at modellen er i stand til å designe flåter som er passende i forhold til flere etterspørselsnivåer. Denne fleksibiliteten bidrar til å forklare hvorfor lønnsomheten ikke er spesielt sårbar for endringer i etterspørselen.



Agenda

Introduksjon

Analyse

Økonomiske resultater

Diskusjon/spørsmål

14



NTNU
Det skapende universitet

Diskusjon og spørsmål

Takk for oppmerksomheten

Aslanbek Sjamsutdinov
Kristian Andersen

27.05.2011

www.ntnu.no

Da har vi et gitt et lite innblikk i det vi har jobbet med i vår. Masterrapporten vil bli sendt digitalt til Enova ved innlevering, samtidig som Roar vil motta et trykt eksemplar. Rapporten er langt mer omfattende enn det vi hadde mulighet til å presentere i dag. Vi vil derfor anbefale dere som er interesserte å lese rapporten. Hvis det er noen spørsmål så kan vi ta de nå, ellers så kan vi åpne for en slags diskusjon i rommet.