

Produksjonsoptimering innenfor lakseoppdretten - planlegging under usikkerhet

Tarald Bjørdal Langan
Tor Toftøy

Industriell økonomi og teknologiledelse

Oppgaven levert: Juni 2011

Hovedveileder: Asgeir Tomasgard, IØT

Biveileder(e): Peter Schütz, SINTEF
Kristin Tolstad Uggen, SINTEF
Kjetil Midthun, SINTEF

MASTERKONTRAKT

- uttak av masteroppgave

1. Studentens personalia

Etternavn, fornavn Langan, Tarald Bjørdal	Fødselsdato 25. apr 1985
E-post tarald.langan@gmail.com	Telefon 97706133

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 tarald.langan@gmail.com	Telefon 97706133

3. Masteroppgave

Oppstartsdato 17. jan 2011	Innleveringsfrist 13. jun 2011
Oppgavens (foreløpige) tittel Produksjonsoptimering innenfor lakseoppdretten - planlegging under usikkerhet	
Oppgavetekst/Problembeskrivelse Oppgaven bygger videre på prosjektoppgave gjennomført høsten 2010. Det skal lages og implementeres en stokastisk optimeringsmodell for planlegging av utsett av smolt i saltvann og innhøsting av laks. Modellen skal kunne brukes for en aktør med mange forskjellige anlegg, og ta hensyn til de viktigste begrensningene og reguleringene som finnes i næringen. Implementeringen vil ta utgangspunkt i Marine Harvests anlegg i Midt-Norge. Oppgaven vil bestå av i hovedsak følgende deler: -Drøfting av problemstilling -Stokastisk optimeringsmodell -Implementering av modellen -Diskusjon av resultater	
Hovedveileder ved institutt Professor Tomasgard Asgeir	Biveileder(e) ved institutt
Ekstern bedrift/institusjon SINTEF	Ekstern veileder ved bedrift/institusjon Peter Schütz, Kristin Tolstad Uggen, Kjetil Midthun
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 14/1-11
Sted og dato

Tanad Blangram
Student


Hovedveileder

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

MASTERKONTRAKT

- uttak av masteroppgave

1. Studentens personalia

Etternavn, fornavn Toftøy, Tor	Fødselsdato 27. jan 1986
E-post toftoyan@stud.ntnu.no	Telefon 99492290

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 toftoyan@stud.ntnu.no	Telefon 99492290

3. Masteroppgave

Oppstartsdato 17. jan 2011	Innleveringsfrist 13. jun 2011
Oppgavens (foreløpige) tittel Produksjonsoptimering innenfor lakseoppdretten - planlegging under usikkerhet	
Oppgavetekst/Problembeskrivelse Oppgaven bygger videre på prosjektoppgave gjennomført høsten 2010. Det skal lages og implementeres en stokastisk optimeringsmodell for planlegging av utsett av smolt i saltvann og innhøsting av laks. Modellen skal kunne brukes for en aktør med mange forskjellige anlegg, og ta hensyn til de viktigste begrensningene og reguleringene som finnes i næringen. Implementeringen vil ta utgangspunkt i Marine Harvests anlegg i Midt-Norge. Oppgaven vil bestå av i hovedsak følgende deler: -Drøfting av problemstilling -Stokastisk optimeringsmodell -Implementering av modellen -Diskusjon av resultater	
Hovedveileder ved institutt Professor Tomasgard Asgeir	Biveileder(e) ved institutt
Ekstern bedrift/institusjon SINTEF	Ekstern veileder ved bedrift/institusjon Peter Schütz, Kristin Tolstad Uggen, Kjetil Midthun
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 14/1-2011
Sted og dato

Tor Tofte
Student


Hovedveileder

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

Sammendrag

Havbruksnæringen er en stor næring i Norge, og har opplevd store endringer i struktur og lovverk de siste årene. Sjøvann delen av verdikjeden for oppdrettslaks har siden 2005 blitt regulert av et krav om maksimal tillatt biomasse på anleggs- og regionsbasis. I tillegg innføres det nå i store deler av landet geografiske soner hvor alle anlegg innenfor en sone har felles brakkleggingsperiode. Vi har laget en stokastisk optimeringsmodell som kan hjelpe aktører med taktisk planlegging av smoltutsett og utslakting. Modellen er rettet mot store aktører med en stor portefølje av anlegg, og har blitt testet for Marine Harvests anlegg i Midt-Norge. Vekst og dødelighet er usikre faktorer i modellen. Resultatene viser at usikker dødelighet er lettere å kompensere for i fremtidige utsett enn usikker vekst. Vi finner at det er gunstig å tillate, og planlegge for, utslakt på lavere vekter enn målvekten. Særlig gjelder dette for utslakt i månedene mai-juni. Et annet alternativ er å endre fra dagens målsatte slaktevekt på 6 kg til en målvekt på 5,5 kg. Ved å endre målvekten får vi med vår modell en økning i totalvolum av slaktet laks på over 10 %.

Forord

Dette er en oppgave skrevet som avsluttende arbeid på masterstudiet i Industriell økonomi og teknologiledelse våren 2011. Oppgaven er skrevet innen spesialiseringen Anvendt økonomi og optimering. Oppgaven bygger videre på prosjektoppgaven vi skrev høsten 2010 med lignende tema. Oppgaven er skrevet i samarbeid med SINTEF og Marine Harvest sitt trondheimskontor.

Vi vil gjerne takke vår veileder Asgeir Tomasgard for gode innspill. Også medveileder Peter Schütz hos Sintef Anvendt Økonomi har gitt god input når han har vært tilgjengelig. I Marine Harvest vil vi i første rekke takke Eivind Osnes for mye verdifull informasjon, og genuin interesse for hva vi kommer fram til. I tillegg vil vi takke Leiv Tvenning som tok seg tid til å forklare vekstmodellering for oss. Deres hjelp har vært en stor del av grunnen til at vi i løpet av arbeidet med oppgaven har vi tilegnet oss mye kunnskap om en bransje vi kunne lite om på forhånd.

Alle eventuelle feilaktige påstander eller opplysninger i denne oppgaven tar vi på egen kappe og legger ingen skyld på andre enn oss selv.

Tarald Bjørdal Langan og Tor Toftøy

Trondheim 10. juni 2011

Innhold

1	Innledning	1
2	Teori	2
2.1	Stokastisk programmering	2
2.1.1	Representasjon av usikker informasjon	2
2.1.2	Stokastisk problem med recourse-funksjon	3
2.1.3	Forventet verdi av perfekt informasjon (EVPI)	3
2.1.4	Verdien av stokastisk løsning (VSS)	4
2.2	Arbeider innen havbruk og relaterte områder	4
3	Introduksjon til bransjen	6
3.1	Verdikjeden	6
3.1.1	Avl	6
3.1.2	Ferskvann	6
3.1.3	Saltvann	7
3.1.4	Slakting og foredling	8
3.2	Konsesjoner og MTB	8
3.3	Lusesoneinndeling og felles brakklegging	9
3.4	Marine Harvest Region Midt	9
4	Drøfting av problemet	13
4.1	Motivasjon	13
4.2	Vekstmodellering	14
4.3	Usikkerhet	16
5	Tostegsmodell	17
5.1	Usikkerhet	17
5.2	Vekstmodellering	17
5.3	Andre antagelser	18
5.4	Deklareringer	18
5.5	Modell	21
5.5.1	Inngående biomasse	21
5.5.2	Overgang fra første til andre steg, fordeling i nye vektklasser og mulig tvangsslakting	21
5.5.3	Biomasse og MTB-restriksjoner	22
5.5.4	Slakting	24
5.5.5	Krav til slakting	24
5.5.6	Tilgjengelig smolt for utsett	26
5.5.7	Spesialtilfelle der utsettsperioden for et anlegg varer lenger enn planleggingsperioden	26
5.5.8	End-of-horizon	27
5.5.9	Ikke-negativitetskrav	28
5.5.10	Objektfunksjon	28
5.6	Deterministisk ekvivalent	31

5.7	Kommentarer til modellen	31
6	Implementering	32
6.1	Forenklinger	32
6.2	Datagrunnlag	32
6.2.1	Planleggingsperiode	32
6.2.2	Anleggene	33
6.2.3	Biomasse ved planleggingsperiodens start	34
6.2.4	Slakterestriksjoner	34
6.2.5	Smoltbegrensninger	35
6.2.6	Profitt og kostnad i objektfunksjonen	35
6.3	Scenariogenerering	36
6.4	Vekstmodellering	36
6.5	Probleminstanser	39
6.5.1	Originalproblem (OP)	39
6.5.2	Alternativ målvekt (AM)	39
6.5.3	Usikker vekst (UV) og Usikker dødelighet (UD)	40
6.5.4	Lav profitt for lav slaktevekt (LPLV) og høy profitt for lav slaktevekt (HPLV)	40
6.5.5	Deterministisk problem	40
6.5.6	Vårutsett	40
6.6	Løsningstid, variable og restriksjoner i Xpress-MP	41
7	Resultater	42
7.1	Originalproblemet (OP)	42
7.2	Alternativ målvekt(AM)	45
7.3	Usikker vekst (UV) og usikker dødelighet (UD)	47
7.4	Lav profitt for lav vekt (LPLV) og høy profitt for lav vekt (HPLV)	47
7.5	Vår 2012 som førstestegsbeslutning (VÅR)	48
7.6	Deterministisk model (OP-DET)	49
7.7	EVPI og VSS	50
8	Konklusjon	51
	Bibliografi	52
	Vedlegg	54
A	Deterministisk ekvivalent	54
B	Datagrunnlag	61
C	Mosel-kode	65

Tabeller

3.1	Anleggsoversikt, Marine Harvest Region Midt	12
6.1	MTB-oversikt aggregerte anlegg	34
6.2	Regions-MTB	34
6.3	Maksimalt smoltutsett	35
6.4	Veksttabell for smoltutsett	38
6.5	Utdrag fra slaktekoeffisientstabell	39
6.6	Maskin- og programvarespesifikasjoner	41
6.7	Spesifikasjoner for probleminstansene	41
7.1	Sammendrag av resultater.	42
7.2	Antall tusen smolt utsatt per periode. Førstesteget, høst 2011. (OP)	43
7.3	Antall tusen smolt utsatt i andreteget. (OP)	43
7.4	Antall tusen fisk slaktet, sortert per utsettstidspunkt og slaktevekt. (OP)	43
7.5	Antall tusen fisk slaktet sortert per utsettstidspunkt og slaktevekt. (AM)	46
7.6	Utsett og standardavvik for UV, UD og OP	47
7.7	Gjennomsnittlig smoltutsett i antall tusen per sesong LPLV og HPLV	48
7.8	Sammenligning av andrestegsutsett OP(3,3) og førstestegsutsett VÅR.	49
7.9	Gjennomsnittlig antall tusen fisk slaktet per slaktevekt og utsettstid- spunkt. (VÅR)	50
B.1	Tillatt smoltutsett førstesteget i antall tusen	62
B.2	Tillatt smoltutsett første høstutsett i andreteget i antall tusen . .	62
B.3	Tillatt smoltutsett andre høstutsett i andreteget i antall tusen . .	63
B.4	Tillatt smoltutsett tredje høstutsett i andreteget i antall tusen . .	63
B.5	Tillatt smoltutsett første vårutsett i andreteget i antall tusen . . .	63
B.6	Tillatt smoltutsett andre vårutsett i andreteget i antall tusen . . .	64
B.7	Tillatt smoltutsett tredje vårutsett i andreteget i antall tusen . .	64
B.8	Utgående biomasse i tusen tonn	64

Figurer

2.1	Scenariotre	2
3.1	Verdikjeden	6
3.2	Lusesoner Nord-Trøndelag	10
4.1	Vekstovergang	15
4.2	Vekstutvilking	15
5.1	Biomasse, slutten av planleggingshorisonten	28
6.1	Gantt-diagram for planleggingsperioden	33
6.2	Skjerm-bilde fra vekstmodellen i excel	37
7.1	Biomasse	44
7.2	Antall slaktet OP	45
7.3	Anleggsbiomasse OP	46
7.4	Gjennomsnittlig biomasse for probleminstans LPLV og HPLV trøndelags- anleggene.	48

Nomenklatur

0-åring, S0	- Smolt som settes ut på høsten
1-åring, S1	- Smolt som settes ut på våren
Anleggs-MTB	- Maksimal tillatt biomasse for et gitt anlegg
Biomasse	- Vekten av levende fisk i et anlegg
Brakklegging	- Å ha et oppdrettsanlegg liggende tomt for fisk
Generasjon	- Generasjonen til en fisk sier når den ble satt ut i saltvann
Høstanlegg	- Anlegg som har hoveddelen av utsett på høsten. Henger sammen med brakklegging av anleggene tidlig sommer.
Konsesjon	- En tillatelse til å ha en viss mengde biomasse
Lusesone	- En geografisk avgrensning hvor alle anlegg har felles brakklegging
MTB	- Maksimal tillatt biomasse
Målvekt	- En vekt som oppdretteren ønsker å slakte ut mest mulig av fisken på.
Regionsbiomasse	- Summert vekt for biomassen i alle anleggene i en region
Regions-MTB	- Maksimalt tillatt biomasse totalt for alle anlegg i en region
Smolt	- Stadiet i laksens liv hvor den er klar for å settes ut i saltvann
Utsett	- All fisk av samme størrelse forflyttet til samme saltvannsanlegg i samme periode
Utsettssesong	- Mulige sesonger for utsett av fisk, vår/høst år
Våranlegg	- Anlegg som har hoveddelen av utsett om våren. Henger sammen med brakklegging av anleggene på vinteren.

1 Innledning

Fisk er Norges tredje største eksportartikkel, med 4,5 % av den totale verdien av norsk eksport (SSB, 2010). Oppdrettslaks er den største delen av dette, med en samlet eksport i 2008 på over 18 mrd NOK, og ca. 4500 direkte sysselsatte (Fhl, 2010). Marine Harvest er den største aktøren i norsk havbruk, med over 200 000 tonn slaktet fisk i 2009 (Salmon Industry Handbook, 2010).

Maksimal tillatt biomasse (MTB) er nå gjeldende restriksjon for tillatt mengde fisk i sjøvannsanlegg i norsk oppdrettsnæring. Dette kravet gjelder både på anlegg- og regionsbasis. Store variasjoner i sjøvannstemperatur gir store sesongvariasjoner i veksten til laksen, og gjør det utfordrende å utnytte de lovbestemte kapasitetene optimalt.

I denne oppgaven bruker vi matematisk programmering for å gi beslutningsstøtte til et praktisk problem innenfor oppdrettsnæringen. Vi tar utgangspunkt i en stor produsent med flere forskjellige anlegg. En stokastisk modell som kan brukes som et planleggingsverktøy for utsett av smolt blir presentert. Vi tar hensyn til usikkerhet i vekst og dødelighet for fisken og passer på at produsenten ikke bryter myndighetsgitte krav.

I kapittel 2 presenteres noe nødvendig teori om stokastisk programmering, samt en innføring i tidligere arbeider innenfor oppdrettsnæringen. I kapittel 3 gir vi en introduksjon til oppdrettsnæringen, mens vi i kapittel 4 drøfter problemet med vekt på vekstmodellering og usikkerhet. Selve optimeringsmodellen blir presentert i kapittel 5. I kapittel 6 beskrives hvordan modellen er implementert i Xpress mosel. Resultatene fra implementeringen samt noe drøfting av disse gjøres i kapittel 7. Oppgaven avsluttes med en konklusjon med forslag til hva som kan gjøres av videre relatert arbeid i kapittel 8.

2 Teori

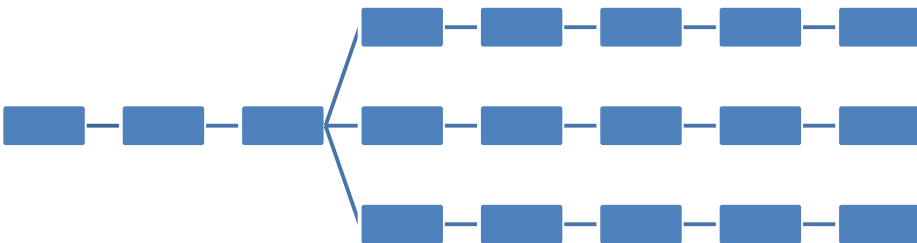
I dette kapitlet beskriver vi nødvendig teori for å forstå oppgaven. Vi antar at leseren har en viss kjennskap til lineær programmering fra før, men vil introdusere endel teori angående stokastisk programmering. Til slutt i kapitlet presenteres en oversikt over relevant litteratur.

2.1 Stokastisk programmering

Formålet med stokastisk programmering er å finne optimale løsninger på problemer hvor usikkerhet kan påvirke beslutningene en ønsker å ta. Stokastisk programmering gjør det mulig å formulere problemer der beslutninger tas i ulike steg, og man får tilgang til ny informasjon underveis. Grunnleggende konsepter for stokastisk programmering presenteres her. En fyldigere oversikt finnes i for eksempel Louveaux and Birge (1997) eller Kall and Wallace (1994).

2.1.1 Representasjon av usikker informasjon

Usikkerhet i stokastisk programmering representeres gjerne ved hjelp av et scenariotre. Scenariotreet er en diskret representasjon av usikkerheten hvor overgangen til et nytt steg demonstrer at ny informasjon blir tilgjengelig. Scenariotreet i figur 2.1 har tre perioder i første steg, og fem perioder i andre steg. Det er gjerne beslutningsvariable tilknyttet hver node i treet, men beslutningene kan i praksis tas i første periode i hvert steg ettersom det er da den nye informasjonen blir gjort tilgjengelig.



Figur 2.1: Tostegs scenariotre med tre perioder i førstesteget og fem perioder i andreteget.

2.1.2 Stokastisk problem med recourse-funksjon

Et generelt problem kan skrives på formen

$$\min c^T x + E_\xi Q(x, \xi) \quad (2.1)$$

$$Ax = b, \quad (2.2)$$

$$x \geq 0 \quad (2.3)$$

hvor $Q(x, \xi)$ er recourseproblemet, et optimeringsproblem hvor målfunksjon og/eller restriksjoner avhengig av beslutningen x og realisering av den usikre vektoren ξ .

I et tostegs stokastisk problem med *fixed recourse*, er $Q(x, \xi)$ på formen

$$Q(x, \xi(\omega)) = E_\xi[\min q(\omega)^T y(\omega)] \quad (2.4)$$

$$T(\omega) + W y(\omega) = h(\omega) \quad (2.5)$$

$$y \geq 0 \quad (2.6)$$

$\omega \in \Omega$ betegner her mulige realiseringer av usikkerheten. For hvert utfall, ω , er verdien til $y(\omega)$ løsningen av et lineært programmeringsproblem. Matrisen W kalles recourse-matrisen. Med *fixed recourse* er W uavhengig av hvilket scenario som inntreffer.

Vi kan forestille oss problemer der en bestemt førstestegsbeslutning gir et uløselig recourseproblem. Problemer som har egenskapen *relativt komplett recourse* har imidlertid en slik struktur at alle lovlige førstestegsbeslutninger, x , gir en lovlig annenstegsbeslutning, y .

Hvis vi har fixed recourse, et endelig antall mulige utfall og kjenner sannsynligheten for hvert utfall, kan vi definere den deterministiske ekvivalenten til problemet på følgende måte

$$\min c^T x + \sum_{\omega \in \Omega} p(\omega) q^T y(\omega) \quad (2.7)$$

$$Ax = b, \quad (2.8)$$

$$T(\omega) + W y(\omega) = h(\omega) \quad (2.9)$$

$$x, y(\omega) \geq 0 \quad (2.10)$$

2.1.3 Forventet verdi av perfekt informasjon (EVPI)

Et mål på konsekvenser av usikkerhet for et problem er forventet verdi av perfekt informasjon (EVPI). EVPI er definert som summen man er villig til å betale for å få komplett informasjon om fremtidige hendelser som har betydning for problemet (Louveaux and Birge, 1997). Innen stokastisk programmering antas usikkerheten å kunne uttrykkes ved hjelp av scenarier, og EVPI uttrykker da verdien av å vite

hvilket scenario som vil inntreffe. I et maksimeringsproblem vil EVPI uttrykkes slik:

$$EVPI = WS - SP \quad (2.11)$$

SP representerer løsningen av det originale stokastiske problemet, og WS er løsningen av “vent-og-se-problemet”, som er forventningsverdien til den optimale løsningen for hvert av de deterministiske problemene scenariene representerer.

2.1.4 Verdien av stokastisk løsning (VSS)

Et annet mål som er sentralt i stokastisk programmering er verdien av den stokastiske løsningen. For å finne denne byttes alle stokastiske parametre i modellen ut med forventningsverdien. Dette problemet som vi kaller EV, er da et rent deterministisk problem. Ved å implementere førstestegsløsningene fra EV i den stokastiske modellen, finner vi den forventede løsningen av forventningsverdi problemet (EEV). For et maksimeringsproblem er VSS er definert som:

$$VSS = SP - EEV \quad (2.12)$$

Dersom førstestegsbeslutningen fra EV i minst et scenario fører til et uløselig problem blir VSS uendelig. Dette vil imidlertid aldri være tilfelle for et problem med relativt komplett recourse.

2.2 Arbeider innen havbruk og relaterte områder

Stokastisk programmering er vidt anvendt i produksjonsplanlegging innen land- og havbruk. Blant annet er mye arbeid gjort innen jordbruk. Jacquet and Pluvinae (1997) og Van Paassen (2004) bruker begge tostegsmodeller med usikkert klimatisk utfall og tilhørende usikkerhet i hvordan veksten vil bli for forskjellige produksjonsalternativ. En optimeringsmodell for havbruk blir presentert i Muhammad (2010). Dette er en svært generell modell som modellerer alle steg fra eggkjøp til ferdige varer ved hjelp av splitting- og kombineringsprosesser. Denne modellen bruker mye av modellen fra Schütz and Tomasgard (2009) som er en omfattende optimeringsmodell for verdikjeden til kjøttproduksjon i Norge.

Det er skrevet flere artikler som omhandler oppdrettsbransjen, og effektivitetsvurderinger av den. Det er imidlertid gjort lite arbeid med optimeringsmodeller og med hensyn på produksjonskapasiteter for verdikjeden.

Flere artikler vurderer optimal innhøsting, uten hensyn til kapasitetskrav. I Bjørndal (1988) gjøres en mikroøkonomisk analyse av optimal innhøsting av laks og pig-gvar. Tidspunkt for innhøsting er her kun avhengig av priser og kostnader. Asche and Guttormsen (2002) tar hensyn til forskjellig vekst for forskjellige utsettstidspunkt. Her gjøres det også en vurdering av korrelasjonen mellom prisen man får for forskjellige vektklasser av fisk. Videre har Forsberg (1999) vist at ved å sortere laksen før slakting vil næringen kunne oppnå en profittøkning på opptil 10% sammenlignet med å slakte ut hele utsettet samtidig. Forsberg har klart å inkludere mange av de restriksjoner som en oppdretter står overfor i en MIP (Mixed Integer Programming)-modell.

I Kolbeinstveit (2004) benyttes en teori om sykluser til å vurdere norsk oppdrettsbransje. Bakgrunnen for dette var at oppdrettsbransjen i Norge var dominert av små aktører, som gjerne bare hadde et saltvannsanlegg, og dermed ville produsere ferdig laks kun i begrensede perioder. Når mange aktører benytter samme tidspunkt for utsett og slakting, vil det føre til store sykliske effekter for næringen. Dagens oppdrettsbransje er dominert av større aktører enn på 90-tallet. Disse aktørene har en mer kontinuerlig produksjon og dermed vil ikke slike sykliske svingninger oppstå i like stor grad nå. Et av få arbeider som tar for seg MTB-restriksjonen er Stikholmen (2010), hvor det foretas en lønnsomhetsanalyse av bransjen etter overgangen til MTB-regulering. Hansen and Hansen (2008) diskuterer også MTB-begrensningen og nevner at ved å ha utsett sommer vår og høst, kan en konsesjon utnyttes bedre enn dersom den kun dekket en utsettssesong.

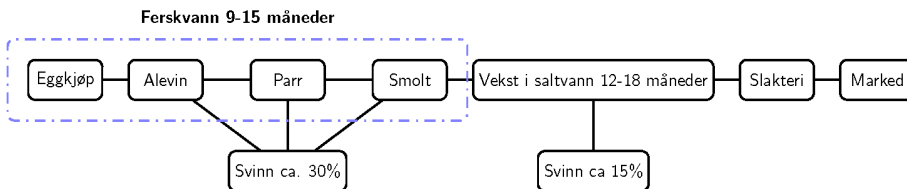
I Langan and Toftøy (2010) ble en deterministisk optimeringsmodell for oppdrettslaks under MTB-restriksjonen presentert. En forenklet versjon av denne, med kun en mulig slaktevekt, ble implementert. Her kom det blant annet fram at en mulighet til å sette ut store smolt gir betydelig forbedret effektivitet i saltvannsdelen av verdikjeden. Det ble også vist at total mengde årlig produksjon kan økes ved å endre strategien for smoltutsett fra likt utsett høst og vår til en strategi med større utsett på høsten enn på våren.

3 Introduksjon til bransjen

I dette kapittelet presenterer vi de forskjellige leddene i verdikjeden for oppdrett av laks i Norge, med hovedfokus på saltvannsdelen. Vi tar utgangspunkt i verdikjeden til Marine Harvest Region Midt, men den vil være gyldig for det meste av norsk oppdrettsbransje. Deretter presenteres noen sentrale aspekter som legger premisser for saltvannsdelen av næringen. Til slutt presenteres Marine Harvest Region Midt, som har vært hovedcasen i arbeidet med denne oppgaven.

3.1 Verdikjeden

Verdikjeden for oppdrett av laks strekker seg fra avl via en ferskvannsdelen og en saltvannsdelen til slakting og videreforedling før fisken selges (Se figur 3.1). Denne oppgaven fokuserer i hovedsak på saltvannsdelen av verdikjeden, men andre ledd i kjeden er med på å legge premisser for hva som er mulig i sjøvannsdelen.



Figur 3.1: Verdikjeden

3.1.1 Avl

Avlsleddet i verdikjeden består av forskning og utvikling av stammer med gode egenskaper for oppdrett. I tillegg strykes hannlaksen, og befrukter rogn i avlsleddet. Ferdig befruktet rogn kan nå leveres i perioden november til august. Den tradisjonelle høysesongen for egglevering har vært fra januar til mars, og fortsatt er dette perioden med størst tilgang på befruktede egg. Den største aktøren i norsk avl er Aquagen, som er eid av flere av de største lakseoppdrettsselskapene i Norge (Aquagen, 2010). Enkelte oppdrettere har også egne avlingsmuligheter.

3.1.2 Ferskvann

Ferskvannsdelen av verdikjeden varer 9-18 måneder, og går fra kjøp av befruktete egg til smoltifiseringen, som gjør fisken klar for saltvann. I ferskvann klekkes egg i spesialtanker med lys og varmeregulering, før den går gjennom flere stadier og stadig større kar før den smoltifiseres, og er klar for utsett i saltvann.

På et tidlig stadium bestemmes utsettssesong for smolten, slik at den skal være klar for saltvann til riktig tidspunkt. I Midt-Norge er de vanlige smolttypene 0-åring, 1-åring og 1,5-åring. 0-åringene settes ut i sjøvann på høsten ca. 9-10 måneder etter klekking, ved en vekt på omlag 85 g. 1-åringen settes vanligvis ut på våren 12–15 måneder etter klekking, med en vekt på ca. 100 g, mens 1,5-åringen tradisjonelt settes ut på sommeren ca 1,5 år etter klekking med vekt på opptil 150 g. 1,5-åringen er en type smolt som i hovedsak benyttes i Trøndelagsregionen, og er svært lite utbredt ellers.

Tradisjonell ferskvannsoppdrett er som saltvannsdelen svært sesongavhengig, da temperaturen i vannet ikke reguleres kunstig i stor grad utenom i de aller minste karene med nyklekket fisk. Moderne ferskvannsanlegg kan benytte vanngjenvinning, og har dermed mye større muligheter til å varme opp vannet, og holde det stabilt gjennom året. Dette gjør at det vil kunne produseres smolt av de fleste typer og vektklasser store deler av året. Stadig flere produsenter satser nå på vanngjennvinningsanlegg. Kategoriseringen av smolt blir dermed i større grad gjort gjennom vektklasser for utsatt, framfor de tradisjonelle smolttypene.

3.1.3 Saltvann

Fisken flyttes fra ferskvanns- til saltvannsanlegg med brønnbåter. Et saltvannsanlegg består av flere merder som gjør at man kan sette ut fisk i flere omganger og av flere typer i samme anlegg, men fortsatt ha full sporbarhet. Veksten i sjøvann er avhengig av temperaturen i vannet i tillegg til føringen. Svinn i saltvann varierer mye, men mellom 5 og 25 % er vanlig. Virussykdommen IPN¹ er den viktigste kilden til svinn i Nord- og Midtnorge. Fisk som dør på grunn av IPN, dør som regel i løpet av de første ukene etter utsett i saltvann.

Saltvannsanleggene kan grovt sett deles opp i anlegg som setter ut smolt om våren og anlegg som setter ut smolt på høsten. Våranlegg har utsett fra februar til juni, med hovedvekt på mai, mens høstanleggene har utsett fra juli til november med hovedvekt på september. Utsett i desember og januar gjøres ikke på grunn av de lave sjøtemperaturene i disse månedene. I februar og november settes det også tradisjonelt sett ut svært lite smolt.

Et saltvannsanlegg består stort sett kun av fisk satt ut i en og samme utsettssesong. Etter at all fisken har blitt slaktet, må anlegget brakklegges. Det vil si tomt for biologisk materiale i minst to måneder før ny smolt ankommer anlegget. Med en del rengjøring, og annen klargjøring betyr det i praksis at det tar ca. 3 måneder fra siste fisk er tatt ut av anlegget til ny smolt er på plass. Totalt regnes det ofte med at et saltvannsanlegg har toårs-sykluser fra første smoltutsett, til anlegget har vært tømt og er klart for et nytt utsett.

I saltvann vokser fisken i mellom 12 og 18 måneder før den er klar for slakting. Veksten til laksen er avhengig av temperaturen i sjøen, dermed vokser laksen

¹Infeksiøs pankreas nekrose

betraktelig fortere på sommeren og tidlig på høsten enn om vinteren. Ofte opereres det med en målsatt slaktevekt som oppdretterne forsøker å slakte flest mulig fisk på. I Marine Harvests Region Midt opereres det med en målvekt på 6 kg.

3.1.4 Slakting og foredling

Før slakt og sortering må fisken sultes i minst fire dager for å gjøre den mer robust for stress og lettere å håndtere. For å fraktes til slakteriene brukes en brønnbåt, som kan ta opp til 250 tonn fisk om gangen. Marine Harvest har ett slakteri i hver av de fire regionene i Norge. Slakteriene besitter en slaktemerd, hvor fisken som kommer med brønnbåten kan leve fram til den slaktes. Etter slakt kan fisken bli solgt direkte eller videreforedlet til ferdige matprodukter før den selges.

3.2 Konesjoner og MTB

Fram til 1991 var det ikke tillatt å ha mer enn en konsesjon for hvert selskap. Dette har blitt kraftig liberalisert, men fortsatt har ingen aktør lov til å eie mer enn 25 % av konsesjonene i Norge. Etter liberaliseringen, har bransjen opplevd stor grad av horisontal og vertikal integrasjon, og man har fått store aktører som Marine Harvest, Lerøy og Salmar.

Siden 2005 har maksimal tillatt biomasse (MTB) i tonn vært gjeldende begrensning for mengde fisk i merd, på anlegg og i region. MTB-reguleringen overtok for et mer sammensatt reguleringsregime basert på førkvoter, konsesjonsvolum- og biomassebegrensninger.

Oppdrettsnæringen i Norge reguleres av et konsesjonsreglement. En konsesjon gir normalt i Sør-Norge tillatelse til en biomasse på 780 tonn. En konsesjon kan deles mellom opptil fire anlegg, og en gruppe på to konsesjoner kan deles mellom opptil seks anlegg. Et anlegg dekkes som regel av flere konsesjoner. Summen av alle konsesjonene i en region gir en regions-MTB. Disse regionene er gitt av fiskeridirektoratet, og følger som regel fylkesgrensene. Hvilke anlegg en konsesjon dekker kan endres fortløpende hvis man melder inn til Fiskeridirektoratet². I tillegg har hvert anlegg en MTB, bestemt av miljøhensyn, den er godkjent for. Konsesjonene deles ut av fylkeskommunen, og MTB-kravene for anlegg og region kontrolleres av Fiskeridirektoratet (Fiskeridirektoratet, 2010).

På grunn av sesongvariasjonene i lakseoppdrett har oppdrettsselskaper problemer med å utnytte MTB-begrensningen gjennom hele året. På sensommeren og høsten stiger mengden biomasse i anleggene fort på grunn av høye sjøtemperaturer, og MTB-beskrankningen kan være en viktig begrensning, som i verste fall gjør at

²I og med at summen av konsesjonene gir regions-MTBen vil det si at det ikke er mulig å bryte regions-MTB-kravet uten å også bryte kravet for minst en av konsesjonsgruppene. Siden konsesjonene kan flyttes rundt etter hvilke anlegg som trenger de, og kontrollene fra fiskeridirektoratet kontrollerer kun regions- og anleggs-MTB, vil allokeringen av konsesjoner til anlegg ikke bli gått videre inn på i denne oppgaven.

det må foretas nødslakt før fisken har nådd slaktevekt. Oktober har tradisjonelt vært den måneden med størst press på MTB-beskrankningene. Om vinteren og våren når det er lave sjøtemperaturer vokser fisken sakte, og det blir vanskelig å utnytte hele MTB-en. Bransjen ønsker å ha laks tilgjengelig for salg forholdsvis jevnt gjennom hele året, dermed må laks slaktes ut også gjennom vintersesongen, selv om tilveksten da er forholdsvis lav.

I tillegg til anleggs- og regions-MTB er det også en begrensning på hvor mye fisk det kan være i en merd. Maksimal tillatt tetthet av fisk er 25 kg/m^3 , noe som direkte bestemmer maksimal tillatt biomasse for en merd med en gitt størrelse. Merder er ikke regulert av konsesjonsbestemmelsene, så man kan i teorien investere i nye merder så lenge det er plass til dem.

3.3 Lusesoneinndeling og felles brakklegging

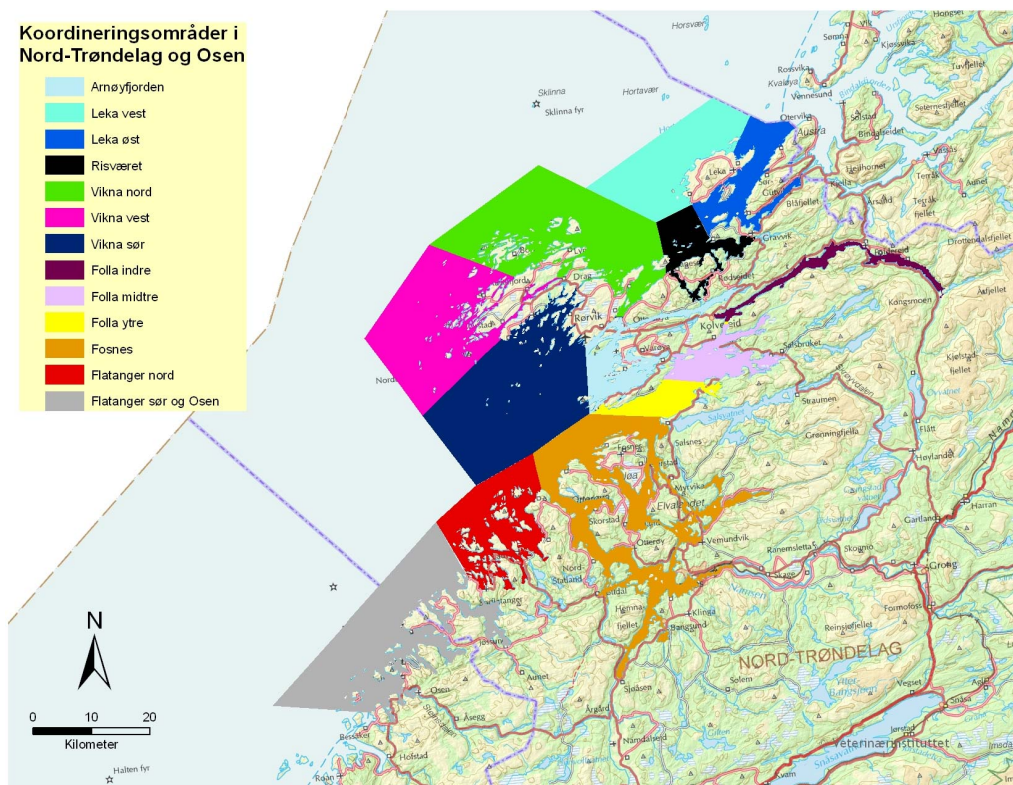
Oppdrettsnæringen er under sterk oppsikt fra myndigheter og miljøvernere, som vil sikre at oppdretten ikke går på bekostning av villaks og andre miljøhensyn. I Trøndelag har derfor bransjen startet innføring av lusesoner. Lusesonene er områder hvor alle oppdrettere binder seg til å brakklegge anleggene sine samtidig, for å unngå spredning av lus og sykdommer mellom soner og generasjoner. Dette gjennomføres ved at en av de to månedene med brakklegging skal alle anlegg innad i en lusesone være tom for biomasse. Det vil også være forbudt å flytte laks fra en lusesone til en annen. Hvor mange anlegg som befinner seg i en lusesone varierer veldig etter hvor tett anleggene ligger, og geografien i området. Grensene mellom forskjellige lusesoner følger kommunegrenser eller naturlige skillelinjer. Innføringen av lusesoner fører til at startutsettstidspunktene for et anlegg vil være gitt. I figur 3.2 ser man hvordan lusesonene er delt opp i Nord-Trøndelag.

Anleggene i en lusesone har oftest toårssykluser. De anleggene som starter utsettene ved et tidspunkt kan sette ut på nytt samme tid to år senere. Hver lusesone har gitt ett av fire oppstartstidspunkt, som markerer avslutningen på brakkleggingsperioden i sonen. Oppstartstidspunktene er nå gitt som vår partallsår, høst partallsår, vår oddetallsår og høst oddetallsår. Hvilke anlegg som starter til hvilke tidspunkt blir gitt av soneinndelingen.

3.4 Marine Harvest Region Midt

Region Midt hos Marine Harvest består av 39 saltvannsanlegg og 5 ferskvannsanlegg samt ett slakteri.

De fem ferskvannsanleggene i Region Midt har forskjellige teknologiske muligheter. Anlegget på Nordheim i Aure er et moderne anlegg med vannjennvinning. Dermed kan de her styre temperaturene betraktelig bedre enn ved tradisjonelle ferskvannsanlegg, og dermed i større grad kontrollere og manipulere veksten til smolten. De



Figur 3.2: Eksempel på lusesoner i Nord-Trøndelag. Kun de tre sørligste sonene hører til Marine Harvests Region Midt.

andre fire anleggene er mer avhengige av omgivelsestemperaturen i smoltproduksjonen.

Saltvannsanleggene ligger på Smøla, Tustna og Averøy på Nordmøre, i Sør-Trøndelag og i de sydligste delene av Nord-Trøndelag (se tabell 3.1). De seks saltvannsanleggene som ligger på Nordmøre hører til Fiskeridirektoratets region Møre og Romsdal, mens resten av anleggene hører til Fiskeridirektoratets region Trøndelag. Dette fører til at Marine Harvest sin Region Midt vil måtte forholde seg til to regions-MTBer. For anleggene på Nordmøre er maksimal regionsbiomasse 7800 tonn, for anleggene i Trøndelag er tilsvarende tall 32760 tonn. Saltvannsanleggene har forskjellig mengde biomasse de er godkjent for, fra 1520 til 7020 tonn. Disse grensene er satt på grunnlag av miljø- og plasshensyn. I tabell 3.1 ser vi også utsettssesongene for de forskjellige anleggene.

Alle anleggene i regionen sogner til et felles slakteri på Ulvan på Hitra som har en slaktekapasitet på opptil 70 000 fisk per dag. Det er også en slaktemerd ved slakteriet hvor opptil 800 tonn fisk kan befinne seg. For å frakte fisk til slakteriet har Marine Harvest Region Midt to brønnbåter med lastekapasiteter på 130 og 250 tonn.

Marine Harvest er i en posisjon som gjør at de kontrollerer det meste av verdikjeden sin selv. De følger varen helt fra egg til ferdig produkt, og kan dermed selv designe og optimere hele verdikjeden. Marine Harvest er imidlertid tydelig oppdelt i avdelinger for ferksvann, saltvann og marked der saltvannsavdelingene legger inn smoltbestillinger til ferskvannsanleggene, mens markedsavdelingene forteller saltvannsavdelingene hva de ønsker å få slaktet ut.

Tabell 3.1: Anleggsoversikt over saltvannsanleggene til Marine Harvest Region Midt.
Kilde: Fiskeridirektoratet, 2010

<i>Anlegg</i>	<i>Kommune</i>	<i>Anleggs-MTB</i>	<i>Startutsett</i>
Bremssessaet	Smøla	5460 tonn	Vår 2012
Brettingen	Smøla	5460 tonn	Vår 2012
Leite	Averøy	3900 tonn	Høst 2012
Kornstad	Averøy	3120 tonn	Høst 2011
Rokset	Averøy	3120 tonn	Høst 2011
Storvikja	Aure	3120 tonn	Høst 2012
Tennøya	Frøya	3900 tonn	Vår 2011
Mannbruholmen	Frøya	7020 tonn	Vår 2011
Grøttingsøy	Frøya	5460 tonn	Vår 2011
Slettholmene	Frøya	3120 tonn	Vår 2011
Langskjæra	Frøya	5460 tonn	Vår 2011
Ilsøya	Frøya	3900 tonn	Høst 2011
Gåsholmen	Frøya	2340 tonn	Høst 2011
Storbrannøya	Frøya	1560 tonn	Høst 2011
Lille Torsøy	Hitra	5200 tonn	Høst 2011
Korsholman	Hitra	3120 tonn	Høst 2011
Helsøya	Hitra	3900 tonn	Høst 2011
Osholmen	Hitra	3120 tonn	Høst 2012
Svellungen	Hitra	3120 tonn	Høst 2012
Kåholmen	Hitra	4680 tonn	Høst 2012
Heggvika	Hitra	2340 tonn	Høst 2012
Grønnholmsundet	Hitra	1820 tonn	Høst 2012
Sengsholmen	Hitra	1560 tonn	Høst 2012
Veddersholmen	Bjugn	4680 tonn	Vår 2012
Flatøya	Bjugn	2340 tonn	Vår 2012
Breidvika	Osen	5460 tonn	Høst 2011
Indre Skjervøy	Osen	7020 tonn	Høst 2011
Drogsholmen	Roan	2340 tonn	Høst 2011
Svefjorden	Osen	2340 tonn	Høst 2011
Almurden	Flatanger	3900 tonn	Høst 2011
Estenvika	Flatanger	2340 tonn	Høst 2011
Austvika	Flatanger	3120 tonn	Høst 2011
Bjørgan	Flatanger	5460 tonn	Høst 2012
Dalavika	Flatanger	1560 tonn	Høst 2012
Feøyvika	Flatanger	5460 tonn	Høst 2012
Bragstadsundet III	Fosnes	3900 tonn	Vår 2012
Kjelneset	Fosnes	4680 tonn	Vår 2012
Ølhammaren	Fosnes	2340 tonn	Vår 2012
Vedøya	Fosnes	3120 tonn	Vår 2012

4 Drøfting av problemet

I dette kapitlet drøfter vi problemet som modelleres. Først presenterer vi en motivasjon for oppgaven, før vi går i dybden på to utfordringer ved problemet, vekstmodellering og usikkerhet. For disse to temaene er både praktiske og optimeringstekniske spørsmål diskutert, og våre valg blir presentert og begrunnet.

4.1 Motivasjon

Siden konsesjonsreglementet har blitt endret mye i norsk oppdrettsbransje, er det ikke gjort mye arbeider som tar for seg problemstillingene i dagens oppdrettsnæring. Tidligere arbeider som tar for seg produksjonsplanlegging i oppdrettsbransjen som for eksempel Guttormsen and Forsberg (2005) tar ikke for seg hvordan et firma med mange anlegg har muligheter til å slakte fra flere steder, eller begrensninger på biomasse i anlegg eller region.

Med en portefølje av mange saltvannsanlegg, har selskaper som Marine Harvest muligheten til å ha forskjellige anlegg i motfase, slik at enkelte anlegg har mye stor fisk, og ligger tett opp mot sin anleggs-MTB, mens andre anlegg ligger brakk. Likevel opplever selskapet at det er vanskelig å utnytte regions-MTB-kapasiteten til fulle. Om våren er biomassen ofte langt under MTB-restriksjonen, mens på høsten kan man risikere nødslakt for ikke å overstige grensen.

Store temperatursvigninger gjennom året har store konsekvenser for veksten til laksen, som vokser betraktelig fortere i varmt vann (opp til ca. 16 °C) enn i kaldt vann, og gir dermed disse store sesongvariasjonene. Riktig timing av smoltutsett og slaktning blir viktig for å kunne utnytte kapasitetene best mulig.

Et mål på hvor godt MTB-kapasitetene utnyttes er tonn produsert laks per konsesjon. En konsesjon består av 780 tonn MTB på regionsbasis. Grieg Seafood anslo på konferansen “North Atlantic Seafood Conference” at ved å endre smoltstrategien sin kan de gå fra under 1200 tonn produsert laks per konsesjon til 1470 tonn per konsesjon uten å øke kostnadsnivået (gri (2011)). 270 tonn produsert laks vil med en avanse på opp mot 15 kr/kg bety en økning i profitten på ca 4 millioner kroner i året per konsesjon. Å utnytte MTB-kapasitetene bedre er et viktig tema for de fleste oppdrettere, og kan som vist i dette eksempelet føre til store økninger i lønnsomhet.

Sjøvannstemperaturen varierer ikke bare gjennom året, men også fra et år til et annet. I og med at vi ikke vet hvilke sjøvannstemperaturer som vil inntreffe, får vi usikkerhet i laksens vekst. Dødeligheten i et smoltutsett er også vanskelig å forutse. Hvis IPN-viruset bryter ut, kan store deler av et utsett dø, og dermed gi store endringer i prognosene for fremtidig biomasse. Det er stor grunn til å tro at usikkerheten i vekst og dødelighet har innvirkning på hva som vil være optimale beslutninger.

I dag benyttes stort sett simuleringsmodeller for å planlegge smoltutsett og utslakting. Ved hjelp av vekstmodeller basert på empiriske data kan veksten til fisken simuleres, og man kan få et tidspunkt hvor fisken er forventet slakteklar. Samspillet mellom de forskjellige anleggene i en region i det totale biomasseregnskapet, samt planlegging av utslakting med ett til to års horisont er imidlertid ikke trivielt gitt. Slike beslutninger tas oftest med basis i prøving og feiling, samt tidlige erfaringer. En optimeringsmodell kan sammen med vekstsimuleringer gi et bedre beslutningsgrunnlag.

4.2 Vekstmodellering

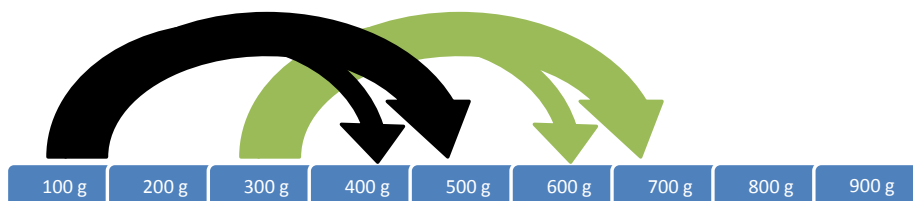
Å modellere vekst er noe som kan gjøres på flere måter. Det finnes en del vekstmodeller basert på empiriske data, men det er vanskelig både å kjenne, og å ta hensyn til alle parametre som påvirker veksten. Temperatur er en viktig faktor. Det sørger for at veksten i to forskjellige perioder kan være ulik, selv om fiskens størrelse og alle andre faktorer er like.

I en LP-formulering, må en ulineær vekstmodell lineariseres. Det at fiskens størrelse påvirker veksten, samt at størrelsen kan ha påvirkning på fiskens verdi, gjør at vi må holde kontroll over både størrelse og antall. Vi er i tillegg nødt til å holde kontroll på biomassen, altså produktet av antall og gjennomsnittsvekt. Dersom både antall og vekt er variable i en LP-formulering, ender vi dermed opp med en ulineær modell, noe som øker kompleksiteten dramatisk. Vi må derfor diskretisere en av variablene, og valget faller da mest naturlig på veksten. Uavhengig av hvilken vekstfunksjon som benyttes, må vi utvikle veksten fra periode til periode. Vi har vurdert to forskjellige metoder for diskretisering:

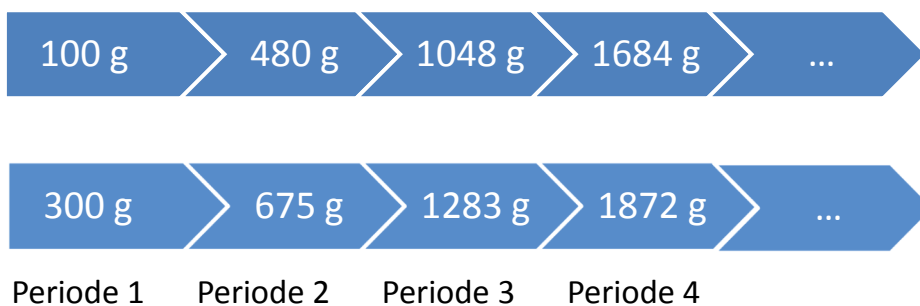
1. Vekstovergangskoeffisienter
2. Vekstutvikling fra kjent utgangspunkt

I metode 1 simulerer vi veksten periode for en periode med en vekstmodell som tar fiskens vekt og dato/temperatur som input. For hver periode regner vi ut overgangskoeffisienter slik at fisk som befinner seg i en vektklasse, i påfølgende periode er fordelt på to nye vektklasser. Figur 4.1 illustrerer dette prinsippet. Merk, nye koeffisienter må regnes ut for hver periode ettersom temperaturen fra periode til periode som regel vil endre seg.

I metode 2 holder vi i steden styr på gjennomsnittsvekten i hvert utsett for seg. I steden for å fordele fisken i nye klasser for hver periode, får vi en vektor med vektstutviklingen i periodene fremover. Hver vektklasse blir gitt en utvikling som i figur 4.2. En samling fisk er altså i samme vektklasse hvis de er like store ved starttidspunktet, derfra vil fisken modelleres til å vokse som gjennomsnittsfisken. Et spørsmål her, blir lengden av denne vektoren. Den må gå "helt til noe annet skjer". Det kan for eksempel være utslakting, planleggingsperiodens slutt eller et tidspunkt for refordeling i nye fiskeklasser (som i metode 1).



Figur 4.1: Metode 1: Fisken er inndelt i forskjellige klasser. I løpet av en periode vokser fisken og blir fordelt i nye klasser. I tilfellet over er overgangskoeffisienten fra 100 g til 400 g lik 0,2, mens koeffisienten fra 100 g til 500 g er lik 0,8.



Figur 4.2: Metode 2: Vekstutvikling for fisk som starter i vekstklassene 100 g og 300 g. Merk at vekten i periode 2 samsvarer med figur 4.1, samme vekstmodell er brukt for begge lineariseringene i figur 4.1 som i denne.

Hvilken metode som er gunstigst å velge, avhenger av hva som er viktig i modellen. Ved liten vekst fra periode til periode, gjerne forbundet med kort periodelengde, vil metode 1 føre til behov for mange forskjellige vektklasser. Dersom vi har få vektklasser, vil vi alltid ende opp med at noe fisk forblir i den samme vektklassen fra periode til periode. Dermed vil den aldri nå slaktevekt. Dersom vi alltid fordeler fisken i to etterfølgende vektklasser, vil et utsett bli spredd over flere og flere vektklasser når vi følger et utsett over flere perioder. Det er en viss spredning i veksthastighet hos fisk, men for at ikke noe fisk skal vokse unaturlig fort eller sakte, er det igjen en forutsetning at det finnes tilstrekkelig antall vektklasser å fordele veksten på.

Med metode 1 er det behov for å holde oversikt over antall fisk i hver vektklasse i hver tidsperiode. Med metode 2 er det derimot tilstrekkelig å holde oversikt over antall fisk i første periode, og vi kan dermed spare endel variable. Ulempen er at fleksibiliteten i utslakting blir betraktelig mindre. Når det ikke er en variabel for antall i hver tidsperiode, må slaktingen styres av en regel. En mulig regel er at fisken slaktes idet den når en forhåndsbestemt slaktevekt. For å øke fleksibiliteten i metode 2 vil det være mulig å ha beslutninger som velger mellom flere aktuelle

utslaktingsregler for et utsett. Jo flere forskjellige regler (les: slaktevekter), vi ønsker for hvert utsett, jo flere vektorer trenger vi med tilhørende variable.

Fordelen med metode 2 er først og fremst at den gjør det mulig å modellere veksten med betraktelig besparelse i antall variable. Behovet for antall vektklasser blir mindre, og det trengs i tillegg ingen variabel for antall annet enn i første periode (evt. første periode for et utsett). Metode 1 er å foretrekke dersom tidsoppløsningen er lav, og det er behov for et stort utvalg av slaktevekter/tidspunkt³.

4.3 Usikkerhet

I produksjon av oppdrettslaks er det flere usikre faktorer som har betydning for beslutninger som smoltutsett og slakt.

Både antall og størrelse på smolten man faktisk får levert fra settefiskanlegget er usikker. Særlig gjelder dette med tradisjonelle ferskvannsanlegg der temperaturen på vann man tar inn i anlegget påvirker veksten.

Temperaturen i sjøvann påvirker som nevnt veksten. Særlig vil en ekstra kald vinter gi store utslag i form av redusert vekst. For de månedlige sjøvannstemperaturene i i Sør-Trøndelag fra 1998 til 2006 varierte sjøvannstemperaturen for hver måned med opptil 4,4 °C. Forskjell i vekst endrer tidspunktet for når fisk vil nå slaktevekt, og kan dermed føre til skift i biomassen. Ved bruk av en vekstmodell med temperatur som input, kan vi ved hjelp av forskjellige temperaturscenarier direkte utvikle vekstscenarier.

Siden utbrudd av sykdommer som IPN er et problem i oppdrettsnæringen, vil dødelighet i forbindelse med smoltutsettet være en viktig usikkerhetsfaktor.

På det operasjonelle plan kan uforutsette hendelser som uvær og tekniske problemer forhindre brønnbåter i å utføre planlagte oppdrag.

Ekstremtilfeller slik som rømming er også en usikkerhetsfaktor. Sannsynligheten for rømming er (i hvert fall bør være) veldig lav.

Rammebetingelser kan endre forutsetningene for oppdrett. Ofte prøver imidlertid oppdretterne å ligge i forkant av reguleringer som med innføringen av lusesoner. I en taktisk modell vil vi kun ta utgangspunkt i gjeldende betingelser og praksis.

Usikkerheten i etterspørsel/pris påvirker beslutningene, men først og fremst utslakting. Avstanden i tid fra utsett til salg er såpass stor at usikkerheten i fremtidig pris i begrenset grad kan styre smoltutsettet.

³Metodene blir ekvivalente dersom vi for metode 1 lar antall vektklasser gå mot uendelig og for metode 2 lar antall slaktevekter gå mot uendelig. Begge metodene blir imidlertid ubrukelige.

5 Tostegsmodell

I dette kapitlet presenterer vi en tostegs stokastisk optimeringsmodell for planlegging av smoltutsett. Modellen tilpasser utsett og slakting for å maksimere profitt. Vi presenterer restriksjonene som gjelder for problemet og hvordan disse er modellert.

I det første steget av modellen besluttes hvordan smoltutsettet og slakt skal være et gitt antall perioder fremover. I det andre steget av modellen bestemmes smoltutsett og utslakting for resten av planleggingsperioden, etter å ha fått oppdatert informasjon om tilstanden i anleggene. Det kan være naturlig å tenke på førstesteget som en eller flere hele utsettssesonger.

5.1 Usikkerhet

Vi har modellert usikkerheten i problemet ved hjelp av et tostegs scenariotre. Vi har valgt å modellere usikkerhet på vekst for all fisk og dødelighet/overlevelsesgrad for smolten vi setter ut i optimeringsmodellen. I førstesteget antas det forventet vekst og overlevelse. Ved overgangen til andreteget gjøres ny informasjon tilgjengelig og vi får en oppdatering på hvordan fisken i anleggene faktisk har vokst, og hvor mye av smolten som har overlevd. Altså får vi en oppdatering på hvilken biomasse vi har og hvordan størrelsesfordelingen er. I andreteget antar vi videre deterministisk vekst og må tilpasse beslutningene som skal tas etter hva vi hadde som inngående biomasse i steget.

5.2 Vekstmodellering

For å modellere veksten fra periode til periode benytter vi metode 2 fra kapittel 4.2, vekstutvikling fra kjent utgangspunkt, mens vi for stegovergangen har valgt å bruke overgangskoeffisienter. Ved å fordele i nye vektklasser ved stegovergangen, slipper vi at recoursematrisen blir avhengig av scenario og oppnår dermed fixed recourse. Siden et steg består av flere perioder blir det behov for langt færre vektklasser enn dersom vi skulle brukt overgangskoeffisienter hele veien.

Vi motiverer valget av en vekstutvikling fra kjent utgangspunkt som vekstmodellering fra periode til periode med at aktører i bransjen gjerne opererer med en målvekt. En ønsker da å slakte ut hoveddelen av fisken på denne vekten. For et planleggingsverktøy med hovedfokus på smoltutsettene antar vi at et begrenset antall andre slaktevekter vil gi tilstrekkelig fleksibilitet i utslaktingen. For presentasjon og drøfting av vekstmodellering, se kapittel 4.2.

5.3 Andre antagelser

- Vekst er kun avhengig av sjøtemperatur(dato og scenario), smolttype (vårfisk/høstfisk) og fiskens størrelse.
- Det antas en lukket verdikjede, der ingen varer blir kjøpt eller solgt før det de er ferdige produkter.
- Antall fisk kan sees på som et kontinuerlig tall.
- De variable kostnadene avhenger lineært av antall smolt/fisk.
- Det slaktes ut på diskrete slaktevekter, utslakting foregår i første periode etter at slaktevekten nås.
- Fiskedød antas å inntreffe umiddelbart etter smolten er satt ut i saltvann. Smolten som dør kommer aldri med i biomasseregnskapet.
- Fisk som settes ut i førstesteget, vil ikke også bli slaktet i førstesteget.
- Verdien av fisk er kun avhengig av slaktevekt. Vi ser bort ifra andre mulige kvalitetsparametre som laksestamme, vaksine og fasthetsgrad.
- Innenfor et anlegg vil all fisk av samme størrelse vokse like fort. All fisk av samme størrelse med lik slaktevekt vil slaktes ut samtidig.
- Vi ser bort ifra begrensninger knyttet til brønnbåtene.
- Alle pengebeløp antas å være i realverdi.

5.4 Deklareringer

Vi bruker en notasjon hvor beslutningsvariable har liten bokstav og konstanter har stor bokstav. Store senkede bokstaver er en fortsettelse av variabel/konstantnavnet, mens små senkede bokstaver er indekser. Variable og konstanter som er avhengig av scenario er angitt med (ω) . *KALIGRAFISK* stor bokstav angir sett. Hevede tall angir hvilket steg en gitt beslutning, konstant eller sett gjelder for.

- Sett

$\mathcal{J} = \{1, 2\}$	Sett av alle steg i modellen.
\mathcal{I}	Sett av alle sjøvannsanlegg.
$\mathcal{I}_{FØRST}$	Sett av alle sjøvannsanlegg med utsett i første steg.
\mathcal{S}	Sett av alle smolttyper.
\mathcal{T}^j	Sett av alle tidsperioder i steg j .
\mathcal{T}_{UTS_i}	Sett av alle utsettsperioder for anlegg i .
\mathcal{T}_{SLUTT_i}	Sett av alle tidsperioder i planleggingsperioden hvor biomasse og slakt fra anlegg i settes lik en sluttverdi.
\mathcal{B}	Sett av alle tillatte slaktevekter.
\mathcal{V}	Sett av alle vektclasser for inngående balanse ved

	starten på et steg.
\mathcal{R}	Sett av alle regioner.
\mathcal{L}_l	Sett av tidsperioder for slaktekrav. Består av et antall perioder t etter hverandre.
\mathcal{L}_{INDEKS}	Sett av indekser som beskriver mulige \mathcal{L}_l . $l \in \mathcal{L}_{INDEKS}$
\mathcal{D}_d	Sett av tidsperioder for smoltrestriksjoner. Består av et antall perioder t etter hverandre.
\mathcal{D}_{INDEKS}	Sett av indekser som beskriver mulige \mathcal{D}_d . $d \in \mathcal{D}_{INDEKS}$
Ω	Sett av alle mulige utfall.

- Indekser

i	Lokasjonsindeks.
t, τ	Tidsindekser.
s	Smolttypeindeks.
v	Vektklasseindeks. Henviser til vekten i første periode i et steg.
b	Slaktevektindeks.
j	Stegindeks.
r	Regionsindeks.
l	Indeks for sett av perioder med slaktekrav.
d	Indeks for sett av perioder med smoltutsettsbegrensning.

- Variable

Alle andrestegsvariable ($j = 2$) vil i tillegg få scenarioindeks, (ω), til slutt.

y_{isbt}^j	Antall smolt av type s satt ut i anlegg i i periode t besluttet i steg j . Hvis fisken slaktes i samme steg som den settes ut benyttes også en slaktevektindeks b .
x_{ivb}^j	Antall laks i vektklasse v som skal slaktes ved slaktevekt b i anlegg i besluttet i steg j .
z_{ivbt}^j	Antall laks fra vektklasse v som slaktes ved slaktevekt b i periode t fra anlegg i ved steg j .
s_{ibt}^2	Antall laks satt ut i steg 2 som slaktes ved slaktevekt b i periode t fra anlegg i .
b_{IOMit}^j	Biomassen i anlegg i ved periode t .
i_{Biv}^2	Antall fisk i vektklasse v i anlegg i ved inngangen til steg 2.
m_{MTBIt}^j	Brudd på MTB-restriksjon i anlegg i i periode t .
m_{MTBMr}^j	Brudd på regions-MTB-restriksjon i region r i periode t .
$m_{MAXSLAKTl}^j$	Brudd på maksimal slaktekapasitet i slakteperiode l .
$m_{MINSLAKTl}^j$	Brudd på minstekrav for slakt i slakteperiode l .

- Konstanter

$C_{SMOLTisb\tau t}$	Saltvannsprofitt for fisk satt ut i periode τ av smolttype s slaktet ved vekten b i periode t fra anlegg i .
$C_{LAKSivbt}$	Saltvannsprofitt for fisk fra vektklasse v slaktet ved vekten b i periode t fra anlegg i .
$K_{SMOLTsvt}(\omega)$	Koeffisient som fordeler andel smolt av type s utsatt i periode t i første steg i vektklasse v i andre steg.
$K_{LAKSvv'b}(\omega)$	Koeffisient som fordeler andel laks fra vektklasse v i første steg til vektklasse v' i andre steg.
I_{Biv}	Antall fisk i vektklasse v i anlegg i ved starttilstanden.
$W_{SMOLTisb\tau}$	Vekt i periode τ for smolt av type s utsatt i periode t i anlegg i for slaktevekt b .
$W_{LAKSivt}$	Vekt i periode t for laks fra vektklasse v i anlegg i .
MTB_{it}	Maksimal tillatt biomasse i anlegg i i periode t .
MTB_r	Maksimal tillatt biomasse i region r .
G_{st}	Maksimal mengde smolt av type s som kan settes ut i periode t .
G_{sp}	Maksimal mengde smolt av type s som kan settes ut i smoltperiode p .
O_{MINI}	Nedre grense for slakt i tidsperiode l .
O_{MAKSI}	Øvre grense for slakt i tidsperiode l .
$A_{SMOLTisb\tau}$	Binær koeffisient som er 1 dersom smolt av type s utsatt i anlegg i i periode t slaktes ved slaktevekt b i periode τ .
$A_{LAKSivb\tau}$	Binær koeffisient som er 1 dersom fisk i anlegg i fra vektklasse v slaktes ved slaktevekt b i periode τ .
$O_{VERL}(\omega)$	Andel smolt som overlever gitt ω .
O_{VERLF}	Andel smolt som overlever i deterministiske perioder.
U_{Bit}	(Utgående) biomasse i anlegg i ved periode $t \in \mathcal{T}_{SLUTT_i}$.
U_{St}	Antall utslaktet fra anlegg i i periode $t \in \mathcal{T}_{SLUTT_i}$.
$PROFITtb$	Profitt per kilo i saltvannsleddet av verdikjeden ved slakt på vekt b .
M_{MTB}	Straffekostnad for brudd på MTB-restriksjon på anleggsbasis.
M_{MTBR}	Straffekostnad for brudd på MTB-restriksjon på regionsbasis.
$M_{MAXSLAKT}$	Kostnad for å overstige slakterikapasitet.
$M_{MINSLAKT}$	Kostnad for å ikke overholde minstekravet for slakt.
$M_{IBSLAKT_v}$	Kostnad ved nødslakt av fisk i vektklasse v ved inngangen til et nytt steg.

5.5 Modell

5.5.1 Inngående biomasse

Med inngående biomasse I_{Biv} betegner vi antall fisk som allerede finnes i et gitt anlegg i i første periode. v angir her fiskens vektklasse. Merk at vektklasse kun henviser til fiskens vekt i første periode i et nytt steg.

Beslutningen x_{ivb}^1 har to hensikter. Den ene er å bestemme hvilken slaktevekt, b som skal settes for fisken. Den andre er å bestemme hvor mye av fisken som bør nødslaktes. Nødslakt er å ta ut fisk fra den inngående biomassen utenom ordinært slakt. Grunnen til at vi tillater nødslakt, er at inngående biomasse kan ha en slik sammensetning at enkelte restriksjoner i nær eller fjern fremtid nødvendigvis vil brytes. I objektfunksjonen er nødslakt modellert med en straff, avhengig av hvilken vektklasse det slaktes fra. I praksis vil ikke all nødslakt foregå på samme tidspunkt, men løses som et separat operasjonelt problem. Nødslakt inngår derfor heller ikke i slaktevolumet som begrenses av slakterikapasiteten. I (5.1) defineres at det antallet fisk vi skal ta med videre til slakt på slaktevektene b må være mindre enn det som er i sjøen ved starttidspunktet. Dette gjelder for alle anlegg i og vektclasser v .

$$\sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^1 \leq I_{Biv} \quad i \in \mathcal{I}, v \in \mathcal{V} \quad (5.1)$$

Kostnaden i objektfunksjonen ved nødslakt er gitt av (5.2). Kostnaden $M_{IBSLAKT}v$ er antatt lineær med antall fisk slaktet, men avhengig av hvilken vektklasse v fisken som nødslaktes befinner seg i.

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} M_{IBSLAKT}v (I_{Biv} - \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^1) \quad (5.2)$$

5.5.2 Overgang fra første til andre steg, fordeling i nye vektclasser og mulig tvangsslakt

Ved overgangen til andre steg, gjøres ny informasjon tilgjengelig om hvordan fisken har vokst og hvor stor andel av smolten som ble satt ut i løpet av førstesteget som har overlevd. Fisken fordeles i nye vektclasser. Vi får dermed en ny inngående balanse slik som i første steget, men til forskjell fra førstesteget, er den inngående balansen her en variabel. Den inngående biomassen er avhengig av scenario og er følgelig en annenstegs beslutningsvariabel. i_B^2 består av fisk som ble satt ut i førstesteget i tillegg til fisk som var der ved starten av planleggingsperioden og som ikke har blitt slaktet ut i løpet av de første periodene. Koeffisientene $K_{SMOLT}(\omega)$ og $K_{LAKS}(\omega)$ angir hvilken andel av fisken som havner i hvilken vektklasse v' med utgangspunkt i smolttype s eller vektklasse v for henholdsvis smolt og laks.

Dersom fisk i en gitt vektklasse, v , blir slakteklar (passerer vekt b) i løpet av førstesteget, vil følgelig $K_{LAKSvv'b}$ være lik 0 for alle vektklasser v' , og fisken blir ikke med til andresteget.

For smolten som settes ut i førstesteget, y^1 angir $O_{VERL}(\omega)$ andel fisk som overlever under ω .

$$\begin{aligned} i_{Biv'}^2(\omega) &= \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}^1} y_{ist}^1 O_{VERL}(\omega) K_{SMOLTsvt}(\omega) \\ &+ \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^1 K_{LAKSvv'b}(\omega) \quad i \in \mathcal{I}, v' \in \mathcal{V} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Når vi kommer over i andresteget bestemmes slaktevekt og nødslakt som i begynnelsen av førstesteget, se ligning (5.1).

$$\sum_{b \in \mathcal{B}} x_{iv'b}^2(\omega) \leq i_{Biv'}^2(\omega) \quad i \in \mathcal{I}, \omega \in \Omega \quad (5.4)$$

Nødslakt, $(i_{Bv}^2 - \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb})$, gis samme kostnad som i førstesteget.

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} M_{IBSLAKTv} (i_{Biv}^2(\omega) - \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^2(\omega)) \quad (5.5)$$

5.5.3 Biomasse og MTB-restriksjoner

For W_{SMOLT} har vi indeksene i , s , t og τ der i er anlegg, s er smolttype, t er utsettsperiode og τ er perioden du ønsker å finne ut hva vekten er. For fisk allerede i anleggene ved planleggingsperioden er starttidspunktet gitt, og vi trenger ingen periodeindeks. Dermed har W_{LAKS} kun indeksene i v og τ med samme betydning som for W_{SMOLT} , i tillegg har det betydning hvilken slaktevekt, b , vi velger. Vekten W_{LAKS} blir satt til 0 etter at fisken er slaktet, slik at fisk som er slaktet ikke opptar biomassekapasitet. Biomasseregnskapet for førstesteget er gitt av (5.6), hvor summen av vekten til nyutsatt smolt i et anlegg i for alle smolttyper s og utsettsperioder i førstesteget t legges til biomassen av laks som allerede var der.

$$\begin{aligned} b_{iOMi\tau}^1 &= \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}^1} W_{SMOLTist\tau}^1 O_{VERLF} y_{ist}^1 \\ &+ \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} W_{LAKSivb\tau}^1 x_{ivb}^1 \quad i \in \mathcal{I}, \tau \in \mathcal{T}^1 \end{aligned} \quad (5.6)$$

For å bevare relativt fullstendig recourse, og for å gi mulighet til å helt eller delvis relaksere enkelte restriksjoner, er det innført overskuddsvariable, m_{MTB} ,

med tilhørende straff i objektfunksjonen for MTB restriksjonen. $MTB_{i\tau}$ på anleggsbasis er tidsavhengig ettersom brakkleggingsperioder, planlagt vedlikehold, etc. kan gi forskjellig kapasitet på forskjellig tid.

$$b_{IOM_{i\tau}}^1 - m_{MTB_{i\tau}}^1 \leq MTB_{i\tau} \quad i \in \mathcal{I}, \tau \in \mathcal{T}^1 \quad (5.7)$$

Biomasseregnskapet blir likt for andresteget som for førstesteget bortsett fra at smolten y_{isbt}^2 nå har en slaktevektindeks b , som må summeres over.

$$\begin{aligned} b_{IOM_{i\tau}}^2(\omega) &= \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}^2} W_{SMOLT_{isbt\tau}}^2(\omega) O_{VERLFI_{isbt}}^2(\omega) \\ &+ \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} W_{LAKSi_{vb\tau}}^2(\omega) x_{ivb}^2(\omega) \quad i \in \mathcal{I}, \tau \in \mathcal{T}^2, \omega \in \Omega \end{aligned} \quad (5.8)$$

$MTB_{i\tau}$ er definert på samme måte i andresteget som i det første.

$$b_{IOM_{i\tau}}^2(\omega) - m_{MTB_{i\tau}}^2(\omega) \leq MTB_{i\tau} \quad i \in \mathcal{I}, \omega \in \Omega, \tau \in \mathcal{T}^2, \omega \in \Omega \quad (5.9)$$

For å regne ut biomassen på regionsbasis, summerer vi biomassen for alle anlegg i i samme region r . Ligning (5.10) setter MTB-begrensningene på regionsbasis for førstesteget, mens ligning (5.11) gjør tilsvarende for andresteget.

$$\sum_{i \in I_r} b_{IOM_{i\tau}}^1 - m_{MTBR_{r\tau}}^1 \leq MTB_{r\tau} \quad r \in \mathcal{R}, \tau \in \mathcal{T}^1 \quad (5.10)$$

$$\sum_{i \in I_r} b_{IOM_{i\tau}}^2(\omega) - m_{MTBR_{r\tau}}^2(\omega) \leq MTB_{r\tau} \quad r \in \mathcal{R}, \tau \in \mathcal{T}^2, \omega \in \Omega \quad (5.11)$$

Kostnadene i objektfunksjonen ved brudd på MTB-begrensningene for anlegg, M_{MTB} , og region, M_{MTBR} i førstesteget gis av (5.12) og (5.13). (5.14) og (5.15) gir tilsvarende kostnader i andresteget.

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}^1} M_{MTB} m_{MTB_{it}}^1 \quad (5.12)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}^1} M_{MTBR} m_{MTBR_{rt}}^1 \quad (5.13)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}^2} M_{MTB} m_{MTB_{it}}^2(\omega) \quad (5.14)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}^2} M_{MTBR} m_{MTBR_{rt}}^2(\omega) \quad (5.15)$$

5.5.4 Slakting

I førstestegsperiodene vil kun fisk som er i sjøen før planleggingsperiodens start bli slaktet ut. $z_{ib\tau}^1$ er antall fisk som slaktes ut ved slaktevekt b i anlegg i i periode τ . $A_{ivb\tau}$ er en binærkoeffisient som som er lik 1 dersom fisken fra x_{ivb}^1 når vekten b , og dermed slaktes i periode τ . For slaktevariablene summeres det over alle vektclasser v , siden flere vektclasser kan bli ferdig i samme periode τ .

$$z_{ib\tau}^1 = \sum_{v \in \mathcal{V}} A_{LAKSivb\tau}^1 x_{ivb}^1 \quad i \in \mathcal{I}, b \in \mathcal{B}, \tau \in \mathcal{T}^1 \quad (5.16)$$

Som i (A.12) vil fisken som er i sjøen ved starten av steg 2 (x_{ivb}^2) bli slaktet når målvekten b er nådd.

$$z_{ibt}^2(\omega) = \sum_{v \in \mathcal{V}} A_{LAKSivbt}^2(\omega) x_{ivb}^2(\omega) \quad i \in \mathcal{I}, b \in \mathcal{B}, \tau \in \mathcal{T}^2 \quad (5.17)$$

Vi velger å skille mellom fisk som blir satt ut i løpet av steget, y , og fisk som allerede befant seg i anleggene i første periode i steget, x . Tilsvarende skiller vi også utslaktet fisk, hvor s_{ibt}^2 betegner antall fisk som både blir satt ut og slaktet i steg 2, mens z_{ibt}^2 er fisken som blir slaktet i steg 2, men ble som allerede befant seg i sjøen ved første periode i steget. $A_{SMOLTisbt\tau}$ fungerer som i ligning (A.12) og (5.17), men har indeks for smolttype og utsettstidspunkt i stedet for vektclasser. \mathcal{T}_{UTSi}^2 angir tidsperioder i andre steget hvor det er mulig å sette ut smolt i anlegg i .

$$s_{ib\tau}^2(\omega) = \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}^2} A_{SMOLTisbt\tau} OVERLF y_{isbt}^2(\omega) \quad i \in \mathcal{I}, s \in \mathcal{S}, \tau \in \mathcal{T}^2 \quad (5.18)$$

Variablene z og s er direkte gitt av variablene x og y multiplisert med konstanter. z og s er dermed kun hjelpevariable for å synliggjøre slakting, og tidspunktene det foregår på.

5.5.5 Krav til slakting

Slakterier har begrenset kapasitet. Denne kapasiteten er gitt som *antall* fisk per tid. I tillegg kan det være krav om minimumsutslakting i en gitt periode eller over flere etterfølgende perioder. Grunner for et slikt minstekrav kan være kontraktsfestede salg, og et ønske om å holde slakteriet i kontinuerlig drift for å unngå permitteringer. Det er innført underskuddsvariable for krav til minimumsslakt $m_{MINSLAKT}$ og overskuddsvariable for krav til maksimumsslakt, $m_{MAXSLAKT}$ med tilhørende straffer i objektfunksjonen.

Vi bruker sett av perioder $\mathcal{L}_l, l \in \mathcal{L}_{INDEKS}$ for både maksimumsslakt, O_{MAXI} og minimumsslakt O_{MIN} . \mathcal{L}_{INDEKS} er her settet av mulige indekser, l for \mathcal{L}_l . Vi kan for eksempel ha settene $\mathcal{L}_a = \{1, 2, 3, 4\}$ og $\mathcal{L}_b = \{4, 5, 6\}$ der $a, b \in \mathcal{L}_{INDEKS}$. For slakteperioder der kun perioder fra førstesteget inngår, er restriksjonene gitt av (5.19) og (5.20).

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l} z_{ibt}^1 \\ + m_{MINSLAKTI} & \geq O_{MINI} \quad \{l \in \mathcal{L}_{INDEKS} | \mathcal{L}_l \subseteq \mathcal{T}^1\} \end{aligned} \quad (5.19)$$

Maksimum slakt over et sett av perioder bestemmes av slakterikapasitet. Også her benyttes et sett av perioder for å sikre løsbarehet, og ta hensyn til den operasjonelle friheten som finnes i utslaktningsprosessen.

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l} z_{ibt}^1 \\ - m_{MAXSLAKTI} & \leq O_{MAXI} \quad \{l \in \mathcal{L}_{INDEKS} | \mathcal{L}_l \subseteq \mathcal{T}^1\} \end{aligned} \quad (5.20)$$

Slakteperiodene, \mathcal{L}_l kan i prinsippet gå på tvers av stegene i modellen. For å unngå at slakteperioder hvor alle periodene ligger i førstesteget blir tatt med to ganger, er det nødvendig at $\mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2 \neq \emptyset$ i restriksjonene som angår andreteget, (5.21) og (5.22).

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^1} z_{ibt}^1 \\ + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2} z_{ibt}^2(\omega) \\ + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2} s_{ibt}^2(\omega) \\ + m_{MINSLAKTI}^2(\omega) & \geq O_{MINI} \quad \{l \in \mathcal{L}_{INDEKS} | \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2 \neq \emptyset\}, \omega \in \Omega \end{aligned} \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^1} z_{ibt}^1 \\ + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2} z_{ibt}^2(\omega) \\ + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2} s_{ibt}^2(\omega) \\ - m_{MAXSLAKTI}^2(\omega) & \leq O_{MAXI} \quad \{l \in \mathcal{L}_{INDEKS} | \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2 \neq \emptyset\}, \omega \in \Omega \end{aligned} \quad (5.22)$$

Brudd på slaktekrav modelleres som kostnader i objektfunksjonen som i (5.23), (5.24), (5.25) og (5.26).

$$\sum_{t \in \mathcal{T}^1} M_{MINSLAKT} m_{MINSLAKTl}^1 \quad (5.23)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}^1} M_{MAXSLAKT} m_{MAXSLAKTl}^1 \quad (5.24)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}^2} M_{MINSLAKT} m_{MINSLAKTl}^2(\omega) \quad (5.25)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}^2} M_{MAXSLAKT} m_{MAXSLAKTl}^2(\omega) \quad (5.26)$$

5.5.6 Tilgjengelig smolt for utsett

Det er begrenset hvor mye smolt ferskvannsanleggene kan levere. Vi har modellert dette ved enkle lineære beskrankninger for hver enkelt smolttype. I periode t er det tillatt å sette ut maksimalt G_{st} smolt av type s . Det er antatt at smoltleveransene er en felles ressurs for alle anleggene i , det vil si at alle ferskvannsanlegg kan levere til alle saltvannsanlegg. Siden produksjon av smolt tar mellom 8 måneder og halvannet år, vil smoltutsett som allerede er utført kunne legges begrensninger på hvor mye som kan settes ut nært frem i tid.

$$\sum_{i \in I} y_{ist}^1 \leq G_{st} \quad s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}^1 \quad (5.27)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{b \in \mathcal{B}} y_{isbt}^2(\omega) \leq G_{st} \quad s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}^2 \quad (5.28)$$

Tilsvarende som for utslaktingen kan vi også velge å ha flere perioder hvor summen av smolt utsatt i disse periodene ikke må krysse en gitt grense. En hel utsettsesong er et naturlig valg for en slik samling av perioder. Settene \mathcal{D}_d og \mathcal{D}_{INDEKS} fungerer på samme måte som \mathcal{L}_l og \mathcal{L}_{INDEKS} .

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{D}_d \cap \mathcal{T}^1} y_{ist}^1 + \sum_{i \in I} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{D}_d \cap \mathcal{T}^2} y_{isbt}^2(\omega) \leq G_{sd} \quad s \in \mathcal{S}, d \in \mathcal{D}_{INDEKS}, \omega \in \Omega \quad (5.29)$$

5.5.7 Spesielt tilfelle der utsettsperioden for et anlegg varer lenger enn planleggingsperioden

Det vil kunne skje at vi må ta beslutninger i dag om utsett for eksempel neste syv måneder mens neste beslutning må tas allerede om 6 måneder. Siden man

ikke kan endre et smoltutsett på under en måned, må enkelte beslutninger for andrestegsperioder læses allerede i førstesteget. Dette gjøres i ligning (5.30) ved å sette andrestegsvariabelen y^2 lik y^1 , og den eneste beslutningen som tas i andresteget blir beslutningen om slaktevekt b .

$$y_{ist}^1 = \sum_{b \in B} y_{isbt}^2 \quad i \in \mathcal{I}_{F\emptyset RST}, s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}_{UTS}^1 \quad (5.30)$$

5.5.8 End-of-horizon

Ved slutten av planleggingsperioden vil det i praksis alltid være noe fisk i anleggene som ikke er slaktet ut, siden vi planlegger for fortsatt produksjon. Siden fisken ikke slaktes, vil den normalt ikke gi noe bidrag til objektfunksjonen, og det vil dermed ikke være noe incentiv for å sette den ut i det hele tatt. Derfor vil den heller ikke bruke av fellesressursene slakterikapasitet og MTB, og anleggene med slakting mot slutten av planleggingshorisonten vil få uforholdsmessig slakke restriksjoner. For å unngå slike effekter, må vi innføre spesielle tiltak ved slutten av planleggingshorisonten.

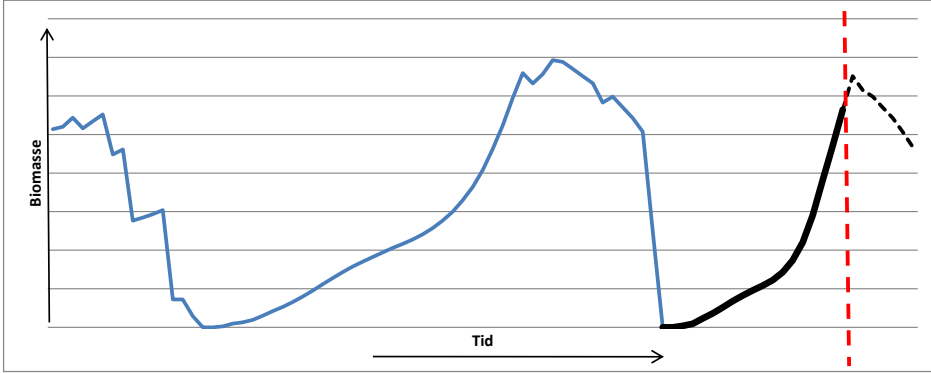
Det er forskjellige måter å løse problemet på. Et alternativ er å gi smolten som ikke er ferdig en sluttverdi i siste periode. Det vil imidlertid være vanskelig å vite hva denne sluttverdien skal være. Det er grunn til å tro at størrelse og sammensetning av det siste utsett vil være sterkt avhengig av sluttverdien. For eksempel vil en for høy verdi på liten fisk føre til store utsett av smolt i siste periode. En løsning med å bruke sluttverdi vil også kunne føre til utsett som ville brutt restriksjonene dersom restriksjonene strakk seg lenger enn den nåværende planleggingshorisonten.

Et annet alternativ er å se bort fra det faktiske smoltutsettet, og kun fokusere på resultatet av det; biomasse og utslakt. Spørsmålet da blir imidlertid hvilke verdier vi skal gi biomasse og utslakt. Siden produksjonen går i to-årsrykluser, er det mulig å låse biomassen og utslakt til verdiene det får i tidligere perioder. Ulempen med dette er imidlertid at dette vil virke negativt på de periodene som det blir låst til. For å unngå dette, kan man heller låse variablene til faste verdier. Det blir igjen et spørsmål om hvilke verdier som bør brukes, men det er enklere å finne gode alternativer. En mulighet er å bruke historiske verdier, da gjerne fra utsett som kan karakteriseres som svært gode som gir en ønsket sammensetning i biomasse.⁴

Vi har valgt det siste alternativet, altså å sette biomassen lik faste verdier for de anleggene hvor sene utsett av fisk ikke ville blitt slaktet ut innen slutten av planleggingshorisonten. Dette er illustrert i figur 5.1.

I ligning (5.31) settes biomassen i anlegg i lik en konstant biomasse U_B for alle de siste periodene t .

⁴Optimeringsmodellen søker å finne optimal sammensetning i utsett og dermed biomasse. Det bør derfor i teorien være mulig å iterere seg frem til gode verdier for sluttbiomasse.



Figur 5.1: Rød, stiplet linje markerer slutten på planleggingshorisonten. Siden fisk satt ut sent ikke ville blitt ferdig før planleggingsperiodens slutt, låses biomassen til den svarte linjen istedenfor å benytte optimeringsmodellen til å beslutte utsett her.

$$b_{IOMit}(\omega) = U_{Bit} \quad i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}_{SLUTT_i} \quad (5.31)$$

$$(5.32)$$

Tilsvarende gjøres også med slakt. Her summeres det over slaktevekt b , fordi U_{Sit} er et antall fisk, uavhengig av slaktevekt.

$$\sum_{b \in \mathcal{B}} s_{ibt}^2(\omega) = U_{Sit} \quad i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}_{SLUTT_i} \quad (5.33)$$

5.5.9 Ikke-negativitetskrav

For alle variable gjelder det ikke-negativitetskrav.

$$\begin{aligned} y_{isbt}^j, \quad x_{ivb}^j, \quad z_{ivbt}^j, \quad s_{ibt}^2, \quad b_{IOMit}^j, \quad i_{Biv}^2, \quad m_{MTBit}^j, \\ m_{MTBMr}^j, \quad m_{MAXSLAKT_i}^j, \quad m_{MINSLAKT_i}^j \geq 0 \end{aligned} \quad (5.34)$$

5.5.10 Objektfunksjon

Objektfunksjonen maksimerer totalprofitt for en oppdretter. Her regner vi profitten som summen av gevinsten i saltvann, i hovedsak salgspris minus fôr og arbeidskostnader, for det som slaktes, minus kostnadene for smolt og kostnader ved nødslakt eller restriksjonsbrudd. I tillegg må den deles opp i en deterministisk førstestegsdel og forventningsverdien til den usikre andrestegsdelen.

Verdien av laks som slaktes er avhengig av vekten den slaktes på. Verdien i objektfunksjonen C defineres som produktet av vekt ved slaktetidspunktet AW og

sjøvannsprøft/ kg P_{PROFIT} . Denne verdien antas å realiseres i periodent fisken slaktes, selv om før- og arbeidskostnader i praksis påløper underveis.

$$C_{LAKSivbt} = A_{LAKSivbt} W_{LAKSivbt} P_{PROFIT}_{bt} \quad (5.35)$$

$$C_{SMOLTisb\tau t} = A_{SMOLTisb\tau t} W_{LAKSisb\tau t} P_{PROFIT}_{bt} \quad (5.36)$$

I førstesteget er eneste positive ledd verdien av å slakte laks som allerede var i sjøen ved planleggingsperiodens start, x^1 , for alle anlegg i , vektclasser v , slaktevekter b og tidsperioder i førstesteget t . Dette bidraget er gitt av (5.37). Det er kun laks som var i sjøen ved stegets start som blir tatt med i betraktningen for førstesteget ettersom vi har antatt at ingen fisk blir både satt ut og slaktet i løpet av førstesteget.

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}^1} C_{LAKSivbt} x_{ivb}^1 \quad (5.37)$$

Kostnadene ved utsett av smolt i førstesteget er gitt av (5.38). Hvor smoltprisen F_{SMOLT} multipliseres med antall smolt satt ut y^1 for alle anlegg i , smolttyper s og utsettsperioder i førstesteget t . I tillegg har vi i førstesteget straffekostnader ved nødslakt, brudd på MTB-restriksjoner og brudd på minimum- og maksimumsrestriksjoner for slakt. Disse er allerede presentert i (5.2), (5.12), (5.13), (5.23) og (5.24).

$$\sum_{i \in \mathcal{I}_{FORST}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}} F_{SMOLTst} y_{ist}^1 \quad (5.38)$$

I andresteget av modellen er det to positive ledd. Det første er som i førstesteget verdi av å slakte laks som allerede var i sjøen ved andrestegets start:

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}^2} C_{LAKSivbt} x_{ivb}^2 \quad (5.39)$$

Det andre positive leddet er verdien av fisk som blir både satt ut og slaktet i løpet av andresteget. Naturligvis er det kun smolten som overlever og faktisk blir slaktet ut som får verdi. Fisken er her satt ut i periode τ og slaktet i periode t .

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}^2} \sum_{\tau \in \mathcal{T}_{UTSi}} C_{SMOLTisb\tau t} O_{VERLF} y_{isb\tau}^2(\omega) \quad (5.40)$$

De negative bidragene i andresteget består av kostnader for smolt, samt kostnader for nødslakt, brudd på MTB-restriksjoner og brudd på minimum- og maksimumsrestriksjoner for slakt. De tre siste er presentert tidligere i (5.5), (5.14), (5.15), (5.25) og (5.26). Smoltkostnadene er gitt av:

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}} F_{SMOLTst} y_{isbt}^2(\omega) \quad (5.41)$$

Tilsammen består objektfunksjonen da av (5.2), (5.5), (5.12)-(5.15), (5.23)- (5.26) og (5.37)-(5.41) og er gjengitt her:

$$\max z = \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}^1} C_{LAKSi vbt} x_{ivb}^1 \quad (5.42a)$$

$$- \sum_{i \in \mathcal{I}_{FORST}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}} F_{SMOLTst} y_{ist}^1 \quad (5.42b)$$

$$- \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} M_{IBSLAKT_v} (I_{Biv} - \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^1) \quad (5.42c)$$

$$- \sum_{t \in \mathcal{T}^1} M_{SLAKT_{max}} m_{MAXSLAKT_t}^1 \quad (5.42d)$$

$$- \sum_{t \in \mathcal{T}^1} M_{SLAKT_{min}} m_{MINSLAKT_t}^1 \quad (5.42e)$$

$$- \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}^1} M_{MTB} m_{MTBit}^1(\omega) \quad (5.42f)$$

$$- \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}^1} M_{MTBR} m_{MTBRrt}^1(\omega) \quad (5.42g)$$

$$+ \mathbf{E}_\xi[\max$$

$$+ \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}^2} C_{LAKSi vbt}(\omega) x_{ivb}^2(\omega) \quad (5.42h)$$

$$+ \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}^2} \sum_{\tau \in \mathcal{T}_{UTSi}} C_{SMOLTisb\tau t} OVERLFY_{isb\tau}^2(\omega) \quad (5.42i)$$

$$- \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} M_{IBSLAKT_v} (i_{Biv}^2(\omega) - \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^2(\omega)) \quad (5.42j)$$

$$- \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}} F_{SMOLTst} y_{isbt}^2(\omega) \quad (5.42k)$$

$$- \sum_{t \in \mathcal{T}^2} M_{MAXSLAKT_t} m_{MAXSLAKT_t}^2(\omega) \quad (5.42l)$$

$$- \sum_{t \in \mathcal{T}^2} M_{MINSLAKT_t} m_{MINSLAKT_t}^2(\omega) \quad (5.42m)$$

$$- \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}^2} M_{MTB} m_{MTBit}^2(\omega) \quad (5.42n)$$

$$- \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}^2} M_{MTBR} m_{MTBRrt}^2(\omega)] \quad (5.42o)$$

5.6 Deterministisk ekvivalent

Med et endelig antall scenarier, kan vi lage en deterministisk ekvivalent for det stokastiske problemet. Settet Ω i recourse modellen representerer alle mulige utfall. Siden overlevelsesgrad og vekst typisk er kontinuerlige størrelser, må vi estimere Ω med et sett av diskrete scenarier. Vi kaller dette settet Ω_F . For å lage den deterministiske ekvivalenten bytter vi ut Ω med Ω_F i alle restriksjoner. I målfunksjonen erstatter vi forventningsverdien, $\mathbf{E}_\xi[\bullet]$ med den diskrete sannsynligheten for hvert utfall, $\sum_{\omega \in \Omega_F} \Pr(\bullet)$. Den deterministiske ekvivalenten finnes i vedlegg A.

5.7 Kommentarer til modellen

Den deterministiske ekvivalenten til modellen blir en helt lineær modell som dermed er løsbart med simplex-baserte algoritmer.

Det kreves store tabeller av pregenererte vektprediksjoner W , slaktetidspunkter A og koeffisienter K_{LAKS} og K_{SMOLT} . Hvis modellen skal kjøres på samme tidspunkter hvert år kan imidlertid disse tabellene benyttes på nytt fra år til år.

Beslutningen om slaktevekt gjøres her ved å generere flere tabeller med det samme datagrunnlaget bortsett fra utslaktingstidspunktet for hver mulige slaktevekt. Denne beslutningen kunne også vært gjort med en heltallsbeslutning for hvilken slaktevekt som velges. Dette hadde redusert datamengden som måtte leses inn i modellen, men ville gjort modellen til et kombinert heltalls- og lineært problem (MIP).

Med den formuleringen vi har valgt, øker kompleksiteten kraftig med økende antall slaktevekter.

Dersom flere anlegg er logisk like(lik utsettsperiode, vekst og region), vil fordelingen av biomasse mellom dem være likegyldig, så lenge vi holder oss innenfor anleggs-MTB. Dette taler til fordel for å aggregere anlegg med lik utsettsperiode.

6 Implementering

Modellen presentert i forrige kapittel har blitt implementert for Marine Harvest Region Midt. Reelle betingelser og anleggsdata blir brukt som datagrunnlag. Vi presenterer først hvilke forenklinger som er gjort i forhold til modellen og hvilke data som er brukt i restriksjonene. Videre beskriver vi planleggingsperioden, hvordan veksten er modellert og hvordan scenariene genereres. Sist i kapittelet presenterer vi de forskjellige probleminstansene vi har kjørt modellen på.

Det er enkelte forskjeller i implementeringen avhengig om det første utsettet det planlegges for er et høstutsett eller vårutsett. Vi har tatt utgangspunkt i et høstutsett, men har også implementert et vårmodell og bruker denne i én probleminstans.

6.1 Forenklinger

Enkelte forenklinger og antagelser er gjort for å redusere problemstørrelsen.

- Innenfor en region aggregeres alle anlegg med samme utsettssesong.
- I første halvdel av brakkleggingen for et anlegg settes MTB lik halvparten av vanlig MTB. Resten av brakkleggingen tillater vi ingen biomasse i anleggene. Begrunnelsen er at anlegg med lik utsettssesong kan ha 1-2 måneder forskjøvet brakklegging.
- Vekst er antatt uavhengig av anleggets lokalisering.
- Vekst og dødelighet er antatt uavhengig av hverandre.
- Det blir kun tatt med dødelighet for fisk som settes ut. For fisk som er i anleggene ved starten av et steg, settes overlevelsesgraden til 1.
- Laksen grupperes i 49 vektclasser fra 70 g til 6800 g med 10% økning i hvert steg. Disse vektclassene representerer vekten ved starten på et steg, og en fisk bytter kun vektclassen i overgangen mellom fra steg 1 til steg 2.
- Det benyttes 2 mulige slaktevekter: 4,0 kg og 6,0 kg.
- Det benyttes 4 mulige smoltvekter: 70 g, 110 g, 150 g og 250 g

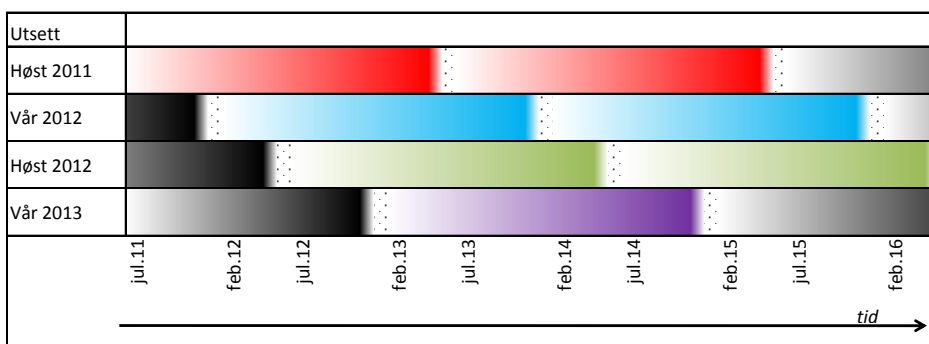
6.2 Datagrunnlag

6.2.1 Planleggingsperiode

De første to årene av planleggingsperioden modelleres med toukers oppløsning. Første periode starter 16. mai, 8 uker før første tillatte utsettsperiode som starter 11. juli. Det er tilsammen 11 mulige utsettsperioder, før andrestegsbeslutningen tas 28. november. Totalt gir dette 15 perioder i førstesteg. For å sikre gode

resultater for alle de 4 aggregerte anleggene vil andrestegsbeslutningen planlegge utsett helt fram til alle fire anleggene har vært gjennom minimum ett utsett og en utslaktning av dette. Andrestegsbeslutningen bestemmer dermed smoltutsettene for de neste 3 årene, noe som gjør at den siste laksen som besluttet utsatt blir ferdig ca 4,5 år etter andrestegsbeslutningen tas. Totalt strekker planleggingshorisonten seg over 5 år, fordelt på 93 tidsperioder. Figur 6.1 viser en oversikt over planleggingshorisonten, og syklus for anlegg med utsett henholdsvis høst oddetallsår, vår partallsår, høst partallsår og vår oddetallsår.

Alle utsett som ville skjedd i løpet av de siste 1,5 årene av planleggingsperioden erstattes av en konstant verdi for biomasse, slik at regions-MTB-begrensningene fortsatt blir reelle. Disse verdiene for biomasse er generert ved å kjøre modellen med kopiering av de to siste årene som endebetingelse (se diskusjon i kapittel 5.5.8). Biomassen vi da ender opp med i en slik kjøring er brukt som input.



Figur 6.1: Gantt-diagram med oversikt over brakklegging og produksjon i planleggingshorisonten. Brakkleggingsperiodene er markert med sorte prikker. Sort/grå markerer perioder hvor modellen ikke planlegger, men det heller tas utgangspunkt i inngående og utgående verdier for biomasse. Planleggingshorisonten er delt opp i 93 diskrete tidsperioder.

6.2.2 Anleggene

Vi benytter de 39 anleggene fra tabell 3.1. For å plassere disse anleggene i riktig utsettssesong er “Forskrift om sone for å forebygge og bekjempe lus i akvakulturanlegg i Leka, Nærøy, Vikna, Fosnes, Namsos, Namdalseid, Flatanger kommuner i Nord-Trøndelag og Osen kommune i Sør-Trøndelag”(2010) benyttet for Nord-Trøndelag samt “Hørings svar: Forskrift om sone for å forebygge og bekjempe lus i akvakulturanlegg i Nord- og Sør-Trøndelag”(2010) for resten av regionen. Disse forskriftene er under utarbeidelse, og dermed vil enkelte avvik fra vår soneplassering kunne forekomme.

MTB for alle anlegg er hentet fra Fiskeridirektoratets register over konsesjoner og anlegg for havbruk. Siden alle anlegg med samme brakkleggingsperiode aggregeres

Tabell 6.1: MTB-oversikt aggregerte anlegg. Tidspunktene representerer første startutsett i vår implementering

<i>Anlegg</i>	<i>MTB_i</i>
Trøndelag høst 2011	21060 tonn
Trøndelag vår 2012	46540 tonn
Trøndelag høst 2012	29120 tonn
Trøndelag vår 2013	24960 tonn
Møre høst 2011	10920 tonn
Møre vår 2012	6240 tonn
Møre høst 2012	10920 tonn
Møre vår 2013	0 tonn

Tabell 6.2: Regions-MTB for Marine Harvest i Møre og Trøndelag

<i>Region</i>	<i>MTB_r</i>
Trøndelag	32760 tonn
Møre	7800 tonn

i modellen, vil vi ha kun 4 anlegg i hver av de to regionene, Møre og Trøndelag. Biomassegrensene for disse aggregerte anleggene er gitt i tabell 6.1.

Marine Harvest har 49 konsesjoner i Region Midt, hvorav 10 i Møre og 39 i Trøndelag. Summen av konsesjonsvolumene er gjengitt i tabell 6.2.

6.2.3 Biomasse ved planleggingsperiodens start

Den inngående biomassen som benyttes som initialbetingelse for fisk i sjøen, er basert på tall fra Marine Harvest fra mai 2009. Dette er tabeller med antall og snittvekt på fisk i forskjellige anlegg. For at ikke all fisken i et anlegg skulle måtte slaktes ut på samme tidspunkt, og fordi det faktisk er en spredning på fiskens vekt, ble fisken fordelt ut i tre vektklasser i nærheten av snittvekten. Anleggene som hadde samme brakkleggingsperiode ble så aggregert, slik at det ble de samme 8 anleggene som vi opererer med i modellen. Verdiene som er brukt i modellen, og de originale dataene, finnes i elektroniske vedlegg.

6.2.4 Slakterestriksjoner

Begrensningene på utslakting er gitt av slaktekapasiteten til slakteriet på Ulvan. Det kan daglig slaktes opptil 70 000 fisk dersom det kjøres doble skift. Vi har valgt å se på fireukersperioder for restriksjoner av utslakt. I løpet av fire uker blir dermed maksimalt utslakt 1 960 000 fisk. Merk, for de to første årene er tidsopløsningen to uker. Restriksjonen de to første årene blir dermed at det i løpet av to etterfølgende perioder ikke tillatt å slakte ut mer enn 1 960 000

Tabell 6.3: Maksimalt smoltutsett, G_{sd} , høst- og vårutsett for smolt av forskjellige størrelser

	70g	110g	150g	250g
Høstutsett	15000	3500	1500	1000
Vårutsett	15000	15000	3000	2000

fisk. Denne ekstra fleksibiliteten motiveres med bufferen slaktemerden utgjør, og operasjonell fleksibilitet vår modell ikke ellers tar hensyn til. Minimumsslakt er implementert i modellen, men nedre grense for minimumsslakt er satt lik 0 i alle perioder.

Vi har valgt å bruke to slaktevekter, 6 kg og 4 kg. 6 kg er den målsatte slaktevekten til Marine Harvest Region Midt. Dette er vekten de ønsker å slakte mest mulig av fisken på, og er en strategisk beslutning⁵. Slaktevekten på 4 kg er tatt med for å øke fleksibiliteten i problemet, og gi mulighet til å slakte tidlig i scenarier med lav dødelighet eller avvikende vekst. I tillegg vil det være mulig å slakte denne fisken på tidspunkter hvor det er ikke er mulig å få ferdig fisk på 6 kg. I målfunksjonen gis fisk som slaktes på målvekten en profitt i saltvannsleddet lik 15 kr/kg, mens fisk som slaktes på 4 kg gis profitt lik 10 kr/kg.

6.2.5 Smoltbegrensninger

Begrensningene på smoltutsett er satt forholdsvis høyt. Vi har ikke hatt tilgang til godt materiale for hva ferskvannsanleggne har mulighet til å levere. Etter signaler fra Marine Harvest er muligheten for stor smolt satt noe lavere i høstutsettene enn for vårutsettene. Maksimalt utsett for hver smolttype over en utsettsesong er gjengitt i tabell 6.3. Maksimalt utsett per periode finnes i vedlegg B.

Produksjonskosnad for smolt varierer med smolttype, størrelse, produksjonsmetode, etc. Vi har benyttet en smoltkostnad som er lineært avhengig av smoltvekten.

6.2.6 Profitt og kostnad i objektfunksjonen

I objektfunksjonen benyttes en konstant saltvannsprofitt, C_{LAKS} og C_{SMOLT} , på 15 kr/kg for fisk slaktet på målvekt. For fisk slaktet på 4 kg benyttes 10 kr/kg. Smoltkostnaden F i objektfunksjonen er lineært avhengig av smoltvekten, og er på 7,20 kr/100g. Kostnadene ved å bryte en restriksjon, $M_{MINSLAKT}$, $M_{MAXSLAKT}$, M_{MTB} og M_{MTBR} er satt så høyt at å bryte de tilhørende restriksjonene ikke blir et reelt alternativ. Nødslakt, som kun gjøres i stegover-

⁵Marine Harvest er en stor aktør, og beslutningene som tas kan ha stor påvirkningene på markedspris. I modellen antar vi faste priser, men straffer profitten for fisk som slaktes på 4 kg for at det å gi incentiv for faktisk å slakte på målvekt.

ganger straffes avhengig av vektklasse. Straffen $M_{IBSLAKT}$ er null for fisk over 2,5 kg.

6.3 Scenarieregnering

Problemet modelleres med usikker vekst og dødelighet. For vekst er ni år med historiske temperaturobservasjoner benyttet til å generere ni ulike vekstscenarier. De ni temperaturseriene som er benyttet, er gjennomsnittlig sjøvannstemperatur for Marine Harvests anlegg i Sør-Trøndelag i årene 1998-2007.

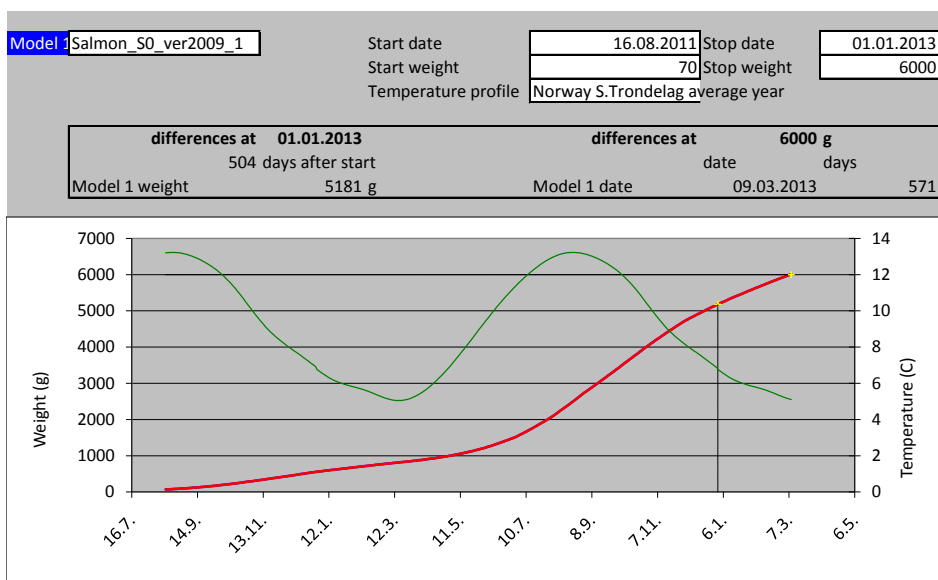
For å beskrive usikkerheten i dødelighet er det valgt 5 diskrete størrelser for prosentvis svinn. Dødelighetsscenariene som benyttes er 5%, 10%, 15%, 20% og 25%. Disse har blitt gitt lik sannsynlighetsvektning. Dette er basert på tall fra Marine Harvest Region Midt, og deres svinn de siste årene. Som nevnt i modellformuleringen antas det at alt svinn foregår i det smolten settes i havet, og informasjonen blir tilgjengelig i overgangen mellom steg 1 og steg 2.

Med 9 utfall for vekst og 5 for dødelighet blir det totalt $9 * 5 = 45$ forskjellige scenarier. Det er antatt at vekst/temperatur og dødelighet er uavhengig av hverandre. Alle scenarier er gitt lik sannsynlighet, $1/45$.

6.4 Vekstmodellering

For å modellere veksten til laksen benyttes en vekstmodell som brukes i forkant av kjøringen i xpress. Modellen baserer seg på empiriske data for vekst, og forsøker å representere gjennomsnittlig vekst i en populasjon med like vekstvilkår. Modellen gir ut daglig tilvekst gitt parametrene vekt, temperatur, årstid og smolttype. De to smolttypene som finnes i modellen er 0-åring og 1-åring, eller høstfisk og vårfisk. Disse har et noe forskjellig vekstforløp. Høstmodellen er brukt for all fisk som settes ut i høstanleggene, mens vårmodellen er brukt for all fisk som er satt ut i vårleggene. Vekstmodellen er utviklet av Marine Harvest i samarbeid med fôrprodusenten Skretting. Leif Tvenning i Marine Harvest har nå hovedansvaret for modellen. Modellen er under videreutvikling, og enkelte svakheter er funnet i versjon 2009, som er versjonen av modellen vi har benyttet. Modellen har vist seg å overpredikere veksten til laksen ved sjøtemperaturer høyere enn ca. 16 °C. Versjon 2011 skal justere for dette, men den versjonen var ikke klar da vi mottok modellen fra Marine Harvest.

For å finne vektkonstantene i modellen, W_{SMOLT} og W_{LAKS} har vi implementert denne vekstmodellen i Matlab og simulert vekstforløp. Koden som er brukt finnes på vedlagt CD-ROM. Vi har simulert vekstforløpet fra første periode i hvert steg og til slutten av steget. Dette er gjort for alle 49 vektklasser. I tillegg er det gjort simuleringer for alle smolttyper. For smolten er simuleringene gjort med forskjellige starttidspunkt; alle mulige utsettstidspunkt for det aktuelle anlegget. I tabell 6.4 vises et utdrag fra simulering av vekst for 250 grams høstsmolt. Tabeller



Figur 6.2: Skjerm bilde fra vekstmodellen i excel. Her ser vi at med modellen vil en smolt på 70 g utsatt 16.8.2011 være 6 kg 9.03.2013 med gjennomsnittstemperaturer fra Sør-Trøndelag. Vi ser også at 1.1.2013 vil fisken være 5181 g

slik som 6.4 er benyttet som input i optimeringsmodellen. Siste tall i hver kolonne angir vekten fisken slaktes på. Noen av disse tallene er lavere enn 6000 g. Årsaken til dette er at vi har valgt å la fisken slaktes i første toukersperiode der vekten passerer 6 kg. Etter periode 56 er det imidlertid implementert fireukersperioder. Dersom vekten har passert 6 kg i løpet av første halvdel av fireukersperioden, velger vi å la den slaktes i den perioden. Dermed er vekten ved starten av perioden lavere enn 6 kg.

Vi har også behov for å holde styr på antall fisk som slaktes i en bestemt periode. For å gjøre dette har benyttes slaktekoeffisienter A_{SMOLT} som angir hvilken andel av fisken fra et utsett som blir slaktet når. Vi har valgt å la all fisken fra et utsett slaktes ut på samme tid. Dermed blir koeffisienten A_{SMOLT} lik 1 i den perioden hvor fisken fra utsetten. Dette er illustrert i tabell 6.5. Det er en tydelig sammenheng mellom vekt konstantene W_{SMOLT} og slaktekoeffisientene A_{SMOLT} .

Etter slaktevekten er nådd settes vekten i tabellene til 0, slik at denne fisken ikke lenger blir tatt med i biomasseregnskapet. I disse tabellene står vekten i alle framtidige tidsperioder fram til målvekten nås for alle vekt klasser, eller smoltutsett. For tabellene knyttet til førstestegs beslutningene genereres også koeffisientmatriser som bestemmer hvilke vekt klasser fisken går over i etter andrestegs beslutningen er tatt. For fisk som slaktes er det generert tilhørende binærvariable, A , som er 1 i den perioden fisken slaktes, og 0 ellers.

Tabell 6.4: Utdrag av veksttabell for 250 g høstsmolt satt ut fra periode 32 til 42. Smolt satt ut i periode 40 vil i periode 62 veie 4191 g.

$$(W_{SMOLT}(\text{aktuelle anlegg})(250g)(6kg)(40)(62) = 4191g)$$

Periode	Utsettsperiode						
	32	33	34	40	41	42	
32	250	0	0	0	0	0	
33	314	250	0	0	0	0	
34	392	316	250	0	0	0	
35	483	396	318	0	0	0	
36	587	487	397	...	0	0	
37	702	591	488	0	0	0	
38	860	704	590	0	0	0	
39	1030	857	700	0	0	0	
40	1206	1018	842	250	0	0	
41	1377	1175	984	305	250	0	
42	1541	1328	1124	362	300	250	
...	
60	5543	5138	4740	2955	2754	2576	
61	6395	5954	5520	3575	3356	3160	
62	0	0	6302	4191	3953	3740	
63	0	0	0	4725	4470	4242	
64	0	0	0	...	5145	4877	4637
65	0	0	0	5510	5229	4979	
66	0	0	0	5848	5555	5295	
67	0	0	0	0	5866	5596	
68	0	0	0	0	0	5966	
69	0	0	0	0	0	0	

Når modellen er kjørt med flere mulige slaktevekter er det generert en kopi av den opprinnelige tabellen, hvor tidspunktet for slakt kommer i en annen periode, og dermed gir forskjellig antall nuller nederst i tabellen.

For å unngå tabeller som har mange nuller før første utsett, og etter siste utslaktning, er det innført tidssett som gir gyldighetsområdet for de forskjellige tabellene. For hver utsettssesong er det dermed definert et sett av perioder som er mulige å sette ut smolt i, og et sett av perioder hvor vi er interresert i veksten. For utsett i førstesteget er det periodene ut steget som er intereesant, mens det for utsett i andresteget må se på alle periodene frem til neste brakklegging.

Usikkerheten i veksten kommer fram gjennom usikre overgangskoeffisienter K . Disse er generert for alle scenarier, og fordeler laksen i nye vektklasser ved overgangen fra steg 1 til steg 2. Disse tabellene er generert sammen med førstestegs veksttabellene, og gir laksen nye vektklasser for hvert temperaturscenario.

Til sammen ble det generert 7 veksttabeller som ble benyttet som input i optimeringsmodellen: Inngående biomasse høstfisk, inngående biomasse vårfisk og

Tabell 6.5: Utdrag av tabell med slaktekoeffisienter for 250 g høstsmolt. All smolt satt ut i periode 40 vil her bli slaktet i periode 66.

$$(A_{SMOLT}(\text{aktuelle anlegg})(250 \text{ g})(6 \text{ kg})(40)(66) = 1)$$

Periode	Utsettsperiode						
	32	33	34	40	41	42	
32	0	0	0	...	0	0	0
...			
60	0	0	0		0	0	0
61	1	1	0		0	0	0
62	0	0	1		0	0	0
63	0	0	0		0	0	0
64	0	0	0	...	0	0	0
65	0	0	0		0	0	0
66	0	0	0		1	0	0
67	0	0	0		0	1	0
68	0	0	0		0	0	1
69	0	0	0		0	0	0

smoltutsett høstfisk er tabellene som dekker det første steget. For andrestegsbeslutningene ble tre tilsvarende tabeller generert, i tillegg ble en tabell for smoltutsett vårfisk generert.

6.5 Probleminstanser

For å undersøke hvilke faktorer som har stor innvirkning på resultatene fra modellen er modellen kjørt for et sett av forskjellige probleminstanser.

6.5.1 Originalproblem (OP)

I originalproblemet er høstutsett 2011 førstestegsbeslutning. Det er her hovedfokuset vil ligge i gjennomgangen av resultatene.

6.5.2 Alternativ målvekt (AM)

Den målsatte slaktevekten i Region Midt er under vurdering. Vi ønsker å se hvorvidt en reduksjon av målvekten til 5,5 kg kan øke profitten. I og med at fisken slaktes ut på et noe tidligere tidspunkt ved en lavere vekt, vil biomasserestriksjonene kunne bli litt mindre strenge. Smoltutsett og slakting begrenses imidlertid av antallet fisk, noe som vil kunne bli strengere med 5,5 kg slaktevekt. Vi har her antatt 15 kr/kg profitt i saltvannsleddet for fisk som slaktes ut på målvekten og 12 kr/kg for utslakting på 4 kg, likt som i OP.

6.5.3 Usikker vekst (UV) og Usikker dødelighet (UD)

Vi undersøker de to usikre parametrene vekst og dødelighet hver for seg. Målet med en slik sammenligning er å belyse hvor hoveddelen av usikkerheten i problemet ligger.

I UV er det 9 scenarier, hvor hvert scenario representerer et hvilken vekst et gitt temperatursforløp i førstesteget faktisk ville gitt. Det er her regnet med 85 % overlevelse i hele planleggingsperioden. I UD er det 5 scenarier som representerer prosentvis overlevelse for smoltutsettene i førstesteget. For vekstforløpet er det gjennomsnittlige temperaturscenariet brukt for å simulere veksten.

6.5.4 Lav profitt for lav slaktevekt (LPLV) og høy profitt for lav slaktevekt (HPLV)

I disse to probleminstansene undersøker vi hvordan beslutningene avhenger av hvilken profitt vi gir for fisk som blir slaktet ut under målvekten. I LPLV har vi satt profitten til 0 for fisk som slaktes på 4 kg, mens vi i HPLV har satt profitten til 15 kr/kg, altså samme profitt som for fisk som slaktes ut på 6 kg.

6.5.5 Deterministisk problem

I det deterministiske problemet er usikkerheten i både dødelighet og vekst erstattet med forventningsverdien. Det deterministiske problemet for originalproblemet (OP-DET) er tatt med som egen probleminstans, mens det for de andre probleminstansene kun er kjørt for å ha mulighet til å beregne verdien av den stokastisk løsningen (VSS).

6.5.6 Vårutsett

I tillegg til det opprinnelige problemet med høstutsett 2011 som førstestegsbeslutning, er modellen kjørt med vårutsett 2012 som førstestegsbeslutning. Inputen til vårfiskkjøringen er tatt fra høstfiskkjøringen, hvor vi har antatt et realisert scenario for vekst og dødelighet.

Siden vårutsettene er definert til å kunne vare fra februar til juni, og stegovergangen er satt 16. mai vil noe av smoltutsettet som bestemmes av førstestegsbeslutningen settes ut etter at ny informasjon er gjort tilgjengelig. Hele vårutsettet må likevel planlegges med den informasjonen som er tilgjengelig i første periode. Siden utsettet skjer etter at informasjon om dødelighet er tilgjengelig, har vi valgt å heller bruke gjennomsnittlig dødelighet på 85 % for denne fisken.

6.6 Løsningstid, variable og restriksjoner i Xpress-MP

Problemene over er implementert i Xpress-IVE. Maskin- og programvarespesifikasjoner er angitt i tabell 6.6. Antall variable, restriksjoner og simpleksiterasjoner samt løsningstid for problemene finnes i tabell 6.7.

Tabell 6.6: Maskin- og programvarespesifikasjoner

Xpress Mosel versjon	3.2.0
Xpress Optimizer versjon	21.01.00
Maskin	Acer Aspire 5820T
Operativsystem	Microsoft Windows 7 Home Premium
Prosesor	Intel ®Core™2 Duo e6700
Minne (RAM)	4GB

Tabell 6.7: Spesifikasjoner for probleminstansene.

a1) Antall variable før presolve. a2) Antall variable etter presolve. b1)Antall restriksjoner før presolve. b2)Antall restriksjoner etter presolve. c)Løsningstid. d)Antall simpleksiterasjoner.

	OP	AM	UV	UD	LPLV	HPLV	OP-DET
a1)	260702	260882	53270	30222	260702	260702	7174
a2)	81549	80039	16529	9304	81099	81549	2080
b1)	212521	212521	43285	24481	212521	212521	5677
b2)	58400	56935	11852	6680	58348	58400	1508
c)	108.4	94.2	4.1	1.3	45.7	275.5	0.1
d)	28509	45939	9322	5023	37287	70861	1051

7 Resultater

I dette kapittelet blir de viktigste resultatene fra implementeringen presentert og drøftet. Flere resultater finnes i digitale vedlegg. Resultatene vil dreie seg om de 8 probleminstansene; Originalproblemet(OP), Alternativ målvekt (AM), usikker vekst (UV), usikker dødelighet (UD), lav profitt for lav vekt (LPLV), høy profitt for lav vekt (HPLV), deterministisk versjon av originalproblemet (OP-DET) og instans der vårutsett er førstestegsbeslutning (VÅR). I tabell 7.1 presenteres nøkkelresultater fra de forskjellige probleminstansene som er kjørt.

Tabell 7.1: Sammendrag av nøkkeltall fra modellkjøringene for de forskjellige probleminstansene:

- a) er objektivverdien i millioner kroner.
- b) er antall tusen smolt satt ut i første steg av modellen.
- c) er andel av fisken som slaktes på målvekt.
- d) er gjennomsnittlig differanse mellom regions-MTB og faktisk biomasse.
- e) er årlig antall tonn slaktet per konsesjon. Her er 52 konsesjoner på 780 tonn benyttet.
- f) er forventet verdi i millioner kroner av perfekt informasjon (EVPI).
- g) er verdien, i millioner kroner, av den stokastiske løsningen (VSS).

	OP	AM	UV	UD	LPLV	HPLV	DET
a)	4543.09	4719.12	4550.95	4621.6	4281.94	5074.86	4631.36
b)	8814.9	9674.1	8698.1	8650.4	7393.1	10972.2	8432.4
c)	81.2 %	92.6 %	82.0 %	80.0 %	93.6 %	34.8 %	81.3 %
d)	8.5 %	9.6 %	8.5 %	8.2 %	12.5 %	7.6 %	8.3 %
e)	1348.5	1487.5	1346.7	1359.4	1264.2	1422.2	1357.0
f)	23.82	21.75	16.36	9.22	42.04	20.98	-
g)	13.51	11.47	21.19	20.00	19.08	32.02	-

7.1 Originalproblemet (OP)

Smoltutsettene som besluttes i første steg av modellen kan sees på som bestillinger til ferskvannsdelen av Marine Harvest. I tabell 7.2 viser vi utsettene summert for Møre og Trøndelag. For 250 g-smolten, ser vi at restriksjonene for maksimalt tillatt utsett i løpet av sesongen bindende. Tidlige utsett av stor smolt gir tidlig slakteklar laks, og dermed mulighet til å slakte over en lengre periode. Det settes ut lite smolt sent på høsten, noe som er i tråd med dagens praksis i Marine Harvest. Det er en stor overvekt av små smolt som settes ut. Disse er billigere å produsere, og vil så lenge de blir slakteklare før brakklegging være gunstige. Beslutningene om hvilke smoltvekter som benyttes er sensitive for endringer i smoltkostnad.

I tabell 7.3 ser vi smoltutsett i andresteget vektet over alle scenariene. Vi ser at over halvparten av smoltutsettene består av den minste smolttypen for alle

Tabell 7.2: Antall tusen smolt utsatt per periode. Første steget, høst 2011. (OP)

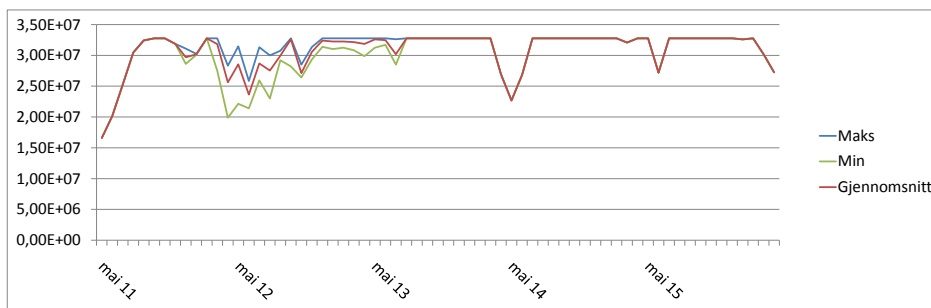
Ukenummer	Smoltutsett første steg			
	70 gram	110 gram	150 gram	250 gram
28-29	643.4	389.1	755.6	220.3
30-31	647.7	370.4	0.0	779.7
32-33	754.9	0.0	0.0	0.0
34-35	963.3	0.0	0.0	0.0
36-37	591.3	0.0	0.0	0.0
38-39	610.3	0.0	0.0	0.0
40-41	1000.0	0.0	0.0	0.0
42-43	1000.0	0.0	0.0	0.0
44-45	0.0	88.8	0.0	0.0
46-47	0.0	0.0	0.0	0.0
48-49	0.0	0.0	0.0	0.0
Sum	6210.9	848.4	755.6	1000.0

Tabell 7.3: Antall tusen smolt utsatt i andre steget. (OP)

	70 gram	110 gram	150 gram	250 gram	Totalt
Vår 2012	4873.3	1976.6	1000.0	740.0	8589.9
Høst 2012	3235.9	2449.5	305.9	0.0	5991.3
Vår 2013	4005.4	2457.1	1000.0	483.7	7946.2
Høst 2013	4287.6	1012.9	1500.0	282.8	7083.3
Vår 2014	4735.6	1926.9	1801.0	0.0	8463.4
Høst 2014	4864.4	1238.0	1500.0	0.0	7602.4

Tabell 7.4: Antall tusen fisk slaktet, sortert per utsettstidspunkt og slaktevekt. (OP)

Utsettsgenerasjon	4 kg	6kg	Sum
Høst 2011	1127.7	6365.0	7492.7
Vår 2012	1073.7	6227.7	7301.4
Høst 2012	0.0	5092.6	5092.6
Vår 2013	1783.8	4970.5	6754.3
Høst 2013	381.5	5639.3	6020.8
Vår 2014	1960.0	5233.9	7193.9
Høst 2014	0.0	6462.0	6462.0



Figur 7.1: Gjennomsnittlig, minimum og maksimum biomasse i kg. (OP)

utsettssesongene. Vårutsettene er noe større enn høstutsettene. De eneste smolttypene som når utsettsrestriksjonene er 150 g i enkelte høstutsett. Høst 2012 skiller seg noe ut, med et lite utsett, spesielt av store smolttyper.

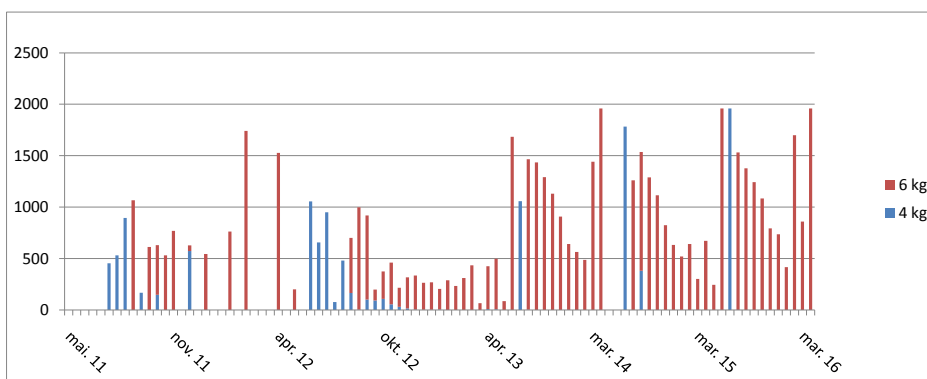
I tabell 7.4 er antall fisk per slaktevekt for alle utsettssesongene presentert. Vi ser at i førstevekt slaktes en del på 4 kg, men at det ellers for høstutsettene stort sett slaktes på målvekt. For vårutsettene slaktes det mellom en og to millioner laks på 4 kg alle årene.

Figur 7.1 viser biomasseutviklingen for trøndelagsanleggene. *Maks* og *min* representerer det scenariet som til en hver tid fører til henholdsvis mest eller minst biomasse. *Gjennomsnitt* viser vektet snitt over alle de 45 scenariene. Den gjennomsnittlige differansen mellom faktisk biomasse og regions-MTB over hele planleggingsperioden summert over begge regioner er 8,5 %.

Utslaktingen i OP kan foregå på 4 kg eller 6 kg, men med redusert profitt i saltvannsleddet for fisken som slaktes på 4 kg. Tabell 7.4 viser fordelingen av slaktet fisk i de forskjellige utsettssesongene. Mellom 16,8 % og 20,9 % blir slaktet på 4 kg i de forskjellige scenariene. Gjennomsnittet er på 18,8 %.

Vi ser store variasjoner i utslakt gjennom året. Figur 7.2 presenterer gjennomsnittlig antall slaktet laks (i tusen) per periode og vi ser blant annet at mer enn dobbelt så mye laks slaktes i en sommermåned enn i en vintermåned. I flere perioder slaktes ingenting. Et minstekrav for mengde slaktet i hver periode er ikke innført, da det fort kunne ført til manglende lønnsbarhet. Store deler av variasjonen i utslaktingen kan reduseres gjennom fleksibilitet i utslaktingsleddet, og slaktemerden. I optimeringsmodellen vil flere mulige slaktevekter, samt et minimumskrav for slakt per perioder, kunne føre til en jevnere utslaktingsprofil. Figuren viser også at det i enkelte perioder tidlig på sommeren nesten bare slaktes fisk på 4 kg. Dette samsvarer med periodene like før det blir varmt, og biomasseveksten i anleggene er størst.

I figur 7.3 presenteres biomassen i hvert av de fire trøndelagsanleggene. Her synliggjøres samspillet mellom biomassen i de forskjellige anleggene og regionsbiomassen. Anleggs-MTB-grensene er tidligere presentert i tabell 6.1, og vi kan se



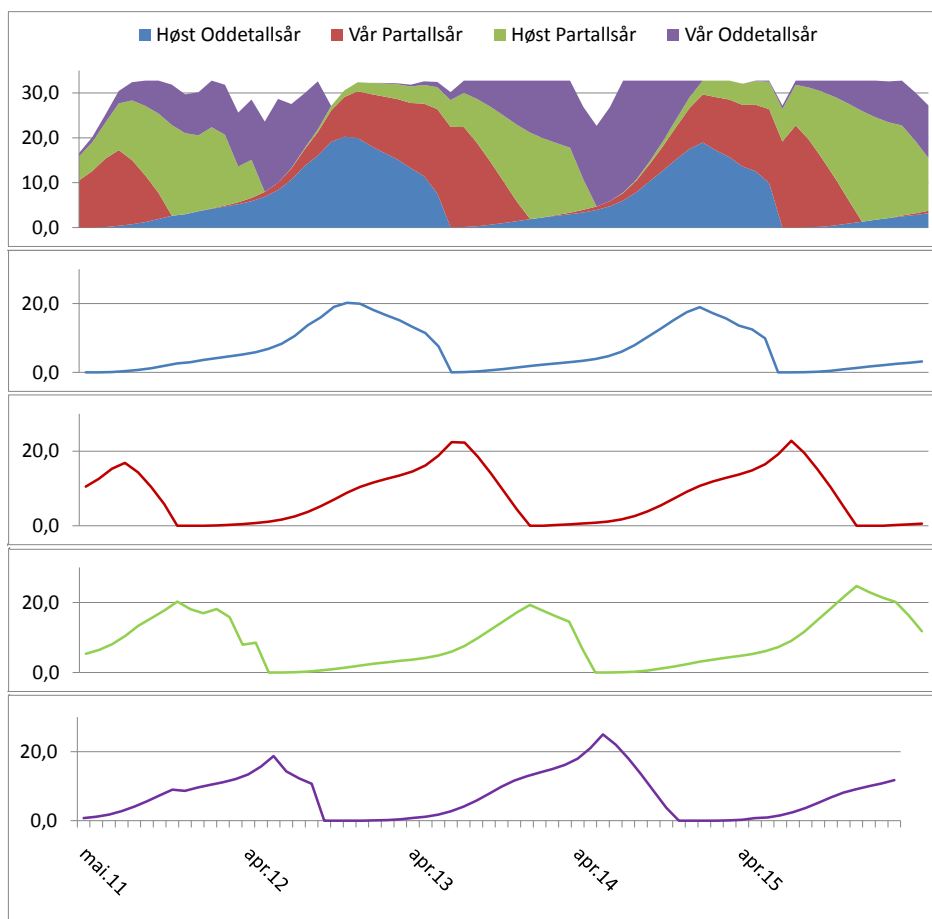
Figur 7.2: Gjennomsnittlig antall tusen laks slaktet per periode og slaktevekt. Merk at fra april 2013 fordobles periodelengden, noe som gjør at det slaktes mer i hver periode. (OP)

at de kun på enkelte anlegg er bindende. Dette kan tyde på at i enkelte utsettsperioder besitter Marine Harvest flere anlegg enn de behøver for å utnytte regions-MTB. I figur 7.3 kan man også se at det er noe brattere nedgang i biomassen på kurvene som hører til våranleggene enn det som er tilfelle for høstanleggene. En grunn til dette kan være at fisken som settes ut i våranleggene blir ferdig om sommeren og høsten, da fisken vokser fort, og må slaktes ut over kortere tid enn høstfisken som blir ferdig på vinteren og våren.

7.2 Alternativ målvekt(AM)

Med 5,5 kg som målsatt slaktevekt, og fortsatt 4 kg som mulig slaktevekt med redusert gevinst, gir enkelte endringer i resultatene i forhold til OP. I tabell 7.5 er de gjennomsnittlige slakteresultatene fra alle utsettssesongene presentert. Utsettene i høst 2011 er fortsatt dekket av førstestegsbeslutningen, mens resten dekkes av andrestegsbeslutningen. Vi ser tydelig at en mulig slaktevekt på 4 kg ikke benyttes like mye her som med målvekt på 6 kg.

Sammenlignet med OP (tabell 7.4) ser vi at det slaktes betraktelig flere antall fisk når målvekten er 5,5 kg. I tabell 7.1 ser vi også at totalvolumet er større med 5,5 kg som slaktevekt. Selv med lavere utnyttelse av MTB, ser vi at antall tonn slaktet per konsesjon er betraktelig høyere med 5,5 kg som slaktevekt. Det å minimere avvik fra MTB kan dermed ikke sies å være det samme som å maksimere profitt.



Figur 7.3: Biomasseoversikt for trøndelagsanleggene i antall tusen tonn. Tidspunktene står for når første utsett i anlegget gjøres. De forskjellige anleggene har størst biomasse på forskjellige tidspunkt. Brakkleggingsperiodene i anleggene vises tydelig, med null biomasse. Kurvene representerer et gjennomsnitt av alle scenariene. (OP)

Tabell 7.5: Antall tusen fisk slaktet sortert per utsettstidspunkt og slaktevekt. (AM)

Utsettsgenerasjon	4 kg	5,5 kg	Sum
Høst 2011	1045.6	7177.0	8222.5
Vår 2012	63.8	7256.5	7320.3
Høst 2012	0.0	6594.7	6594.7
Vår 2013	0.0	6117.5	6117.5
Høst 2013	0.0	7037.2	7037.2
Vår 2014	0.0	7324.8	7324.8
Høst 2014	0.0	7125.8	7125.8

7.3 Usikker vekst (UV) og usikker dødelighet (UD)

I UV og UD varierer vi kun en av usikkerhetsfaktorene om gangen, mens vi bruker forventningsverdien for den andre.

Begge instansene har et noe lavere førsteutsett enn originalproblemet. I andresteg ser vi i tabell 7.6 at UD vil vi kunne justere for en del av usikkerheten i dødelighet ved å sette ut mer eller mindre smolt i neste utsett. Standardavviket viser hvor store skiller det er mellom scenariene i en utsettsesong. I UV, får man ikke justert dette i like stor grad, og vi ender opp med et lavere utsett i vår 2012 enn i både UD og OP. Utsettene for UV UD og OP vil med tiden konvergere. Når veksten er eneste usikre parameter er det nesten utelukkende slaktingen som justeres når usikkerheten oppløses. Dette gir horisontale skift i biomassen, og fører til at slakt vil kunne foregå til andre tidspunkter.

Tabell 7.6: Total utsett i 1000 og standardavvik per utsettsesong for UV, UD og OP.

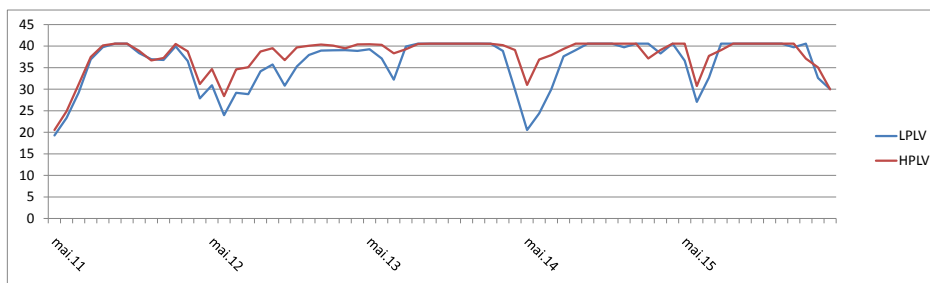
	UV		UD		OP	
	Ant. smolt	St.avv.	Ant. smolt	St.avv.	Ant. smolt	St.avv.
Høst 2011	8698.1		8650.4		8814.9	
Vår 2012	8378.0	42.5	8662.2	431.4	8589.9	415.5
Høst 2012	5991.3	0.0	5991.3	0.0	5991.3	0.0
Vår 2013	7946.2	0.0	7946.2	0.0	7946.2	0.0
Høst 2013	7083.3	0.0	7083.3	0.0	7083.3	0.0
Vår 2014	8463.4	0.0	8463.4	0.0	8463.4	0.0
Høst 2014	7602.4	0.0	7602.4	0.0	7602.4	0.0

At usikkerheten er vanskeligere å justere for når det gjelder vekst enn dødelighet ser vi også tydelige tegn på i tabell 7.1. Forventet verdi av perfekt informasjon (EVPI) er høyere for UV enn for UD. Med usikker dødelighet klarer det stokastiske problemet å tilpasse seg bedre enn hva som er tilfellet med usikker vekst. Med flere alternative slaktevekter, hadde tilpasningsevnen trolig blitt bedre for usikkerhet knyttet til veksten.

7.4 Lav profitt for lav vekt (LPLV) og høy profitt for lav vekt (HPLV)

I probleminstans LPLV ble det forsøkt med null gevinst i saltvannsleddet for fisk som slaktes på 4 kg, mens i HPLV ble det antatt lik profitt per kilo for fisk slaktet på 4 kg og på 6 kg. Beslutningene er sensitive for endringer i profitt, særlig så dramatiske endringer som LPLV og HPLV medfører.

I figur 7.4 synliggjøres effekten av å kunne slakte på lav vekt. Hvis kun slakt på 6 kg gis verdi, ser vi at det blir et kraftig fall i biomasse hver vår. Vi ser at en høy profitt for 4 kg-slakt øker MTB-utnyttelsen kraftig.



Figur 7.4: Gjennomsnittlig biomasse for probleminstans LPLV og HPLV trøndelagsanleggene.

Tabell 7.7: Gjennomsnittlig smoltutsett i antall tusen per sesong LPLV og HPLV

	LPLV	HPLV
Vår 2012	6869.9	9600.8
Høst 2012	6993.4	11315.2
Vår 2013	5900.5	9617.0
Høst 2013	7237.0	12071.1
Vår 2014	6157.5	6720.1
Høst 2014	7602.4	13569.1

I LPLV, hvor kun slakting på 6 kg gis verdi ser vi i tabell 7.7 at høstutsettene er nesten like store som i OP. Våransleggene ser ut til å være mer avhengige av muligheter for å slakte på lavere vekt for å opprettholde størrelsen på utsettene. Dette samsvarer med Langan and Toftøy (2010) hvor det ble anbefalt å ha større utsett om høsten enn om våren etter å ha kjørt en modell som kun slaktet på 6 kg. I HPLV ser vi at det er betraktelig større smoltutsett i alle perioder, og at også her er høstutsettene noe større enn vårutsettene.

Sammen med figur 7.4 kan det tyde på at utsett av fisk om våren som kan slaktes på lav vekt vil kunne fylle opp ledig kapasitet på både biomasse og slakterisiden, sammenlignet med å bare slakte på en målvekt.

7.5 Vår 2012 som førstestegsbeslutning (VÅR)

Med vårutsett 2012 som førstestegsbeslutning, er inngående biomasse i førstesteget lik inngående biomasse i andresteget fra OP. Vi har valgt å bruke et bestemt scenario, nemlig (3,3). Dette scenariet representerer 85 % overlevelse og vekstscenario 3. I tabell 7.8 sammenlignes vårutsettet i 2012 fra VÅR(3,3) med andrestegsbeslutningen for samme periode og scenario fra OP. Her ser vi at det totale antallet smolt avviker en del. Det settes ut en del mindre fisk i førstestegsbeslutningen enn det som ble gjort for aktuelt scenario i OP. Noe av dette kan forklares med at

i OP er utsettet planlagt for deterministisk framtid, mens VÅR-modellen planlegger for flere mulige scenarier, og dermed får flere restriksjoner å forholde seg til. En del av dette vil kunne justeres ved en multistegsmodell.

Tabell 7.8: Sammenligning av andrestegsutsett OP(3,3) og førstestegsutsett VÅR.

Ukenummer	Smoltutsett første steg (VÅR)				
	70 gram	110 gram	150 gram	250 gram	
6-7	0.0	0.0	853.2	736.2	
8-9	0.0	0.0	0.0	62.9	
10-11	883.9	0.0	0.0	431.9	
12-13	20.4	25.7	752.7	0.0	
14-15	0.0	824.3	0.0	0.0	
16-17	780.3	0.0	0.0	0.0	
18-19	0.0	0.0	0.0	0.0	
20-21	663.5	0.0	0.0	0.0	
22-23	639.0	0.0	0.0	0.0	
24-25	521.4	0.0	0.0	0.0	
26-27	386.0	0.0	0.0	0.0	
Sum	3894.4	849.9	1605.9	1231.0	7581.1
Ukenummer	Smoltutsett andresteg OP(3,3)				
	70 gram	110 gram	150 gram	250 gram	
6-7	0.0	0.0	1000.0	0.0	
8-9	0.0	0.0	0.0	0.0	
10-11	1000.0	0.0	0.0	0.0	
12-13	0.0	688.1	0.0	0.0	
14-15	519.7	1000.0	0.0	0.0	
16-17	1000.0	0.0	0.0	787.3	
18-19	0.0	33.7	0.0	0.0	
20-21	328.4	0.0	0.0	0.0	
22-23	1000.0	0.0	0.0	0.0	
24-25	67.4	0.0	0.0	0.0	
26-27	1000.0	0.0	0.0	0.0	
Sum	4915.5	1721.7	1000.0	787.3	8424.5

Hvis vi sammenligner tabell 7.9 med tabell 7.4 ser vi at trendene fra OP videreføres i VÅR(3,3). Et noe mindre førstestegsutsett enn i OP tas igjen med et en del større utsett i første andrestegsesong.

7.6 Deterministisk model (OP-DET)

Den deterministiske modellen er kjørt med forventningsverdi for dødelighet og temperatur i stedet for de usikre parametrene. Dette er benyttet til å generere

Tabell 7.9: Gjennomsnittlig antall tusen fisk slaktet per slaktevekt og utsettstidspunkt. (VÅR)

Utsettsgenerasjon	4 kg	6kg	Sum
Vår 2012	492.4	6183.6	6675.9
Høst 2012	4.4	5564.4	5568.9
Vår2013	1727.0	5036.8	6763.8
Høst 2013	838.6	5948.4	6787.0
Vår 2014	1700.0	5326.8	7026.8
Høst 2014	0.0	6308.8	6308.8
Vår 2015	1469.8	5273.2	6743.0

VSS-verdier for alle probleminstansene. For originalproblemet finnes det og komplette resultater for en deterministisk modell, OP-DET.

OP-DET har høyere objektverdi enn OP. Dette er ikke uventet ettersom den deterministiske modellen slipper å ta hensyn til restriksjoner som kun er bindende for enkelte scenarier, og ikke for forventningsverdiscenariet. Scenariene med mest ekstreme utslag i OP, fører til en del dyr nødslakt, som man unngår i OP-DET. Utsettene i de siste fire utsettssesongene i planleggingsperioden er like for OP-DET og OP.

7.7 EVPI og VSS

Å betale for perfekt informasjon om sjøtemperaturer og dødelighet er ikke mulig. Dermed blir EVPI et rent teoretisk mål på usikkerheten. VSS blir et mål på hvor stor fleksibilitet den stokastiske modellen innfører. I tabell 7.1 er verdiene på EVPI og VSS presentert for alle probleminstansene.

EVPI er forholdsvis lav i implementeringen. For OP er EVPI 0,52 % av objektivverdien. En del av grunnen til dette er den lange planleggingshorisonten, med stor andel deterministisk framtid. Dette gir store deterministiske drivere i objektfunksjonen, som gjør at EVPI reduseres. Blant våre probleminstanser skiller LPLV seg noe ut ved å ha en høy EVPI. Dette har sammenheng med at fleksibiliteten i utslaktingen reduseres kraftig, når slakting på 4 kg ikke gis noen verdi.

I OP har vi en VSS på 0,30 % av objektivverdien. Også her er store deterministiske drivere en grunn til den lave verdien. HPLV er den probleminstansen som har klart høyest VSS, 32,02 millioner kroner, eller ca.0,63 % av objektivverdien. Dette kan ha å gjøre med de store fleksibilitetene i slakt på 4 kg kontra 6 kg som man har i denne instansen.

8 Konklusjon

Målet med denne oppgaven har vært å lage et taktisk planleggingsverktøy for smoltutsett for store aktører i oppdrettsnæringen. Vi har utviklet en stokastisk modell som maksimerer profitt, og inkluderer betingelser og rammevilkår for aktører i næringen. Modellen tar hensyn til usikkerhet i både vekst og dødelighet. Modellen er implementert med utgangspunkt i Marine Harvests 39 anlegg i Region Midt.

En senking av målvekten fra 6 kg til 5,5 kg vil kunne øke totalt slaktevolum. Med en målvekt på 6 kg oppnår vi 1349 tonn levende fisk slaktet per konsesjon, mens vi med en målvekt på 5,5 kg får økt utbyttet til 1488 tonn per konsesjon. Til sammenligning slaktet Marine Harvest i 2009 og 2010 henholdsvis 1083 og 1090 tonn per konsesjon. Deler av gevinsten vi oppnår kan tilskrives forenklinger vi gjør, samt ekstra store sykdomsproblemer for laksen i de aktuelle årene.

Med dagens målvekt på 6 kg, vil det være fordelaktig å også ha muligheten til å slakte på en lavere vekt. Med en alternativ slaktevekt på 4 kg vil det for våranleggene lønne seg å sette ut en del fisk som slaktes på denne vekten i mai-juni året etter smoltutsett. På denne måten kan vi oppnå en reduksjon i det tradisjonelle fallet i biomasse oppdrettere ser om våren. Reduksjonen i mengde fisk slaktet på 6 kg er liten sammenlignet med det vi får igjen av fisk slaktet på 4 kg.

I vår tostegsmodell finner vi at usikkerheten i vekst vanskelig kan reguleres for med fremtidige smoltutsett. Usikkerhet i overlevelse for smolten fører imidlertid til store variasjoner for utsett i påfølgende sesong. Når vi ser to sesonger fremover er imidlertid variasjonene i smoltutsett ubetydelige.

Verdien av stokastisk løsning for probleminstansene ligger mellom 0,24 % og 0,65 % av objektverdien. De forholdsvis lave verdiene skyldes i stor grad den lange planleggingshorisonten, med store deterministiske drivere i objektfunksjonen.

For å virkelig dra nytte av en optimeringsmodell, må den samkjøres godt med andre ledd i verdikjeden. En utvidelse hvor det fokuseres på kostnader og ledetid i ferskvannsledet av verdikjeden vil være en naturlig utvidelse av denne oppgaven. Etterspørselssiden kan også modelleres.

Resultatene ved kjøring av vårmodellen viste noe avvikende resultater i forhold til andrestegsbeslutningene fra høstmodellen. Det er muligheter for å gjøre enkelte forskyninger i utsettene fra sesong til sesong og dermed unngå noe av usikkerheten. En utvidelse til en multistegsmodell vil trolig kunne hjelpe på dette.

Bibliografi

2011. URL <http://www.nor-seafood.com/eng/2011-hh/2011-Conference-papers-Day-2-Session-6.2>.
- Aquagen, 2010, 2010. URL aquagen.no.
- F. Asche and A.G. Guttormsen. Patterns in the relative price for different sizes of farmed fish. 2002.
- T. Bjørndal. Optimal harvesting of farmed fish. *Marine Resource Economics*, pages 139–159, 1988.
- Fhl, 2010, 2010. URL <http://akvafakta.fhl.no/category.php?categoryID=61>.
- Fiskeridirektoratet, 2010. Forskrift om drift av akvakulturanlegg, 2010a.
- Fiskeridirektoratet, 2010. Fiskeridirektoratets register over akvakulturtillatelser, 2010b. URL <http://fiskeridir.no/akvakultur/registre>.
- O.I. Forsberg. Optimal harvesting of farmed Atlantic salmon at two cohort management strategies and different harvest operation restrictions. *Aquaculture Economics & Management*, 3(2):143–158, 1999. ISSN 1365-7305.
- A.G. Guttormsen and O.I. Forsberg. *The value of information in salmon farming: harvesting the right fish to the right time*. Institutt for økonomi og ressursforvaltning, UMB, 2005.
- T.L. Hansen and T.A. Hansen. Effektivitetsanalyse av norsk matfisknæring for 2006, med benchmarking av lerøy aurora as. 2008.
- F. Jacquet and J. Pluvinage. Climatic uncertainty and farm policy: A discrete stochastic programming model for cereal-livestock farms in algeria. *Agricultural Systems*, 53(4):387 – 407, 1997. ISSN 0308-521X. doi: DOI:10.1016/0308-521X(95)00076-H. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0308521X9500076H>.
- P. Kall and S.W. Wallace. *Stochastic programming*. John Wiley & Sons Inc, 1994.
- O. Kolbeinstveit. Tittel: Norsk oppdrettsnaring Undertittel: laks, sykler og fusjoner. 2004.
- Tarald Bjørndal Langan and Tor Toftøy. Optimeringsmodell for havbruk: Planlegging under et nytt restriksjonsregime. 2010.
- F. Louveaux and JR Birge. *Introduction to stochastic programming*. Springer, 1997.
- Y.S Muhammad. Seafood Value Chain Stochastic Optimization Model. 2010.

-
- Salmon Industry Handbook, 2010. Marine harvest, salmon industry handbook, 2010.
- P. Schütz and A. Tomasgard. The impact of flexibility on operational supply chain planning. *International Journal of Production Economics*, 2009. ISSN 0925-5273.
- SSB, 2010, 2010. URL <http://www.ssb.no/fiskerihavbruk/>.
- N.A. Stikholmen. Produktivitetsutvikling over tid i oppdrett av laks: en studie av perioden 2001-2008 med bruk av DEA og Malmquistindeks, 2010.
- A. Van Paassen. *Bridging the gap: computer model enhanced learning about natural resources management in Burkina Faso*. Number 49. Wageningen University and Research Centre, 2004.

A Deterministisk ekvivalent

- Sett

$\mathcal{J} = \{1, 2\}$	Sett av alle steg i modellen.
\mathcal{I}	Sett av alle sjøvannsanlegg.
$\mathcal{I}_{F\emptyset RST}$	Sett av alle sjøvannsanlegg med utsett i første steg.
\mathcal{S}	Sett av alle smolttyper.
\mathcal{T}^j	Sett av alle tidsperioder i steg j .
\mathcal{T}_{UTS_i}	Sett av alle utsettsperioder for anlegg i .
\mathcal{T}_{SLUTT_i}	Sett av alle tidsperioder i planleggingsperioden hvor biomasse og slakt fra anlegg i settes lik en sluttverdi.
\mathcal{B}	Sett av alle tillatte slaktevekter.
\mathcal{V}	Sett av alle vektklasser for inngående balanse ved starten på et steg.
\mathcal{R}	Sett av alle regioner.
\mathcal{L}_l	Sett av tidsperioder for slaktekrav. Består av et antall perioder t etter hverandre.
\mathcal{L}_{INDEKS}	Sett av indekser som beskriver mulige \mathcal{L}_l . $l \in L_{INDEKS}$
\mathcal{D}_d	Sett av tidsperioder for smoltrestriksjoner. Består av et antall perioder t etter hverandre.
\mathcal{D}_{INDEKS}	Sett av indekser som beskriver mulige \mathcal{D}_d . $d \in D_{INDEKS}$
Ω_F	Sett av alle scenarier.

- Indekser

i	Lokasjonsindeks.
t, τ	Tidsindekser.
s	Smolttypeindeks.
v	Vektklasseindeks. Henviser til vekten i første periode i et steg.
b	Slaktevektindeks.
j	Stegindeks.
r	Regionsindeks.
l	Indeks for sett av perioder med slaktekrav.
d	Indeks for sett av perioder med smoltutsettsbegrensning.
ω	Scenarioindeks.

- Variable

Alle andrestegsvariable ($j = 2$) vil i tillegg få en scenarioindeks, (ω), til slutt.

y_{isbt}^j	Antall smolt av type s satt ut i anlegg i i periode t besluttet i steg j . Hvis fisken slaktes i samme steg som den settes ut benyttes også en slaktevektindeks b .
--------------	---

x_{ivb}^j	Antall laks i vektklasse v som skal slaktes ved slaktevekt b i anlegg i besluttet i steg j .
z_{ivbt}^j	Antall laks fra vektklasse v som slaktes ved slaktevekt b i periode t fra anlegg i ved steg j .
s_{ibt}^2	Antall laks satt ut i steg 2 som slaktes ved slaktevekt b i periode t fra anlegg i .
b_{IOMit}^j	Biomassen i anlegg i ved periode t .
i_{Biv}^2	Antall fisk i vektklasse v i anlegg i ved inngangen til steg 2.
m_{MTBIt}^j	Brudd på MTB-restriksjon i anlegg i i periode t .
m_{MTBMr}^j	Brudd på regions-MTB-restriksjon i region r i periode t .
$m_{MAXSLAKTl}^j$	Brudd på maksimal slaktekapasitet i slakteperiode l .
$m_{MINSLAKTl}^j$	Brudd på minstekrav for slakt i slakteperiode l .

- Konstanter

$C_{SMOLTisb\tau}$	Saltvannsprofitt for fisk satt ut i periode τ av smolttype s slaktet ved vekten b i periode t fra anlegg i .
$C_{LAKSivbt}$	Saltvannsprofitt for fisk fra vektklasse v slaktet ved vekten b i periode t fra anlegg i .
$K_{SMOLTsvt}(\omega)$	Koeffisient som fordeler andel smolt av type s utsatt i periode t i første steg i vektklasse v i andre steg ved scenario ω .
$K_{LAKSvv'b}(\omega)$	Koeffisient som fordeler andel laks fra vektklasse v i første steg til vektklasse v' i andre steg ved scenario ω .
I_{Biv}	Antall fisk i vektklasse v i anlegg i ved starttilstanden.
$W_{SMOLTisb\tau}$	Vekt i periode τ for smolt av type s utsatt i periode t i anlegg i for slaktevekt b .
$W_{LAKSivt}$	Vekt i periode t for laks fra vektklasse v i anlegg i .
MTB_{it}	Maksimal tillatt biomasse i anlegg i i periode t .
MTB_r	Maksimal tillatt biomasse i region r .
G_{st}	Maksimal mengde smolt av type s som kan settes ut i periode t .
G_{sp}	Maksimal mengde smolt av type s som kan settes ut i smoltperiode p .
O_{MINI}	Nedre grense for slakt i tidsperiode l .
O_{MAKSI}	Øvre grense for slakt i tidsperiode l .
$A_{SMOLTisb\tau}$	Binær koeffisient som er 1 dersom smolt av type s utsatt i anlegg i i periode t slaktes ved slaktevekt b i periode τ .
$A_{LAKSivb\tau}$	Binær koeffisient som er 1 dersom fisk i anlegg i fra vektklasse v slaktes ved slaktevekt b i periode τ .
$O_{VERL}(\omega)$	Andel smolt som overlever i scenario ω .
O_{VERLF}	Andel smolt som overlever i deterministiske perioder.
U_{BIt}	(Utgående) biomasse i anlegg i ved periode $t \in \mathcal{T}_{SLUTT_i}$.
U_{St}	Antall utslaktet fra anlegg i i periode $t \in \mathcal{T}_{SLUTT_i}$.
$P_{ROFITtb}$	Profitt per kilo i saltvannsleddet av av verdikjeden ved slakt på vekt b .

M_{MTB}	Straffekostnad for brudd på MTB-restriksjon på anleggsbasis.
M_{MTBR}	Straffekostnad for brudd på MTB-restriksjon på regionsbasis.
$M_{MAXSLAKT}$	Kostnad for å overstige slakterikapasitet.
$M_{MINSLAKT}$	Kostnad for å ikke overholde minstekravet for slakt.
$M_{IBSLAKT_v}$	Kostnad ved nødslakt av fisk i vektklasse v ved inngangen til et nytt steg.

Modell

Inngående biomasse

$$\sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^1 \leq I_{Biv} \quad i \in \mathcal{I}, v \in \mathcal{V} \quad (\text{A.1})$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} M_{IBSLAKT_v} (I_{Biv} - \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^1) \quad (\text{A.2})$$

Overgang fra første til andre steg, fordeling i nye vektclasser og mulig tvangsslaktning

$$\begin{aligned} i_{Biv'}^2(\omega) &= \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{t \in T_{UTSi}^1} y_{ist}^1 O_{VERL}(\omega) K_{SMOLT_{svt}}(\omega) \\ &+ \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^1 K_{LAKS_{vv'b}}(\omega) \quad i \in \mathcal{I}, v' \in \mathcal{V} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

$$\sum_{b \in \mathcal{B}} x_{iv'b}^2(\omega) \leq i_{Biv'}^2(\omega) \quad i \in \mathcal{I}, \omega \in \Omega_F \quad (\text{A.4})$$

Nødslakt, $(i_{Bv}^2 - \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^2)$, gis samme kostnad som i førstesteget.

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} M_{IBSLAKT_v} (i_{Biv}^2 - \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^2(\omega)) \quad (\text{A.5})$$

Biomasse og MTB-restriksjoner

$$\begin{aligned}
b_{IOMi\tau}^1 &= \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}^1} W_{SMOLTi\tau}^1 O_{VERLFy_{ist}^1} \\
&\quad + \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} W_{LAKSivb\tau}^1 x_{ivb}^1 \quad i \in \mathcal{I}, \tau \in \mathcal{T}^1
\end{aligned} \tag{A.6}$$

$$b_{IOMi\tau}^1 - m_{MTBi\tau}^1 \leq MTB_{i\tau} \quad i \in \mathcal{I}, \tau \in \mathcal{T}^1 \tag{A.7}$$

$$\begin{aligned}
b_{IOMi\tau}^2(\omega) &= \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}^2} W_{SMOLTi\tau}^2(\omega) O_{VERLFy_{isbt}^2(\omega)} \\
&\quad + \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} W_{LAKSivb\tau}^2(\omega) x_{ivb}^2(\omega) \quad i \in \mathcal{I}, \tau \in \mathcal{T}^2, \omega \in \Omega_F
\end{aligned} \tag{A.8}$$

$$b_{IOMi\tau}^2(\omega) - m_{MTBi\tau}^2(\omega) \leq MTB_{i\tau} \quad i \in \mathcal{I}, \omega \in \Omega_F, \tau \in \mathcal{T}^2, \omega \in \Omega_F \tag{A.9}$$

$$\sum_{i \in I_r} b_{IOMi\tau}^1 - m_{r\tau}^1 \leq MTB_{r\tau} \quad r \in \mathcal{R}, \tau \in \mathcal{T}^1 \tag{A.10}$$

$$\sum_{i \in I_r} b_{IOMi\tau}^2(\omega) - m_{MTBRr\tau}^2(\omega) \leq MTB_{r\tau} \quad r \in \mathcal{R}, \tau \in \mathcal{T}^2, \omega \in \Omega_F \tag{A.11}$$

Slakting

$$z_{ib\tau}^1 = \sum_{v \in \mathcal{V}} A_{LAKSivb\tau}^1 x_{ivb}^1 \quad i \in \mathcal{I}, b \in \mathcal{B}, \tau \in \mathcal{T}^1 \tag{A.12}$$

$$z_{ib\tau}^2(\omega) = \sum_{v \in \mathcal{V}} A_{LAKSivb\tau}^2(\omega) x_{ivb}^2(\omega) \quad i \in \mathcal{I}, b \in \mathcal{B}, \tau \in \mathcal{T}^2 \tag{A.13}$$

$$s_{ib\tau}^2(\omega) = \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}^2} A_{SMOLTi\tau}^2 O_{VERLFy_{isbt}^2(\omega)} \quad i \in \mathcal{I}, s \in \mathcal{S}, \tau \in \mathcal{T}^2 \tag{A.14}$$

Krav til slakting

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l} z_{ivbt}^1 \\ & + m_{\text{MINSLAKTI}} \geq O_{\text{MINI}} \{l \in \mathcal{L}_{\text{INDEKS}} | \mathcal{L}_l \subseteq \mathcal{T}^1\} \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l} z_{ivbt}^1 \\ & - m_{\text{MAXSLAKTI}} \leq O_{\text{MAXI}} \{l \in \mathcal{L}_{\text{INDEKS}} | \mathcal{L}_l \subseteq \mathcal{T}^1\} \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^1} z_{ivbt}^1 \\ & + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2} z_{ivbt}^2(\omega) \\ & + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2} s_{isbt}^2(\omega) \\ & + m_{\text{MINSLAKTI}}^2(\omega) \geq O_{\text{MINI}} \{l \in \mathcal{L}_{\text{INDEKS}} | \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2 \neq \emptyset\}, \omega \in \Omega_F \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^1} z_{ivbt}^1 \\ & + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2} z_{ivbt}^2(\omega) \\ & + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2} s_{isbt}^2(\omega) \\ & - m_{\text{MAXSLAKTI}}^2(\omega) \leq O_{\text{MAXI}} \{l \in \mathcal{L}_{\text{INDEKS}} | \mathcal{L}_l \cap \mathcal{T}^2 \neq \emptyset\}, \omega \in \Omega_F \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

Tilgjengelig smolt for utsett

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} y_{ist}^1 \leq G_{st} \quad s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}^1 \quad (\text{A.19})$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{b \in \mathcal{B}} y_{isbt}^2(\omega) \leq G_{st} \quad s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}^2 \quad (\text{A.20})$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{D}_d \cap \mathcal{T}^1} y_{ist}^1 + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{D}_d \cap \mathcal{T}^2} y_{isbt}^2(\omega) \leq G_{sd} \quad s \in \mathcal{S}, d \in \mathcal{D}_{INDEKS}, \omega \in \Omega_F \quad (\text{A.21})$$

Spesialtilfelle der utsettsperioden for et anlegg varer lenger enn planleggingsperioden

$$y_{ist}^1 = \sum_{b \in \mathcal{B}} y_{isbt}^2 \quad i \in \mathcal{I}_{FØRST}, s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}_{UTS}^1 \quad (\text{A.22})$$

End-of-horizon

$$b_{IOMit}(\omega) = U_{Bit} \quad i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}_{SLUTTI} \quad (\text{A.23})$$

$$(\text{A.24})$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{b \in \mathcal{B}} s_{ibt}^2(\omega) = U_{St} \quad i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}_{SLUTTI} \quad (\text{A.25})$$

Ikke-negativitetskrav

$$y_{isbt}^j, \quad x_{ivb}^j, \quad z_{ivbt}^j, \quad s_{ibt}^2, \quad b_{IOMit}^j, \quad i_{Biv}^2, \quad m_{MTBit}^j, \\ m_{MTBMr}^j, \quad m_{MAXSLAKTI}^j, \quad m_{MINSLAKTI}^j \geq 0 \quad (\text{A.26})$$

Objektfunksjon

$$\max z = \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}^1} C_{LAKSivbt} x_{ivb}^1 \quad (\text{A.27a})$$

$$- \sum_{i \in \mathcal{I}_{FORST}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}} F_{SMOLTst} y_{ist}^1 \quad (\text{A.27b})$$

$$- \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} M_{IBSLAKTv} (I_{Biv} - \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^1) \quad (\text{A.27c})$$

$$- \sum_{t \in \mathcal{T}^1} M_{SLAKTmax} m_{MAXSLAKTl} \quad (\text{A.27d})$$

$$- \sum_{t \in \mathcal{T}^1} M_{SLAKTmin} m_{MINSLAKTl} \quad (\text{A.27e})$$

$$- \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}^1} M_{MTB} m_{MTBit}(\omega) \quad (\text{A.27f})$$

$$- \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}^1} M_{MTBR} m_{MTBRrt}(\omega) \quad (\text{A.27g})$$

$$+ \sum_{\omega \in \Omega_F} \Pr(\omega) [$$

$$+ \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}^2} C_{LAKSivbt}(\omega) x_{ivb}^2(\omega) \quad (\text{A.27h})$$

$$+ \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}^2} \sum_{\tau \in \mathcal{T}_{UTSi}} C_{SMOLTisb\tau} OVERLF y_{isb\tau}^2(\omega) \quad (\text{A.27i})$$

$$- \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{v \in \mathcal{V}} M_{IBSLAKTv} (i_{Biv}^2(\omega) - \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{ivb}^2(\omega)) \quad (\text{A.27j})$$

$$- \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}_{UTSi}} F_{SMOLTst} y_{isbt}^2(\omega) \quad (\text{A.27k})$$

$$- \sum_{t \in \mathcal{T}^2} M_{MAXSLAKT} m_{MAXSLAKTl}(\omega) \quad (\text{A.27l})$$

$$- \sum_{t \in \mathcal{T}^2} M_{MINSLAKT} m_{MINSLAKTl}(\omega) \quad (\text{A.27m})$$

$$- \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}^2} M_{MTB} m_{MTBit}(\omega) \quad (\text{A.27n})$$

$$- \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}^2} M_{MTBR} m_{MTBRrt}(\omega)] \quad (\text{A.27o})$$

B Datagrunnlag

Periods:	[1 - 93]
PeriodsStage1:	[1 - 15]
PeriodsStage2:	[16 - 93]
PeriodsStage2TwoWeeks:	[16 - 55]
PeriodsStage2FourWeeks:	[56 - 93]
FirstStageRelease:	[5 - 15]
AutumnRelease1:	[32 - 42]
AutumnRelease2:	[57 - 62]
AutumnRelease3:	[70 - 75]
SpringRelease1:	[21 - 31]
SpringRelease2:	[47 - 56]
SpringRelease3:	[65 - 69]
SalmonGrowthStage2:	[16 - 56]
AutumnGrowth1:	[32 - 69]
AutumnGrowth2:	[57 - 82]
AutumnGrowth3:	[70 - 93]
SpringGrowth1:	[21 - 63]
SpringGrowth2:	[47 - 76]
SpringGrowth3:	[65 - 89]
Regions:	[Trondelag More]
Facilities:	[trond_a1 trond_s2 trond_a2 trond_s1 more_a1 more_s2 more_a2 more_s1]
Facilities_trond:	[trond_a1 trond_s2 trond_a2 trond_s1]
Facilities_more:	[more_a1 more_s2 more_a2 more_s1]
Facilities_autumn:	[trond_a1 trond_a2 more_a1 more_a2]
Facilities_spring:	[trond_s1 trond_s2 more_s1 more_s2]
Facilities_autumngrowth1:	[trond_a2 more_a2]
Facilities_autumngrowth2:	[trond_a1 more_a1]
Facilities_autumngrowth3:	[trond_a2 more_a2]
Facilities_springgrowth1:	[trond_s2 more_s2]
Facilities_springgrowth2:	[trond_s1 more_s1]
Facilities_springgrowth3:	[trond_s2 more_s2]
Facilities_stage1:	[trond_a1 more_a1]
HarvestWeights:	[4000 6000]
SmoltTypes:	[70 110 150 250]
WeightClasses:	[1 - 49]
GrowthScenarios:	[1 - 9]

MORTALITIES:	[0.95 0.90 0.85 0.80 0.75]
NSCENARIOS:	[45]
SURVIVALRATESECONDDSTAGE:	[0.85]
MTB_REGION:	[32760 7800]
HARVESTWEIGHTPROFIT:	[10 15]
SMOLTCOST:	[5.04 7.92 10.80 18.00]
SMOLTRELEASEMAX_AUTUMNTOTAL:	[15000 3500 1500 1000]
SMOLTRELEASEMAX_SPRINGTOTAL:	[15000 15000 3000 2000]
PENALTY_EMERGENCYHARVEST:	
WeighClasses 1-37:	[90]
WeightClasses 38-49:	[0]

		SMOLTRELEASEMAX_FIRSTSTAGE:			
		SmoltType			
Period		70	110	150	250
5		1000	1000	1000	1000
6		1000	1000	1000	1000
7		1000	1000	1000	1000
8		1000	1000	1000	1000
9		1000	1000	1000	1000
10		1000	1000	1000	1000
11		1000	1000	1000	1000
12		1000	1000	1000	1000
13		1000	1000	1000	1000
14		0	0	1000	1000
15		0	0	1000	1000

Tabell B.1: Tillatt smoltutsett førstesteget i antall tusen

		SMOLTRELEASEMAX_AUTUMN1:			
		SmoltType			
Period		70	110	150	250
32		1000	1000	1000	1000
33		1000	1000	1000	1000
34		1000	1000	1000	1000
35		1000	1000	1000	1000
36		1000	1000	1000	1000
37		1000	1000	1000	1000
38		1000	1000	1000	1000
39		1000	1000	1000	1000
40		1000	1000	1000	1000
41		0	0	1000	1000
42		0	0	1000	1000

Tabell B.2: Tillatt smoltutsett første høstutsett i andresteget i antall tusen

		SMOLTRELEASEMAX_AUTUMN2:			
		SmoltType			
Period		70	110	150	250
57		2000	2000	2000	2000
58		2000	2000	2000	2000
59		2000	2000	2000	2000
60		2000	2000	2000	2000
61		2000	2000	2000	2000
62		0	0	2000	2000

Tabell B.3: Tillatt smoltutsett andre høstutsett i andresteget i antall tusen

		SMOLTRELEASEMAX_AUTUMN3:			
		SmoltType			
Period		70	110	150	250
70		2000	2000	2000	2000
71		2000	2000	2000	2000
72		2000	2000	2000	2000
73		2000	2000	2000	2000
74		2000	2000	2000	2000
75		0	0	2000	2000

Tabell B.4: Tillatt smoltutsett tredje høstutsett i andresteget i antall tusen

		SMOLTRELEASEMAX_SPRING1:			
		SmoltType			
Period		70	110	150	250
21		0	0	1000	1000
22		0	0	1000	1000
23		1000	1000	1000	1000
24		1000	1000	1000	1000
25		1000	1000	1000	1000
26		1000	1000	1000	1000
27		1000	1000	1000	1000
28		1000	1000	1000	1000
29		1000	1000	1000	1000
30		1000	1000	1000	1000
31		1000	1000	1000	1000

Tabell B.5: Tillatt smoltutsett første vårutsett i andresteget i antall tusen

SMOLTRELEASEMAX_SPRING2:				
Period	SmoltType			
	70	110	150	250
47	0	0	1000	1000
48	0	0	1000	1000
49	1000	1000	1000	1000
50	1000	1000	1000	1000
51	1000	1000	1000	1000
52	1000	1000	1000	1000
53	1000	1000	1000	1000
54	1000	1000	1000	1000
55	1000	1000	1000	1000
56	1000	1000	1000	1000

Tabell B.6: Tillatt smoltutsett andre vårutsett i andresteget i antall tusen

SMOLTRELEASEMAX_SPRING3:				
Period	SmoltType			
	70	110	150	250
65	0	0	2000	2000
66	2000	2000	2000	2000
67	2000	2000	2000	2000
68	2000	2000	2000	2000
69	2000	2000	2000	2000

Tabell B.7: Tillatt smoltutsett tredje vårutsett i andresteget i antall tusen

OB:																	
Facility	Period																
	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
trond_a1	-	-	-	-	-	-	-	60	180	480	890	1290	1720	2100	2470	2800	3180
trond_s2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	190	350	550
trond_a2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
trond_s1	-	-	-	120	270	750	950	1550	2470	3710	5180	6780	8160	9130	9980	10780	11730
more_a1	-	-	-	-	-	-	20	50	330	580	910	1260	1600	1900	2160	2400	2670
more_s2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	60	100
more_a2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
more_s1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabell B.8: Utgående biomasse i tusen tonn

C Mosel-kode

```

model Salmon

! Introduction
!This is a two-stage stochastic model used for planning in the production of Atlantic Salmon (fish farming)
!Modeled as a master's thesis in Managerial Economics and Operations Research
!Norwegian University of Science and Technology
!Faculty of Social Sciences and Technology Management
!Department of Industrial Economics and Technology Management
!Written by Tarald Langan and Tor Toftoy
!Spring of 2011

!In this model, the first stage decisions are release of smolt during the autumn of 2011

!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
! Parameters
!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
uses "mnmxprs";!"mmquad", "mmive", "mmmodbc", "mmsystem", "mmjobs"; !gain access to the Xpress-Optimizer solver
uses "mmetc";!For outputting to csv-files
uses "mmsystem"!For writing out the computation time

!Data stored in dat-files

parameters
  Deterministic=true;!Determines whether a deterministic version of the problem should be run
  EEV=false;!Determines whether the firststage solution from the deterministic run should be implemented.

  !Choose which problem to solve:
  Problem="Standard"
  !Problem="5500"
  !Problem="FlatDeathRate"
  !Problem="FlatGrowthRate"
  !Problem="Zero4kgProfit"
  !Problem="High4kgProfit"

  DataFile0=Problem+"/Input/global_data.dat"
  DataFile1=Problem+"/Input/smoltS0_FirstStage.dat"
  DataFile2=Problem+"/Input/salmonS1_FirstStage.dat"
  DataFile3=Problem+"/Input/salmonS0_FirstStage.dat"
  DataFile4=Problem+"/Input/smoltS1_SecondStage.dat"
  DataFile5=Problem+"/Input/smoltS0_SecondStage.dat"
  DataFile6=Problem+"/Input/salmonS1_SecondStage.dat"
  DataFile7=Problem+"/Input/salmonS0_SecondStage.dat"
  DataFile8=Problem+"/Input/EXPECTEDFIRSTSTAGEDECISIONS.dat"
  GrowthScenarioTrack=3;
  MortalityScenarioTrack=3;

end-parameters
if(Deterministic and EEV)then
writeln('Both Deterministic and EEV!!!')
end-if
if(Deterministic)then
DataFile0:="Deterministic/"+DataFile0
DataFile1:="Deterministic/"+DataFile1
DataFile2:="Deterministic/"+DataFile2
DataFile3:="Deterministic/"+DataFile3
end-if

setparam('xprs_maxtime',100)!Maximum number of seconds xpress will run before terminating
starttime:=gettime
writeln(Problem, " model is now starting...")
!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
declarations
!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
!Sets

!Time sets
Periods:          set of integer
PeriodsStage1:   set of integer
PeriodsStage2:   set of integer
PeriodsStage2TwoWeeks: set of integer
PeriodsStage2FourWeeks: set of integer
ReleasePeriodsStage1: set of integer
ReleasePeriodsStage2: set of integer
FirstStageRelease: set of integer
AutumnRelease1:  set of integer
AutumnRelease2:  set of integer
AutumnRelease3:  set of integer
SpringRelease1:  set of integer
SpringRelease2:  set of integer
SpringRelease3:  set of integer
SalmonGrowthStage2: set of integer
AutumnGrowth1:   set of integer
AutumnGrowth2:   set of integer
AutumnGrowth3:   set of integer
SpringGrowth1:   set of integer
SpringGrowth2:   set of integer

```



```

SpringGrowth3:          set of integer

!Facility sets
Facilities:            set of string
Facilities_trond:      set of string
Facilities_more:       set of string
Facilities_autumn:     set of string
Facilities_spring:     set of string
Facilities_autumngrowth1: set of string
Facilities_autumngrowth2: set of string
Facilities_autumngrowth3: set of string
Facilities_springgrowth1: set of string
Facilities_springgrowth2: set of string
Facilities_springgrowth3: set of string
Facilities_stagel:     set of string
Regions:               set of string

!Other sets
WeightClasses:         set of integer
SmoltTypes:            set of integer
HarvestWeights:        set of integer
GrowthScenarios:       set of integer
MortalityScenarios:    set of real

!Constants
SURVIVALRATESECONDDSTAGE: real
NSCENARIOS:            integer
MTB_FACILITY:          array(Periods,Facilities) of real;
MTB_REGION:           array(Regions) of real;
IB:                    array(Facilities,WeightClasses) of real;
OB:                    array(Facilities,77..93) of real;
OHARVEST:              array(Facilities) of real;
SMOLTRELEASEMAX_FIRSTSTAGE: array(FirstStageRelease,SmoltTypes) of real;
SMOLTRELEASEMAX_AUTUMN1: array(AutumnRelease1,SmoltTypes) of real;
SMOLTRELEASEMAX_AUTUMN2: array(AutumnRelease2,SmoltTypes) of real;
SMOLTRELEASEMAX_AUTUMN3: array(AutumnRelease3,SmoltTypes) of real;
SMOLTRELEASEMAX_SPRING1: array(SpringRelease1,SmoltTypes) of real;
SMOLTRELEASEMAX_SPRING2: array(SpringRelease2,SmoltTypes) of real;
SMOLTRELEASEMAX_SPRING3: array(SpringRelease3,SmoltTypes) of real;
SMOLTRELEASEMAX_AUTUMNTOTAL: array(SmoltTypes) of real;
SMOLTRELEASEMAX_SPRINGTOTAL: array(SmoltTypes) of real;
PENALTY_EMERGENCYHARVEST: array(WeightClasses) of real;
MORTALITIES:          array(MortalityScenarios) of real;
SCENARIOPROBABILITIES: array(GrowthScenarios,MortalityScenarios) of real;
HARVESTWEIGHTPROFIT:  array(HarvestWeights) of real
SMOLTCOST:            array(SmoltTypes)of real

!smolt_FirstStage
SMOLTS0_FIRSTSTAGE:    array(SmoltTypes,FirstStageRelease,FirstStageRelease) of real
SMOLTS0_FIRSTSTAGECOEFF: array(SmoltTypes,GrowthScenarios,WeightClasses,FirstStageRelease) of real

!SALMONS1_FIRSTSTAGE
SALMONS1_FIRSTSTAGE:   array(HarvestWeights,PeriodsStagel,WeightClasses) of real
SALMONS1_FIRSTSTAGEHARVEST: array(HarvestWeights,PeriodsStagel,WeightClasses) of integer
SALMONS1_FIRSTSTAGEPROFIT: array(HarvestWeights,PeriodsStagel,WeightClasses) of real
SALMONS1_FIRSTSTAGECOEFF: array(HarvestWeights,GrowthScenarios,WeightClasses,WeightClasses) of real

!SALMONS0_FIRSTSTAGE
SALMONS0_FIRSTSTAGE:   array(HarvestWeights,PeriodsStagel,WeightClasses) of real
SALMONS0_FIRSTSTAGEHARVEST: array(HarvestWeights,PeriodsStagel,WeightClasses) of integer
SALMONS0_FIRSTSTAGEPROFIT: array(HarvestWeights,PeriodsStagel,WeightClasses) of real
SALMONS0_FIRSTSTAGECOEFF: array(HarvestWeights,GrowthScenarios,WeightClasses,WeightClasses) of real

!SMOLTS1_SECONDDSTAGE
SMOLTS1_SECONDDSTAGE1: array(HarvestWeights,SmoltTypes,SpringGrowth1,SpringRelease1) of real
SMOLTS1_SECONDDSTAGE1HARVEST: array(HarvestWeights,SmoltTypes,SpringGrowth1,SpringRelease1) of integer
SMOLTS1_SECONDDSTAGE1PROFIT: array(HarvestWeights,SmoltTypes,SpringGrowth1,SpringRelease1) of real
SMOLTS1_SECONDDSTAGE2: array(HarvestWeights,SmoltTypes,SpringGrowth2,SpringRelease2) of real
SMOLTS1_SECONDDSTAGE2HARVEST: array(HarvestWeights,SmoltTypes,SpringGrowth2,SpringRelease2) of integer
SMOLTS1_SECONDDSTAGE2PROFIT: array(HarvestWeights,SmoltTypes,SpringGrowth2,SpringRelease2) of real
SMOLTS1_SECONDDSTAGE3: array(HarvestWeights,SmoltTypes,SpringGrowth3,SpringRelease3) of real
SMOLTS1_SECONDDSTAGE3HARVEST: array(HarvestWeights,SmoltTypes,SpringGrowth3,SpringRelease3) of integer
SMOLTS1_SECONDDSTAGE3PROFIT: array(HarvestWeights,SmoltTypes,SpringGrowth3,SpringRelease3) of real

!SMOLTS0_SECONDDSTAGE
SMOLTS0_SECONDDSTAGE1: array(HarvestWeights,SmoltTypes,Autumngrowth1,Autumngrowth1) of real
SMOLTS0_SECONDDSTAGE1HARVEST: array(HarvestWeights,SmoltTypes,Autumngrowth1,Autumngrowth1) of integer
SMOLTS0_SECONDDSTAGE1PROFIT: array(HarvestWeights,SmoltTypes,Autumngrowth1,Autumngrowth1) of real
SMOLTS0_SECONDDSTAGE2: array(HarvestWeights,SmoltTypes,Autumngrowth2,Autumngrowth2) of real
SMOLTS0_SECONDDSTAGE2HARVEST: array(HarvestWeights,SmoltTypes,Autumngrowth2,Autumngrowth2) of integer
SMOLTS0_SECONDDSTAGE2PROFIT: array(HarvestWeights,SmoltTypes,Autumngrowth2,Autumngrowth2) of real
SMOLTS0_SECONDDSTAGE3: array(HarvestWeights,SmoltTypes,Autumngrowth3,Autumngrowth3) of real
SMOLTS0_SECONDDSTAGE3HARVEST: array(HarvestWeights,SmoltTypes,Autumngrowth3,Autumngrowth3) of integer
SMOLTS0_SECONDDSTAGE3PROFIT: array(HarvestWeights,SmoltTypes,Autumngrowth3,Autumngrowth3) of real

```

```

!SALMONS1_SECONDSTAGE
SALMONS1_SECONDSTAGE:          array(HarvestWeights,SalmonGrowthStage2,WeightClasses)of real
SALMONS1_SECONDSTAGEHARVEST:  array(HarvestWeights,SalmonGrowthStage2,WeightClasses) of integer
SALMONS1_SECONDSTAGEPROFIT:   array(HarvestWeights,SalmonGrowthStage2,WeightClasses) of real

!SALMONS0_SECONDSTAGE
SALMONS0_SECONDSTAGE:          array(HarvestWeights,SalmonGrowthStage2,WeightClasses) of real
SALMONS0_SECONDSTAGEHARVEST:  array(HarvestWeights,SalmonGrowthStage2,WeightClasses) of integer
SALMONS0_SECONDSTAGEPROFIT:   array(HarvestWeights,SalmonGrowthStage2,WeightClasses) of real

!Input values from the deterministic run to calculate the EEV solution
EXPECTEDy1:                     array(Facilities_stage1,SmoltTypes,FirstStageRelease) of real;
EXPECTEDx1:                     array(Facilities,WeightClasses,HarvestWeights) of real;

!DECISION VARIABLES
!=====

!First Stage variables
y1:                             dynamic array(Facilities_stage1,SmoltTypes,FirstStageRelease) of mpvar;
x1:                             dynamic array(Facilities,WeightClasses,HarvestWeights) of mpvar;
z1:                             dynamic array(Facilities,HarvestWeights,PeriodsStage1) of mpvar;
m1:                             dynamic array(Facilities,PeriodsStage1) of mpvar;
m_reg1:                         dynamic array(Regions,PeriodsStage1) of mpvar;
m_free1:                        dynamic array(Facilities,PeriodsStage1) of mpvar;
m_harvest1:                     dynamic array(PeriodsStage1) of mpvar;
biomass1:                       dynamic array(PeriodsStage1, Facilities) of mpvar;
regionBiomass1:                 dynamic array(Regions,PeriodsStage1) of mpvar;

!Second Stage variables
m2:                             dynamic array(Facilities,PeriodsStage2,GrowthScenarios,MortalityScenarios) of mpvar;
m_reg2:                         dynamic array(Regions,PeriodsStage2,GrowthScenarios,MortalityScenarios) of mpvar;
m_free2:                        dynamic array(Facilities,PeriodsStage2,GrowthScenarios,MortalityScenarios) of mpvar;
m_harvest2:                     dynamic array(PeriodsStage2,GrowthScenarios,MortalityScenarios) of mpvar;

x2:                             dynamic array(Facilities,WeightClasses,HarvestWeights, GrowthScenarios,MortalityScenarios) of mpvar;
x2_y:                           dynamic array(Facilities,WeightClasses,HarvestWeights, GrowthScenarios,MortalityScenarios) of mpvar;
ib2:                             dynamic array(Facilities,WeightClasses, GrowthScenarios,MortalityScenarios) of mpvar;
ib2_y:                           dynamic array(Facilities,WeightClasses, GrowthScenarios,MortalityScenarios) of mpvar;
y2:                             dynamic
array(Facilities,SmoltTypes,HarvestWeights,PeriodsStage2,GrowthScenarios,MortalityScenarios) of mpvar;
z2:                             dynamic array(Facilities,HarvestWeights,PeriodsStage2, GrowthScenarios,MortalityScenarios)
of mpvar; !The amount harvested originating from opening balance stage 2
z2_y:                           dynamic array(Facilities,HarvestWeights,PeriodsStage2, GrowthScenarios,MortalityScenarios)
of mpvar; !The amount harvested originating only from salmon released in stage 1
s2:                             dynamic array(Facilities,HarvestWeights,PeriodsStage2, GrowthScenarios,MortalityScenarios)
of mpvar; !The amount harvested originating from salmon Releaseeg during stage 2

biomass2:                       dynamic array(PeriodsStage2, Facilities,GrowthScenarios,MortalityScenarios) of mpvar;
regionBiomass2:                 dynamic array(Regions,PeriodsStage2,GrowthScenarios,MortalityScenarios) of mpvar;

!Linear constraints
!=====
OpeningBalance:                 array(Facilities,WeightClasses) of lincnr
!First Stage variables
X1:                             array(Facilities,WeightClasses,HarvestWeights) of lincnr;

!Second Stage variables
Y1:                             array(Facilities_stage1,SmoltTypes,FirstStageRelease,MortalityScenarios) of lincnr;!Salmon
Released in stage 1
Z1:                             array(Facilities,HarvestWeights,PeriodsStage1) of lincnr;

X1Sum:                          array(Facilities,WeightClasses) of lincnr;
M1:                              array(Facilities,PeriodsStage1) of lincnr;
M_reg1:                          array(Regions,PeriodsStage1) of lincnr;
M2:                              array(Facilities,PeriodsStage2,GrowthScenarios,MortalityScenarios) of lincnr;
M_reg2:                          array(Regions,PeriodsStage2,GrowthScenarios,MortalityScenarios) of lincnr;

X2:                              dynamic array(Facilities,WeightClasses,HarvestWeights, GrowthScenarios,MortalityScenarios)
of lincnr;
X2_Y:                            dynamic array(Facilities,WeightClasses,HarvestWeights, GrowthScenarios,MortalityScenarios)
of lincnr;
IB2:                             dynamic array(Facilities,WeightClasses, GrowthScenarios,MortalityScenarios) of lincnr;
IB2_Y:                           dynamic array(Facilities,WeightClasses, GrowthScenarios,MortalityScenarios) of lincnr;
Y2:                             dynamic
array(Facilities,SmoltTypes,HarvestWeights,PeriodsStage2,GrowthScenarios,MortalityScenarios) of lincnr;
Z2:                             dynamic array(Facilities,HarvestWeights,PeriodsStage2, GrowthScenarios,MortalityScenarios) of lincnr;
S2:                             dynamic array(Facilities,HarvestWeights,PeriodsStage2, GrowthScenarios,MortalityScenarios) of lincnr;
Biomass1:                       array(PeriodsStage1, Facilities) of lincnr;
Biomass MTB1:                   array(PeriodsStage1, Facilities) of lincnr;
RegionBiomass1:                 array(Regions,PeriodsStage1) of lincnr;
RegionBiomass MTB1:             array(Regions,PeriodsStage1) of lincnr;
MinHarvest1:                   array(PeriodsStage1)of lincnr;
MaxHarvest1:                   array(PeriodsStage1)of lincnr;

```

```

Biomass2:          array(PeriodsStage2, Facilities, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;
Biomass_MTB2:     array(PeriodsStage2, Facilities, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;
RegionBiomass2:   array(Regions, PeriodsStage2, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;
RegionBiomass_MTB2: array(Regions, PeriodsStage2, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;
MinHarvest2:      array(PeriodsStage2, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;
MaxHarvest2:      array(PeriodsStage2, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;

SmoltReleaseMax1: array(PeriodsStage1, SmoltTypes) of linctr;
SmoltReleaseMax2: array(PeriodsStage2, SmoltTypes, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;

SmoltReleaseMaxTotalFirstStage: array(SmoltTypes) of linctr;
SmoltReleaseMaxTotalAutumn1:    array(SmoltTypes, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;
SmoltReleaseMaxTotalAutumn2:    array(SmoltTypes, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;
SmoltReleaseMaxTotalAutumn3:    array(SmoltTypes, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;
SmoltReleaseMaxTotalSpring1:    array(SmoltTypes, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;
SmoltReleaseMaxTotalSpring2:    array(SmoltTypes, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;
SmoltReleaseMaxTotalSpring3:    array(SmoltTypes, GrowthScenarios, MortalityScenarios) of linctr;

!Second Stage Variables
!y1(f,s,p,o1,o2)          -number of smolts left after mortality
!x2(f,w,o1,o2)           -ingoing balance in the second stage planing period - the salmon left from the first
period is distributed among predefined weightclasses
!y2(f,s,p,o1,o2)          -number of smolt released at a given facility during the second stage planning period
!Biomass(t,f,o1, o2)      -biomass present in a facility f at time t under scenario o1 x o2
!regionBiomass(r,t,o1, o2) -sum of the biomass in all facilities in a region r
!m(f,tt,o1,o2)           -amount by which the MAB(MTB) for a facility is exceeded
!m_reg(r,tt,o1,o2)       -amount by which the MAB(MTB) for a region is exceeded

!Auxiliary variables
!z1(f,h,t,o1,o2)         -number of salmon harvested at a given facility during the first stage planning period
!z2(f,p,o1, o2)         -number of salmon harvested that was already released by the start of the second stage
planning period
!s2(f,p,o1, o2)         -number of salmon harvested in the second stage planning period that were released
during the second stage planning period

end-declarations

!#####
!Loading data
!#####

!Initializations of time sets, weightclasses, smolttypes and scenarios
initializations from DataFile0
  WeightClasses;
  GrowthScenarios;
  PeriodsStage1 PeriodsStage2 PeriodsStage2TwoWeeks PeriodsStage2FourWeeks Periods;
  SmoltTypes;
  Facilities Facilities_trond Facilities_more Facilities_autumn Facilities_spring;
  Facilities_autumngrowth1 Facilities_autumngrowth2 Facilities_autumngrowth3 Facilities_springgrowth1
Facilities_springgrowth2 Facilities_springgrowth3 Facilities_stage1;
  Regions;
  HarvestWeights;
  FirstStageRelease AutumnRelease1 AutumnRelease2 AutumnRelease3 SpringRelease1 SpringRelease2 SpringRelease3
  SalmonGrowthStage2 AutumnGrowth1 AutumnGrowth2 AutumnGrowth3 SpringGrowth1 SpringGrowth2 SpringGrowth3;
  MortalityScenarios ;
end-initializations

!Finalizing the defined sets
finalize(WeightClasses);
finalize(SmoltTypes);
finalize(Periods);
finalize(PeriodsStage1);
finalize(PeriodsStage2);
finalize(Facilities);
finalize(Facilities_trond);
finalize(Facilities_more);
finalize(Facilities_autumn);
finalize(Facilities_spring);
finalize(Facilities_autumngrowth1);
finalize(Facilities_autumngrowth2);
finalize(Facilities_autumngrowth3);
finalize(Facilities_springgrowth1);
finalize(Facilities_springgrowth2);
finalize(Facilities_springgrowth3);
finalize(Facilities_stage1);!)
finalize(Regions);
finalize(HarvestWeights);
finalize(FirstStageRelease);
finalize(AutumnRelease1);
finalize(AutumnRelease2);
finalize(AutumnRelease3);
finalize(SpringRelease1);
finalize(SpringRelease2);
finalize(SpringRelease3);
finalize(SalmonGrowthStage2)

```

```

finalize (AutumnGrowth1)
finalize (AutumnGrowth2)
finalize (AutumnGrowth3)
finalize (SpringGrowth1)
finalize (SpringGrowth2)
finalize (SpringGrowth3)
finalize (GrowthScenarios);
finalize (MortalityScenarios);

!Initializations of data depending on the now defined and finalized sets
initializations from DataFile0
MORTALITIES
NSCENARIOS SURVIVALRATESECONDDSTAGE;
MTB_REGION;
PENALTY_EMERGENCYHARVEST;
HARVESTWEIGHTPROFIT;
SMOLTCOST;
SMOLTRELEASEMAX AUTUMNTOTAL SMOLTRELEASEMAX_SPRINGTOTAL;
SMOLTRELEASEMAX_FIRSTSTAGE SMOLTRELEASEMAX_AUTUMN1 SMOLTRELEASEMAX_AUTUMN2 SMOLTRELEASEMAX_AUTUMN3;
SMOLTRELEASEMAX_SPRING1 SMOLTRELEASEMAX_SPRING2 SMOLTRELEASEMAX_SPRING3;
IB
OB MTB_FACILITY;
end-initializations

!Initializing the scenarioprobabilities
forall (o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
SCENARIOPROBABILITIES (o1, o2) := 1 / NSCENARIOS;

!Initializations of growth tables, coefficients and profit
!smolt_FirstStage
initializations from DataFile1
SMOLTS0_FIRSTSTAGE SMOLTS0_FIRSTSTAGECOEFF ;
end-initializations

!SALMONS1_FIRSTSTAGE
initializations from DataFile2
SALMONS1_FIRSTSTAGE SALMONS1_FIRSTSTAGECOEFF SALMONS1_FIRSTSTAGEHARVEST SALMONS1_FIRSTSTAGEPROFIT;
end-initializations

!SALMONS0_FIRSTSTAGE
initializations from DataFile3
SALMONS0_FIRSTSTAGE SALMONS0_FIRSTSTAGECOEFF SALMONS0_FIRSTSTAGEHARVEST SALMONS0_FIRSTSTAGEPROFIT;
end-initializations

!SMOLTS1_SECONDDSTAGE
initializations from DataFile4
SMOLTS1_SECONDDSTAGE1 SMOLTS1_SECONDDSTAGE1HARVEST SMOLTS1_SECONDDSTAGE1PROFIT;
SMOLTS1_SECONDDSTAGE2 SMOLTS1_SECONDDSTAGE2HARVEST SMOLTS1_SECONDDSTAGE2PROFIT;
SMOLTS1_SECONDDSTAGE3 SMOLTS1_SECONDDSTAGE3HARVEST SMOLTS1_SECONDDSTAGE3PROFIT;
end-initializations

!SMOLTS0_SECONDDSTAGE
initializations from DataFile5
SMOLTS0_SECONDDSTAGE1 SMOLTS0_SECONDDSTAGE1HARVEST SMOLTS0_SECONDDSTAGE1PROFIT;
SMOLTS0_SECONDDSTAGE2 SMOLTS0_SECONDDSTAGE2HARVEST SMOLTS0_SECONDDSTAGE2PROFIT;
SMOLTS0_SECONDDSTAGE3 SMOLTS0_SECONDDSTAGE3HARVEST SMOLTS0_SECONDDSTAGE3PROFIT;
end-initializations

!SALMONS1_SECONDDSTAGE
initializations from DataFile6
SALMONS1_SECONDDSTAGE SALMONS1_SECONDDSTAGEHARVEST SALMONS1_SECONDDSTAGEPROFIT;
end-initializations

!SALMONS0_SECONDDSTAGE
initializations from DataFile7
SALMONS0_SECONDDSTAGE SALMONS0_SECONDDSTAGEHARVEST SALMONS0_SECONDDSTAGEPROFIT;
end-initializations

startworktime:=gettime
!#####
!Creating and defining variables
!#####
forall (f in Facilities, w in WeightClasses, h in HarvestWeights)
create (x1 (f, w, h));
forall (f in Facilities_stage1, s in SmoltTypes, t in FirstStageRelease)
create (y1 (f, s, t));

forall (f in Facilities, w in WeightClasses, h in HarvestWeights, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios) do
create (x2 (f, w, h, o1, o2));
create (ib2 (f, w, o1, o2));
end-do

forall (f in Facilities_autumngrowth1, s in SmoltTypes, h in HarvestWeights, p in AutumnRelease1, o1 in
GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)

```

```

        create(y2(f,s,h,p,o1, o2));
forall(f in Facilities_autumngrowth2,s in SmoltTypes ,h in HarvestWeights,p in AutumnRelease2,o1 in
GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
        create(y2(f,s,h,p,o1, o2));
forall(f in Facilities_autumngrowth3,s in SmoltTypes ,h in HarvestWeights,p in AutumnRelease3,o1 in
GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
        create(y2(f,s,h,p,o1, o2));

forall(f in Facilities_springgrowth1,s in SmoltTypes ,h in HarvestWeights,p in SpringRelease1,o1 in
GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
        create(y2(f,s,h,p,o1, o2));
forall(f in Facilities_springgrowth2,s in SmoltTypes ,h in HarvestWeights,p in SpringRelease2,o1 in
GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
        create(y2(f,s,h,p,o1, o2));
forall(f in Facilities_springgrowth3,s in SmoltTypes ,h in HarvestWeights,p in SpringRelease3,o1 in
GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
        create(y2(f,s,h,p,o1, o2));

forall (f in Facilities,tt in PeriodsStage1)
        create(m1(f,tt));
forall(r in Regions,tt in PeriodsStage1)
        create(m_reg1(r,tt));
forall (f in Facilities,tt in PeriodsStage2, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
        create(m2(f,tt,o1,o2));
forall(r in Regions,tt in PeriodsStage2, o1 in GrowthScenarios,o2 in MortalityScenarios)
        create(m_reg2(r,tt,o1,o2));

forall(f in Facilities, w in WeightClasses, h in HarvestWeights, t in PeriodsStage1)
        create(z1(f,h,t));
forall(f in Facilities, w in WeightClasses,h in HarvestWeights,p in SalmonGrowthStage2,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
        create(z2(f,h,p,o1, o2));
forall(f in Facilities, w in WeightClasses,h in HarvestWeights,p in SalmonGrowthStage2,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
        create(z2_y(f,h,p,o1, o2));

forall(f in Facilities_autumngrowth1,h in HarvestWeights, p in AutumnGrowth1,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
        create(s2(f,h,p,o1, o2));
forall(f in Facilities_autumngrowth2,h in HarvestWeights, p in AutumnGrowth2,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
        create(s2(f,h,p,o1, o2));
forall(f in Facilities_autumngrowth3,h in HarvestWeights, p in AutumnGrowth3,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
        create(s2(f,h,p,o1, o2));

forall(f in Facilities_springgrowth1,h in HarvestWeights, p in SpringGrowth1,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
        create(s2(f,h,p,o1, o2));
forall(f in Facilities_springgrowth2,h in HarvestWeights, p in SpringGrowth2,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
        create(s2(f,h,p,o1, o2));
forall(f in Facilities_springgrowth3,h in HarvestWeights, p in SpringGrowth3,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
        create(s2(f,h,p,o1, o2));

forall(tt in PeriodsStage1,ff in Facilities)
        create(biomass1(tt,ff));
forall(r in Regions,tt in PeriodsStage1)
        create(regionBiomass1(r,tt));
forall(tt in PeriodsStage2,ff in Facilities,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
        create(biomass2(tt,ff,o1, o2));
forall(r in Regions,tt in PeriodsStage2, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
        create(regionBiomass2(r,tt,o1, o2));

!EEV-specific conditions
!=====
if(EEV)then
    epsilon:=0.05;
initializations from DataFile8
    EXPECTEDx1;
    EXPECTEDy1;
end-initializations

!Constraints
!Using the expected solution for emergency harvest
forall(f in Facilities, w in WeightClasses)do
    sum(h in HarvestWeights)x1(f,w,h)>=sum(h in HarvestWeights)EXPECTEDx1(f,w,h)-epsilon;
    sum(h in HarvestWeights)x1(f,w,h)<=sum(h in HarvestWeights)EXPECTEDx1(f,w,h)+epsilon;
end-do

forall(f in Facilities_stage1, s in SmoltTypes,tt in FirstStageRelease)do
    y1(f,s,tt)>=EXPECTEDy1(f,s,tt)-epsilon;

```

```

y1(f,s,tt)<=EXPECTEDy1(f,s,tt)+epsilon;
end-do
end-if

!Constraints
!Constraints

!Planning harvest weight and ensuring that the ingoing balance is conserved
forall(f in Facilities, w in WeightClasses)do
  OpeningBalance(f,w):=sum(h in HarvestWeights)x1(f,w,h)-IB(f,w)<=0;
end-do

!x1+y1-->x2 Transition from first to second stage planning period
forall(f in Facilities_stage1,w in WeightClasses, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  IB2(f,w,o1,o2):=ib2(f,w,o1,o2)=sum(s in SmoltTypes,tau in
FirstStageRelease)(y1(f,s,tau)*SMOLTS0_FIRSTSTAGECOEFF(s,o1,w,tau)*MORTALITIES(o2));
forall(f in Facilities_autumn-Facilities_stage1,w in WeightClasses, o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
  IB2(f,w,o1,o2):=ib2(f,w,o1,o2)=sum(wfrom in WeightClasses, h in
HarvestWeights)x1(f,wfrom,h)*SALMONS0_FIRSTSTAGECOEFF(h,o1,w,wfrom);
forall(f in Facilities_spring-Facilities_stage1,w in WeightClasses, o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
  IB2(f,w,o1,o2):=ib2(f,w,o1,o2)=sum(wfrom in WeightClasses, h in
HarvestWeights)x1(f,wfrom,h)*SALMONS1_FIRSTSTAGECOEFF(h,o1,w,wfrom);

forall(f in Facilities,w in WeightClasses, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  sum(h in HarvestWeights)(x2(f,w,h,o1,o2))-ib2(f,w,o1,o2)<=0;

!BIOMASS CALCULATIONS
!=====
!Calculating first stage biomass
forall(tt in (PeriodsStage1-FirstStageRelease),f in Facilities_stage1|MTB_FACILITY(tt,f)>0)
  Biomass1(tt,f):=biomass1(tt,f)-sum(w in WeightClasses, h in HarvestWeights)
(SALMONS0_FIRSTSTAGE(h,tt,w)*x1(f,w,h))=0;

forall(f in Facilities_stage1,tt in FirstStageRelease)
  Biomass1(tt,f):=biomass1(tt,f)-sum(s in SmoltTypes, tau in FirstStageRelease) SMOLTS0_FIRSTSTAGE(s,tt,tau)*
y1(f,s,tau)*0.85=0

forall(tt in PeriodsStage1,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios, f in (Facilities_autumn-
Facilities_stage1)|MTB_FACILITY(tt,f)>0)
  Biomass1(tt,f):=biomass1(tt,f)-sum(w in WeightClasses, h in HarvestWeights)
SALMONS0_FIRSTSTAGE(h,tt,w)*x1(f,w,h)=0;

forall(tt in PeriodsStage1,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios, f in (Facilities_spring-
Facilities_stage1)|MTB_FACILITY(tt,f)>0)
  Biomass1(tt,f):=biomass1(tt,f)-sum(w in WeightClasses, h in HarvestWeights)
SALMONS1_FIRSTSTAGE(h,tt,w)*x1(f,w,h)=0;

!Calculating second stage biomass
forall(tt in (SalmonGrowthStage2-SpringGrowth1), f in Facilities_springgrowth1,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios|MTB_FACILITY(tt,f)>0)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)-sum(w in WeightClasses,h in
HarvestWeights)SALMONS1_SECONDDSTAGE(h,tt,w)*x2(f,w,h,o1, o2)=0;

forall(tt in (SalmonGrowthStage2-SpringGrowth2), f in Facilities_springgrowth2,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios|MTB_FACILITY(tt,f)>0)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)-sum(w in WeightClasses,h in
HarvestWeights)SALMONS1_SECONDDSTAGE(h,tt,w)*x2(f,w,h,o1, o2)=0

forall(tt in (SalmonGrowthStage2-AutumnGrowth1), f in Facilities_autumngrowth1,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios|MTB_FACILITY(tt,f)>0)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)-sum(w in WeightClasses,h in
HarvestWeights)SALMONS0_SECONDDSTAGE(h,tt,w)*x2(f,w,h,o1, o2)=0;

forall(tt in (SalmonGrowthStage2-AutumnGrowth2), f in Facilities_autumngrowth2,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios|MTB_FACILITY(tt,f)>0)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)-sum(w in WeightClasses,h in
HarvestWeights)SALMONS0_SECONDDSTAGE(h,tt,w)*x2(f,w,h,o1, o2)=0;!

!SpringRelease1 -Calculating biomass for salmon released in the first spring release in the second stage planning
period
forall(tt in SpringGrowth1,f in Facilities_springgrowth1,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)-sum(tau in SpringRelease1,h in HarvestWeights,s in
SmoltTypes)(SMOLTS1_SECONDDSTAGE1(h,s,tt,tau)*SURVIVALRATESECONDDSTAGE* y2(f,s,h,tau,o1, o2))=0;

!SpringRelease2 -Calculating biomass2 for salmon released in the second spring release in the second stage planning
period
forall(tt in SpringGrowth2,f in Facilities_springgrowth2,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)-sum(tau in SpringRelease2,h in HarvestWeights,s in
SmoltTypes)(SMOLTS1_SECONDDSTAGE2(h,s,tt,tau)*SURVIVALRATESECONDDSTAGE* y2(f,s,h,tau,o1, o2))=0;

!SpringRelease3 -Calculating biomass2 for salmon released in the third spring release in the second stage planning
period

```

```

forall(tt in SpringGrowth3,f in Facilities_springgrowth3,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)-sum(tau in SpringRelease3,h in HarvestWeights,s in
SmoltTypes) (SMOLTS1_SECONDSTAGE3(h,s,tt,tau)*SURVIVALRATESECONDSTAGE* y2(f,s,h,tau,o1, o2))=0;

!AutumnRelease1 -Calculating biomass2 for salmon released in the first autumn release in the second stage planning
period
forall(tt in AutumnGrowth1,f in Facilities_autumngrowth1,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)-sum(tau in AutumnRelease1,h in HarvestWeights,s in
SmoltTypes) (SMOLTS0_SECONDSTAGE1(h,s,tt,tau)*SURVIVALRATESECONDSTAGE* y2(f,s,h,tau,o1, o2))=0;

!AutumnRelease2 -Calculating biomass2 for salmon released in the second autumn release in the second stage
planning period
forall(tt in AutumnGrowth2,f in Facilities_autumngrowth2,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)-sum(tau in AutumnRelease2,h in HarvestWeights,s in
SmoltTypes) (SMOLTS0_SECONDSTAGE2(h,s,tt,tau)*SURVIVALRATESECONDSTAGE* y2(f,s,h,tau,o1, o2))=0;

!AutumnRelease3 -Calculating biomass2 for salmon released in the third autumn release in the second stage planning
period
forall(tt in (AutumnGrowth3),f in Facilities_autumngrowth3,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)-sum(tau in AutumnRelease3,h in HarvestWeights,s in
SmoltTypes) (SMOLTS0_SECONDSTAGE3(h,s,tt,tau)*SURVIVALRATESECONDSTAGE* y2(f,s,h,tau,o1, o2))=0;

!END-OF-HORIZON CONSIDERATIONS -the biomass is set so the biomass from an input file
forall(tt in 77..82,f in Facilities_springgrowth2, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2((tt),f,o1, o2)=OB(f,tt);

forall(tt in 83..93, f in Facilities_springgrowth2, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)=OB(f,tt);

forall(tt in 82..93, f in Facilities_autumngrowth2, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)=OB(f,tt);

forall(tt in 90..93, f in Facilities_springgrowth3, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  Biomass2(tt,f,o1, o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)=OB(f,tt);

!HARVESTING CALCULATIONS
!=====

!Harvesting in the first stage planning period
forall(tt in PeriodsStage1,f in Facilities_autumn,h in HarvestWeights)do
  Z1(f,h,tt):=z1(f,h,tt)-sum(w in WeightClasses) (SALMONS0_FIRSTSTAGEHARVEST(h,tt,w)*x1(f,w,h))=0;
end-do
forall(tt in PeriodsStage1,f in Facilities_spring,h in HarvestWeights)do
  Z1(f,h,tt):=z1(f,h,tt)-sum(w in WeightClasses) (SALMONS1_FIRSTSTAGEHARVEST(h,tt,w)*x1(f,w,h))=0;
end-do

!Harvesting salmon already present at the start of the second stage planning period
forall(tt in SalmonGrowthStage2,f in Facilities_autumn,h in HarvestWeights, o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
  Z2(f,h,tt,o1, o2):=z2(f,h,tt,o1, o2)-sum(w in WeightClasses) (SALMONS0_SECONDSTAGEHARVEST(h,tt,w)*x2(f,w,h,o1,
o2))=0;
forall(tt in SalmonGrowthStage2,f in Facilities_spring,h in HarvestWeights, o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
  Z2(f,h,tt,o1, o2):=z2(f,h,tt,o1, o2)-sum(w in WeightClasses) (SALMONS1_SECONDSTAGEHARVEST(h,tt,w)*x2(f,w,h,o1,
o2))=0;
forall(tt in SalmonGrowthStage2,f in Facilities_autumn,h in HarvestWeights, o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
  Z2_Y(f,h,tt,o1, o2):=z2_y(f,h,tt,o1, o2)-sum(w in
WeightClasses) (SALMONS0_SECONDSTAGEHARVEST(h,tt,w)*x2_y(f,w,h,o1, o2))=0;
forall(tt in SalmonGrowthStage2,f in Facilities_spring,h in HarvestWeights, o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
  Z2_Y(f,h,tt,o1, o2):=z2_y(f,h,tt,o1, o2)-sum(w in
WeightClasses) (SALMONS1_SECONDSTAGEHARVEST(h,tt,w)*x2_y(f,w,h,o1, o2))=0;

!SpringHarvest1 -harvesting the salmon that was released during the first spring release in the second stage
planning period
forall(tt in SpringGrowth1,f in Facilities_springgrowth1,h in HarvestWeights,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
  S2(f,h,tt,o1, o2):=s2(f,h,tt,o1, o2)=sum(tau in SpringRelease1, s in
SmoltTypes)SURVIVALRATESECONDSTAGE*SMOLTS1_SECONDSTAGE1HARVEST(h,s,tt,tau)* y2(f,s,h,tau,o1, o2);!>=0;

!SpringHarvest2 -harvesting the salmon that was released during the second spring release in the second stage
planning period
forall(tt in SpringGrowth2,f in Facilities_springgrowth2,h in HarvestWeights,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
  S2(f,h,tt,o1, o2):=s2(f,h,tt,o1, o2)=sum(tau in SpringRelease2, s in
SmoltTypes)SURVIVALRATESECONDSTAGE*SMOLTS1_SECONDSTAGE2HARVEST(h,s,tt,tau)* y2(f,s,h,tau,o1, o2);!>=0;

!SpringHarvest3 -harvesting the salmon that was released during the third spring release in the second stage
planning period
forall(tt in SpringGrowth3,f in Facilities_springgrowth3,h in HarvestWeights,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)

```

```

S2(f,h,tt,o1, o2):=s2(f,h,tt,o1, o2)=sum(tau in SpringRelease3, s in
SmoltTypes)SURVIVALRATESECONDDSTAGE*SMOLTS1_SECONDDSTAGE3HARVEST(h,s,tt,tau)* y2(f,s,h,tau,o1, o2);!>=0;

!AutumnHarvest1 -harvesting the salmon that was released during the first autumn release in the second stage
planning period
forall(tt in AutumnGrowth1,f in Facilities_autumngrowth1,h in HarvestWeights,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
  S2(f,h,tt,o1, o2):=s2(f,h,tt,o1, o2)=sum(tau in AutumnRelease1, s in SmoltTypes)SURVIVALRATESECONDDSTAGE*
SMOLTS0_SECONDDSTAGE1HARVEST(h,s,tt,tau)*y2(f,s,h,tau,o1, o2);!>=0;

!AutumnHarvest2 -harvesting the salmon that was released during the second autumn release in the second stage
planning period
forall(tt in AutumnGrowth2,f in Facilities_autumngrowth2,h in HarvestWeights,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)
  S2(f,h,tt,o1, o2):=s2(f,h,tt,o1, o2)=sum(tau in AutumnRelease2, s in
SmoltTypes)SURVIVALRATESECONDDSTAGE*SMOLTS0_SECONDDSTAGE2HARVEST(h,s,tt,tau)* y2(f,s,h,tau,o1, o2);!>=0;

!AutumnHarvest3 -harvesting the salmon that was released during the third autumn release in the second stage
planning period
forall(tt in AutumnGrowth3,f in Facilities_autumngrowth3,h in HarvestWeights,o1 in GrowthScenarios, o2 in
MortalityScenarios)do
  S2(f,h,tt,o1, o2):=s2(f,h,tt,o1, o2)=sum(tau in AutumnRelease3, s in
SmoltTypes)(SURVIVALRATESECONDDSTAGE*SMOLTS0_SECONDDSTAGE3HARVEST(h,s,tt,tau)* y2(f,s,h,tau,o1, o2));!>=0;
end-do

!Calculation of region biomass
!=====

forall(tt in PeriodsStage1) do
  RegionBiomass1('Trondelag',tt):=regionBiomass1('Trondelag',tt)=sum(f in Facilities_trond)biomass1(tt,f);
  RegionBiomass1('More',tt):=regionBiomass1('More',tt)=sum(f in Facilities_more)biomass1(tt,f);
end-do
forall(tt in PeriodsStage2, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios) do
  RegionBiomass2('Trondelag',tt,o1, o2):=regionBiomass2('Trondelag',tt,o1, o2)=sum(f in
Facilities_trond)biomass2(tt,f,o1, o2);
  RegionBiomass2('More',tt,o1, o2):=regionBiomass2('More',tt,o1, o2)=sum(f in Facilities_more)biomass2(tt,f,o1,
o2);
end-do

!MTB restrictions
!=====

forall(tt in PeriodsStage1, f in Facilities)
  Biomass_MTB1(tt,f):=biomass1(tt,f)<=MTB_FACILITY(tt,f)*1000+m1(f,tt);

forall(r in Regions,tt in PeriodsStage1)
  RegionBiomass_MTB1(r,tt):=regionBiomass1(r,tt)<=MTB_REGION(r)*1000+m_reg1(r,tt);

forall(tt in PeriodsStage2, f in Facilities, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  Biomass_MTB2(tt,f,o1,o2):=biomass2(tt,f,o1, o2)<=MTB_FACILITY(tt,f)*1000+m2(f,tt,o1,o2);

forall(r in Regions,tt in PeriodsStage2,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  RegionBiomass_MTB2(r,tt,o1, o2):=regionBiomass2(r,tt,o1, o2)<=MTB_REGION(r)*1000+m_reg2(r,tt,o1,o2);

!Maximum harvest restrictions
!=====

forall(tt in 1..14)
  MaxHarvest1(tt):=sum(tau in tt..tt+1)(sum(f in Facilities,h in HarvestWeights)z1(f,h,tau)-
m_harvest1(tt))<=(980*2);

forall(o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  MaxHarvest1(15):=sum(f in Facilities,h in HarvestWeights)(z1(f,h,15)+z2(f,h,16,o1,o2)+z2(f,h,17,o1,o2))-
m_harvest1(15)<=(980*2);

forall(tt in PeriodsStage2TwoWeeks,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  MaxHarvest2(tt,o1,o2):=sum(tau in tt..tt+1)(sum(f in Facilities,h in
HarvestWeights)(s2(f,h,tau,o1,o2)+z2(f,h,tau,o1,o2))-m_harvest2(tt,o1,o2))<=1960;
forall(tt in PeriodsStage2FourWeeks,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  MaxHarvest2(tt,o1,o2):=(sum(f in Facilities,h in HarvestWeights)(s2(f,h,tt,o1,o2)+z2(f,h,tt,o1,o2))-
m_harvest2(tt,o1,o2))<=(980*2);

!Minimum harvest restrictions
!=====
forall(tt in 40..53,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  MinHarvest2(tt,o1,o2):=sum(f in Facilities,h in HarvestWeights,tau in
tt..tt+3)(z2(f,h,tau,o1,o2)+s2(f,h,tau,o1,o2))>=0;
forall(tt in 56..90,o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
  MinHarvest2(tt,o1,o2):=sum(f in Facilities,h in HarvestWeights,tau in
tt..tt+1)(z2(f,h,tau,o1,o2)+s2(f,h,tau,o1,o2))>=0;

```



```

!Maximum smolt release restrictions
!=====

!Maximum smolt release per period
forall(s in SmoltTypes, tt in FirstStageRelease)
    SmoltReleaseMax1(tt,s) := sum(f in Facilities_stagel) y1(f,s,tt) <= SMOLTRELEASEMAX_FIRSTSTAGE(tt,s);

forall(s in SmoltTypes, tt in AutumnRelease1, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
    SmoltReleaseMax2(tt,s,o1,o2) := sum(f in Facilities_autumngrowth1, h in
HarvestWeights) y2(f,s,h,tt,o1,o2) <= SMOLTRELEASEMAX_AUTUMN1(tt,s);
forall(s in SmoltTypes, tt in AutumnRelease2, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
    SmoltReleaseMax2(tt,s,o1,o2) := sum(f in Facilities_autumngrowth2, h in
HarvestWeights) y2(f,s,h,tt,o1,o2) <= SMOLTRELEASEMAX_AUTUMN2(tt,s);
forall(s in SmoltTypes, tt in AutumnRelease3, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
    SmoltReleaseMax2(tt,s,o1,o2) := sum(f in Facilities_autumngrowth3, h in
HarvestWeights) y2(f,s,h,tt,o1,o2) <= SMOLTRELEASEMAX_AUTUMN3(tt,s);
forall(s in SmoltTypes, tt in SpringRelease1, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
    SmoltReleaseMax2(tt,s,o1,o2) := sum(f in Facilities_springgrowth1, h in
HarvestWeights) y2(f,s,h,tt,o1,o2) <= SMOLTRELEASEMAX_SPRING1(tt,s);
forall(s in SmoltTypes, tt in SpringRelease2, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
    SmoltReleaseMax2(tt,s,o1,o2) := sum(f in Facilities_springgrowth2, h in
HarvestWeights) y2(f,s,h,tt,o1,o2) <= SMOLTRELEASEMAX_SPRING2(tt,s);
forall(s in SmoltTypes, tt in SpringRelease3, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios)
    SmoltReleaseMax2(tt,s,o1,o2) := sum(f in Facilities_springgrowth3, h in
HarvestWeights) y2(f,s,h,tt,o1,o2) <= SMOLTRELEASEMAX_SPRING3(tt,s);

!Maximum smolt release per season
forall(s in SmoltTypes)
    SmoltReleaseMaxTotalFirstStage(s) := sum(f in Facilities_stagel, tt in
FirstStageRelease) y1(f,s,tt) <= SMOLTRELEASEMAX_AUTUMNTOTAL(s);
forall(s in SmoltTypes, o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios) do
    SmoltReleaseMaxTotalAutumn1(s,o1,o2) := sum(f in Facilities_autumngrowth1, h in HarvestWeights, tt in
AutumnRelease1) y2(f,s,h,tt,o1,o2) <= SMOLTRELEASEMAX_AUTUMNTOTAL(s);
    SmoltReleaseMaxTotalAutumn2(s,o1,o2) := sum(f in Facilities_autumngrowth2, h in HarvestWeights, tt in
AutumnRelease2) y2(f,s,h,tt,o1,o2) <= SMOLTRELEASEMAX_AUTUMNTOTAL(s);
    SmoltReleaseMaxTotalAutumn3(s,o1,o2) := sum(f in Facilities_autumngrowth3, h in HarvestWeights, tt in
AutumnRelease3) y2(f,s,h,tt,o1,o2) <= SMOLTRELEASEMAX_AUTUMNTOTAL(s);
    SmoltReleaseMaxTotalSpring1(s,o1,o2) := sum(f in Facilities_springgrowth1, h in HarvestWeights, tt in
SpringRelease1) y2(f,s,h,tt,o1,o2) <= SMOLTRELEASEMAX_SPRINGTOTAL(s);
    SmoltReleaseMaxTotalSpring2(s,o1,o2) := sum(f in Facilities_springgrowth2, h in HarvestWeights, tt in
SpringRelease2) y2(f,s,h,tt,o1,o2) <= SMOLTRELEASEMAX_SPRINGTOTAL(s);
    SmoltReleaseMaxTotalSpring3(s,o1,o2) := sum(f in Facilities_springgrowth3, h in HarvestWeights, tt in
SpringRelease3) y2(f,s,h,tt,o1,o2) <= SMOLTRELEASEMAX_SPRINGTOTAL(s);
end-do

!#####
!OBJECTIVE FUNCTION - total value
!#####
Objective :=
sum(f in Facilities_autumn, tt in PeriodsStagel, h in HarvestWeights, w in
WeightClasses) SALMONS0_FIRSTSTAGEPROFIT(h,tt,w) * x1(f,w,h) * HARVESTWEIGHTPPROFIT(h) +
sum(f in Facilities_spring, tt in PeriodsStagel, h in HarvestWeights, w in
WeightClasses) SALMONS1_FIRSTSTAGEPROFIT(h,tt,w) * x1(f,w,h) * HARVESTWEIGHTPPROFIT(h) -
sum(f in Facilities_stagel, s in SmoltTypes, tt in FirstStageRelease) SMOLTCOST(s) * y1(f,s,tt) +
sum(o1 in GrowthScenarios, o2 in MortalityScenarios) SCENARIOPROBABILITIES(o1,o2) * (
sum(f in Facilities_autumn, tt in SalmonGrowthStage2, h in HarvestWeights, w in
WeightClasses) SALMONS0_SECONDSTAGEPROFIT(h,tt,w) * x2(f,w,h,o1, o2) * HARVESTWEIGHTPPROFIT(h) +
sum(f in Facilities_spring, tt in SalmonGrowthStage2, h in HarvestWeights, w in
WeightClasses) SALMONS1_SECONDSTAGEPROFIT(h,tt,w) * x2(f,w,h,o1, o2) * HARVESTWEIGHTPPROFIT(h) +
sum(f in Facilities_autumngrowth1, tt in AutumnGrowth1, h in HarvestWeights, s in SmoltTypes, tau in
AutumnRelease1) SMOLTS0_SECONDSTAGE1PROFIT(h,s,tt,tau) * y2(f,s,h,tau,o1,
o2) * HARVESTWEIGHTPPROFIT(h) * SURVIVALRATESECONDDSTAGE +
sum(f in Facilities_autumngrowth2, tt in AutumnGrowth2, h in HarvestWeights, s in SmoltTypes, tau in
AutumnRelease2) SMOLTS0_SECONDSTAGE2PROFIT(h,s,tt,tau) * y2(f,s,h,tau,o1,
o2) * HARVESTWEIGHTPPROFIT(h) * SURVIVALRATESECONDDSTAGE +
sum(f in Facilities_autumngrowth3, tt in AutumnGrowth3, h in HarvestWeights, s in SmoltTypes, tau in
AutumnRelease3) SMOLTS0_SECONDSTAGE3PROFIT(h,s,tt,tau) * y2(f,s,h,tau,o1,
o2) * HARVESTWEIGHTPPROFIT(h) * SURVIVALRATESECONDDSTAGE +
sum(f in Facilities_springgrowth1, tt in SpringGrowth1, h in HarvestWeights, s in SmoltTypes, tau in
SpringRelease1) SMOLTS1_SECONDSTAGE1PROFIT(h,s,tt,tau) * y2(f,s,h,tau,o1,
o2) * HARVESTWEIGHTPPROFIT(h) * SURVIVALRATESECONDDSTAGE +
sum(f in Facilities_springgrowth2, tt in SpringGrowth2, h in HarvestWeights, s in SmoltTypes, tau in
SpringRelease2) SMOLTS1_SECONDSTAGE2PROFIT(h,s,tt,tau) * y2(f,s,h,tau,o1,
o2) * HARVESTWEIGHTPPROFIT(h) * SURVIVALRATESECONDDSTAGE +
sum(f in Facilities_springgrowth3, tt in SpringGrowth3, h in HarvestWeights, s in SmoltTypes, tau in
SpringRelease3) SMOLTS1_SECONDSTAGE3PROFIT(h,s,tt,tau) * y2(f,s,h,tau,o1,
o2) * HARVESTWEIGHTPPROFIT(h) * SURVIVALRATESECONDDSTAGE -
sum(f in Facilities, s in SmoltTypes, h in HarvestWeights, tt in PeriodsStage2) SMOLTCOST(s) * y2(f,s,h,tt,o1,o2) -
1000000 * sum(f in Facilities, tt in PeriodsStage2) m2(f,tt,o1, o2) -
1000000 * sum(r in Regions, tt in PeriodsStage2) m_reg2(r,tt,o1, o2) -
1000000 * sum(f in Facilities, tt in PeriodsStage2) m_harvest2(tt,o1, o2) -
sum(f in Facilities, w in WeightClasses) (ib2(f,w,o1,o2) - sum(h in
HarvestWeights) x2(f,w,h,o1,o2)) * PENALTY_EMERGENCYHARVEST(w) -
1000000 * sum(f in Facilities, tt in PeriodsStagel) ml(f,tt) -
1000000 * sum(r in Regions, tt in PeriodsStagel) m_reg1(r,tt) -
1000000 * sum(f in Facilities, tt in PeriodsStagel) m_harvest1(tt) -

```

```
sum(f in Facilities, w in WeightClasses) (IB(f,w)-sum(h in HarvestWeights) x1(f,w,h)) *PENALTY_EMERGENCYHARVEST(w);
!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

writeln("Begin running model")
startopttime:=gettime
maximize(Objective)
finishtime:=gettime
writeln('Reading data time: ',startworktime-starttime)
writeln('Reading matrix time: ',startopttime-startworktime)
writeln('Optimization time: ', finishtime-startopttime)
writeln('Total time: ',finishtime-starttime)
writeln('The total objective value is: ',getsol(Objective))

end-model
```