



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2018 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi
Ingemund Jordanger

Flytbasert markedskobling i Norden

Nytteverdi ved tilpasset vannkraftproduksjon

The Nordic flow-based market coupling

Utility value of adapted hydropower production

Jon Rokne Bolkesjø

Industriell Økonomi
Fakultet for realfag og teknologi

Maren Elise Rønneseth

Industriell Økonomi
Fakultet for realfag og teknologi

Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på det femårige studiet Industriell Økonomi. Oppgaven er skrevet våren 2018 ved Norge miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), ved fakultet for realfag og teknologi. Vi setter stor pris på mange minneverdige og innholdsrike studer, med gode venner og utmerkede forelesere, i løpet av tiden som studenter på Ås.

Vi ønsker først og fremst å takke hverandre for et aldeles utmerket samarbeid. Videre ønsker vi å takke vår hovedveileder, ved NMBU, ved fakultet for realfag og teknologi, Ingemund Jordanger, for gode råd og diskusjoner. Dernest ønsker vi å takke Statnett for at vi har fått mulighet til å bruke Samkjøringsmodellen i vårt arbeid. Spesielt rettes det en takk til Ivar Døskeland, ansatt i Statnett, som entusiastisk har veiledet oss i bruk av denne modellen. Det rettes også en takk til Fredrik Kuhn og Nils Ræder, ansatte i Hydro Energi, for gode samtaler angående flytbasert markedskobling i Norden.

I tillegg ønsker vi å takke familie og venner for god støtte i både oppturer og nedturer.

Ås, mai 2018

Jon Rokne Bolkesjø

Maren Elise Rønneseth

Sammendrag

Et kraftsystem består i hovedsak av produksjon i kraftverk, overføring av kraft via kraftnettet og forbruk. Det nordiske kraftsystemet har i dag tolv budområder. Hensikten med budområder er å håndtere begrensende overføringskapasitet i nettet, ved å gi kraften en verdi der den befinner seg. Kraftbørsene i Europa samarbeider om en felles markedsalgoritme, Euphemia, som klarer markedet i hvert delområde.

En viktig inputparameter til Euphemia er tilgjengelig overføringskapasiteten mellom budområder. I dagens system bestemmes dette på forhånd av systemansvarlig for kraftnettet. På den måten kobles det fysiske kraftnettet sammen med selve markedet. Dette kalles en markedskobling. For å kunne fastsette tilgjengelig overføringskapasitet, må systemansvarlig på forhånd anta hvor produksjon og forbruk vil finne sted. Det legges til en sikkerhetsmargin, for å redusere risikoen for overbelastninger. Dette begrenser handelen, eller overføringskapasiteten tilgjengelig for markedet.

Flytbasert markedskobling, som er planlagt innført i det nordiske kraftmarkedet i 2021, vil kunne øke overføringskapasiteten tilgjengelig for markedet, og på den måten utnytte kraftnettet bedre. Dette gjøres ved å inkludere en forenklet beskrivelse av det fysiske kraftnettet i selve markedsalgoritmen. Markedsalgoritmen vil dermed ta hensyn til overføringsbegrensningene når prisen skal settes, heller enn at dette må bestemmes på forhånd av systemansvarlig. Dermed reduseres usikkerheten knyttet til hvor forbruk og produksjon vil finne sted, slik at mer overføringskapasitet er tilgjengelig for markedet.

Denne oppgaven undersøker norske og svenske vannkraftprodusentenes nytteverdi ved å tilpasse vannkraftproduksjonen til en flytbasert markedskobling. Nytteverdien defineres som endringen i produsentoverskuddet til vannkraftprodusentene ved tilpasning.

Den hydro-termiske optimeringsmodellen, Samkjøringsmodellen, benyttes for å besvare problemstillingen. Modellen er utviklet av SINTEF, og benyttes av markedsaktører som Statnett og Hydro Energi for å simulere det nordiske kraftsystemet. Modellen er todelt. I den første delen beregnes vannkraftprodusentenes strategi i en vannverdiberegning. En vannverdiberegning beregner verdien av vannet som er lagret i magasinet. Verdien av vann vil være avhengig av tid på året, og mengden vann i magasinet. I andre del simuleres effekten av denne strategien i en markedsmodell.

En kjent svakhet ved Samkjøringsmodellen er dens sensitivitet for tre kalibreringsfaktorer. Ettersom vannverdiberegningen foregår separat for hvert delområde, må modellen tilføres informasjon om systemet som helhet via brukerdefinerte kalibreringsverdier. Tilbakekoblingsfaktoren bestemmer hvor mye fastkraft som etterspørres i delområdet. Formfaktoren bestemmer hvordan etterspørselen etter fastkraft fordeler seg over året. Elastisitetsfaktoren bestemmer etterspørselselastisiteten for prisavhengige kontrakter.

Produsentene tilpasser sin produksjon ved å endre sin strategi. Dagens og fremtidens markedskobling kan representeres i Samkjøringsmodellen, ved henholdsvis nettmodellene Samlast og Samnett. Nettmodellene inkluderes i Samkjøringsmodellens vannverdiberegning. Slik beregnes effekten av at vannkraftprodusentene enten tilpasser seg, eller ikke tilpasser seg den nye markedskoblingen.

Resultatene fra Samkjøringsmodellen benyttes i kombinasjon med Monte Carlo-simulering, for å estimere vannkraftprodusentenes nytteverdi. Dermed kan usikkerheten i den estimerte nytteverdien kvantifiseres. I tillegg gjennomføres en sensitivitetsanalyse for å undersøke hvor sensitiv den estimerte nytteverdien er for endringer i underliggende parametere.

Oppgaven estimerer en positiv nytteverdi på 1,7 M€/år samlet sett for norske og svenske vannkraftprodusenter, når de tilpasser vannkraftproduksjonen til den flytbaserte markedskoblingen. Nytteverdiens 80 % konfidensintervall går fra -0,5 M€/år til 3,6M€/år, mens det er 84 % sannsynlighet for at nytteverdien er større enn null. Produsentene får mer kontroll over egen produksjon, noe som vurderes som hovedårsaken til den positive nytteverdien. I tillegg får produsentene en noe høyere kraftproduksjon.

Sensitivitetsanalysen konkluderer med at den estimerte nytteverdien er:

- lite sensitiv for utbygging av flere mellomlandsforbindelser, og for justering av elastisitetsfaktoren og formfaktoren.
- svært sensitiv for økt installert vindkraftkapasitet, endring i forbruk og justering av tilbakekoblingsfaktoren.

Abstract

A power system mainly consists of power plants, transmission lines and consumption. To handle limited transmission capacity in the power grid, the Nordic power system is split into twelve bidding areas. This gives a value to the power at the place where it is generated. The European power exchanges use a common market algorithm, Euphemia, to clear the power market.

An essential input parameter to Euphemia is the available transmission capacity between bidding areas. Today, the transmission system operator (TSO) determines the capacity before the market clearing takes place. In that way, the physical power grid is coupled with the market. This is called a market coupling. To be able to determine the available transmission capacity, the TSO needs to estimate the location of production and consumption. Since the location is unknown, a security margin is used to reduce the risk of overload in transmission lines. The security margin limits the market's available capacity.

A flow-based market coupling (FBMC) is anticipated to be implemented in the Nordic power market in 2021. It is expected that the new market coupling will raise power grid utilization, providing increased transmission capacity to the market. This is done by introducing a simplified grid model in Euphemia. Euphemia will then consider the restrictions in the physical power grid during the market clearing. Since the location of production and consumption is known, the security margin can be reduced, and more transmission capacity made available to the market.

This thesis examines Norwegian and Swedish hydropower producers' utility value of adapting their production to a flow-based market coupling. Utility value is defined as change in producer surplus.

In this thesis, utility value is examined by employing the EFT's Multi-area Power-market Simulator (EMPS-model) to simulate the Nordic power system. The EMPS-model was developed by SINTEF and commonly utilized by market participants like Statnett and Hydro Energi. The model has two stages. The first stage computes the hydropower producer's strategy in a water value calculation. A water value calculation "sets a value to"/appraise water stored in the reservoir. The water value is dependent on the time of year and the amount of water stored. The second stage is a market model where the effects of the strategies is simulated.

A known weakness of the EMPS-model is its sensitivity for three calibration factors. The water value calculation is done separately for each bidding area. Therefore, the user-defined calibration values are needed to add information about the total system. The feedback factor determines the amount of firm demand in the area. The form factor determines how the firm power demand is distributed across the year. The elasticity factor determines the elasticity of demand.

The hydropower producers adapt by changing their strategy. The present and the future market coupling can be represented in the EMPS-model by the grid models Samlast and Samnett respectively. The grid models are included in the EMPS-model's water value calculation. This makes it possible to simulate the effect of hydropower producers who adapt and those who do not.

The results from the EMPS-model are used in combination with Monte Carlo-simulations to estimate the utility value. Thus, the uncertainty of the utility value can be quantified. A sensitivity analysis is conducted to examine how sensitive the estimated utility value is for variation of four underlying parameters.

The results show an increase of the utility value of 1,7 M€/year in total for Norwegian and Swedish hydro power producers, when they adapt to a flow-based market coupling. The 80 % confidence interval goes from -0,5 M€/year to 3,6 M€/year, while there is an 84 % probability of the utility value to be higher than zero. The hydropower producers gain more control of their production. This is considered to be the main cause of the increase in utility value. In addition, the hydropower producers have a slight increase in production.

The sensitivity analysis concludes that the estimated utility value is:

- slightly sensitive for construction of new interconnectors, and adjustment of the elasticity factor and the form factor.
- very sensitive for increased wind power capacity, change in consumption and adjustment of the feedback factor.

Innholdsfortegnelse

FORORD	II
SAMMENDRAG	IV
ABSTRACT	VI
INNHOLDSFORTEGNELSE	VIII
LISTE OVER FIGURER	XII
LISTE OVER TABELLER	XIV
LISTE OVER FORKORTELSER OG SENTRALE BEGREPER	XVI
1 INNLEDNING	2
2 BAKGRUNN	4
2.1 DET NORDISKE KRAFTSYSTEMET	4
2.2 UTVIKLINGEN I KRAFTSYSTEMET.....	7
3 PROBLEMSTILLING	10
3.1 TIDLIGERE STUDIER	10
3.2 DEFINISJON AV PROBLEMSTILLING	11
3.3 AVGRENSNING.....	12
4 SAMKJØRINGSMODELLEN	14
4.1 STRATEGIDELEN I SAMKJØRINGSMODELLEN	14
4.1.1 <i>Enmagasinmodellen og vannverdimatrisen</i>	15
4.1.2 <i>Det resterende kraftmarkedet</i>	17
4.1.3 <i>Kalibrering</i>	18
4.2 SIMULERINGSDELEN I SAMKJØRINGSMODELLEN	19
4.2.1 <i>Områdeoptimalisering</i>	20
4.2.2 <i>Tappefordeling</i>	20
4.2.3 <i>Lastflytanalyse</i>	21
4.2.4 <i>Parallell- og seriesimulering</i>	22
4.3 BRUKERGRENSESNITT OG RESULTATVARIABLER	22
5 METODE	24
5.1 FORBEREDELSE.....	24

5.1.1	<i>Litteratursøk og informasjonsinnhenting</i>	25
5.1.2	<i>Simulering av det nordiske kraftsystemet</i>	27
5.2	BRUK AV SAMKJØRINGSMODELLEN SOM ANALYSEMETODE	27
5.2.1	<i>Modellgrunnlag</i>	28
5.2.2	<i>Datasett</i>	28
5.3	ØVRIGE ANALYSEMETODER SOM BENYTTES	29
5.3.1	<i>Monte Carlo-simulering og Crystal Ball</i>	29
5.3.2	<i>Sensitivitetsanalyse</i>	30
5.4	VALIDITET OG RELIABILITET	31
6	FREMGANGSMÅTE FOR ANALYSE	34
6.1	BRUKERINNSTILLINGER I SAMKJØRINGSMODELLEN	34
6.2	FREMGANGSMÅTE FOR VURDERING AV BEHOV FOR NYE KALIBRERING	36
6.3	FREMGANGSMÅTE FOR ANALYSE AV BASISSCENARIOET	39
6.3.1	<i>Beregning av produsentoverskudd</i>	39
6.3.2	<i>Estimering av nytteverdi</i>	41
6.3.3	<i>Beregning av forklaringsvariabler</i>	42
6.4	FREMGANGSMÅTE FOR SENSITIVITETSANALYSE	44
7	RESULTATER FRA ANALYSE	50
7.1	RESULTATER FRA VURDERING AV BEHOV FOR NY KALIBRERING	50
7.2	RESULTATER FRA ANALYSE AV BASISSCENARIOET	54
7.3	RESULTATER FRA SENSITIVITETSANALYSE	59
8	DISKUSJON.....	66
8.1	DISKUSJON AV FREMGANGSMÅTE FOR ANALYSE	66
8.2	DISKUSJON AV RESULTATER FRA ANALYSE	68
8.2.1	<i>Diskusjon av resultater for vurdering av behov for ny kalibrering</i>	68
8.2.2	<i>Diskusjon av resultater fra basisscenarioet</i>	70
8.2.3	<i>Diskusjon av resultater fra sensitivitetsanalyse</i>	74
9	VIDERE ARBEID	78
10	KONKLUSJON.....	80
	REFERANSER.....	82
	VEDLEGG.....	88

A.	SAMKJØRINGSMODELLEN	88
A1.	<i>Vannverdimetoden i Samkjøringsmodellen</i>	88
A2.	<i>Kalibreringsfaktorer</i>	90
A3.	<i>Delområder i Samkjøringsmodellen</i>	91
A4.	<i>Tilsig per værår</i>	93
A5.	<i>Brukerinnstillinger for manuell endring av kalibreringsverdier</i>	93
B.	PYTHON-FUNKSJONER BENYTTET I RESULTATBEHANDLING	94
C.	KRAFTSYSTEMET I NORDEN	95
D.	RESULTATER FRA SENSITIVITETSANALYSEN.....	96

Liste over figurer

Figur 2-1: Inndelingen av budområder i det nordiske kraftsystemet (NordREG 2014).	5
Figur 2-2: Eksempel på markedskobling i kraftmarkedet. Inspirert av (Kringstad 2009) og SINTEF Energiforskning (u.å.-a kap. 1).....	6
Figur 4-1: Flytskjema for Samkjøringsmodellen. Inspirert av SINTEF Energiforskning (u.å.-a kap. 5) og Wangensteen (2007 kap. 6).....	15
Figur 4-2: Skjematisk beskrivelse av en vannkraftmodul. Inspirert av SINTEF Energiforskning (u.å.-a kap. 1).	16
Figur 4-3: Eksempel på isopriskurver for en vannverdimatrise (SINTEF Energiforskning u.å.-a kap. 5).....	19
Figur 4-4: Flytskjema over simuleringsdelen i Samkjøringsmodellen (Helseth et al. 2011)...	20
Figur 6-1: Oppsett for Monte Carlo-simulering ved bruk av Crystal Ball.....	41
Figur 7-1: Isopriskurver for delområdet 3 for TAP-, ATC- og FBMC-kjøringen. Prisnivå [€/MWh]: 100 (de tre nederste kurvene), 40 (de tre midtre kurvene) og 10 (de øverste kurvene).	50
Figur 7-2: Isopriskurver for delområdet 4 for TAP-, ATC- og FBMC-kjøringen. Prisnivå [€/MWh]: 100 (de tre nederste kurvene), 40 (de tre midtre kurvene) og 10 (de øverste kurvene).	51
Figur 7-3: Magasinfylling i delområde 5 over 29 værår.	52
Figur 7-4: Magasinfylling i delområde 3 over 29 værår.	52
Figur 7-5: Total mengden flom i Norge og Sverige i hvert værår for TAP-, ATC- og FBMC-kjøringen.	53
Figur 7-6: Endring i årlig gjennomsnittlig flom mellom TAP-kjøringen og ATC/FBMC-kjøringen, målt i GWh, for delområdene i Norge og Sverige.....	53
Figur 7-7: Oversikt over antall pristopper, prisavsnitt med en pris større enn to ganger gjennomsnittlig pris, for delområdene i Norge og Sverige for TAP-, ATC- og FBMC-kjøringen.	54
Figur 7-8: Kumulativ sannsynlighetsfordeling for den totale nytteverdien fra basisscenarioet.	55
Figur 7-9: Nytteverdien, for hvert delområde, ved å tilpasse vannkraftproduksjonen til en flytbasert markedskobling, med tilhørende 80 % konfidensintervall	57
Figur 7-10: Gjennomsnittlig årsproduksjon i delområdene i Norge og Sverige.	58

Figur 7-11: Nytteverdien, for hvert værår, ved å tilpasse vannkraftproduksjonen til en flytbasert markedskobling.....	58
Figur 7-12: Nytteverdiens sensitivitet for utbygning av mellomlandsforbindelser med tilhørende 80% konfidensintervall.	59
Figur 7-13: Nytteverdiens sensitivitet for endring av vindkraftkapasitet med tilhørende 80% konfidensintervall. OBS: Ikke lik avstand mellom verdiene på x-aksen.....	60
Figur 7-14: Nytteverdiens sensitivitet for endring av forbruk med tilhørende 80% konfidensintervall.	61
Figur 7-15: Følsomhetsdiagram for justering av kalibreringsfaktorene.....	63

Liste over tabeller

Tabell 5-1: Oversikt over hvordan et modellpar er definert og hvordan Samnett og Samlast inkluderes i Samkjøringsmodellen.....	28
Tabell 6-1: Oversikt over valgte brukerinnstillinger i Samkjøringsmodellen.....	35
Tabell 6-2: Oversikt over modellkjøringer som benyttes for å vurdere behovet for ny kalibrering.....	37
Tabell 6-3: Oversikt over kriteriene for gode vannverdier.....	38
Tabell 6-4: Modellkjøringene gjennomført for å analysere basisscenarioet.....	39
Tabell 6-5: Oversikt over antall timer per uke for hvert prisavsnitt og tilhørende vektet verdi.....	43
Tabell 6-6: Underliggende parametere undersøkt i sensitivitetsanalysen og hvordan disse er kvantifisert i Samkjøringsmodellen.....	45
Tabell 6-7: Mellomlandsforbindelser undersøkt i sensitivitetsanalysen.....	46
Tabell 6-8: Modellkjøringer gjennomført for å undersøke sensitiviteten til nytteverdien for utbygging av mellomlandsforbindelser.....	46
Tabell 6-9: Modellkjøringer gjennomført for å undersøke sensitiviteten til nytteverdien for endringer i installert vindkraftkapasitet.....	47
Tabell 6-10: Modellkjøringer gjennomført for å undersøke sensitiviteten til nytteverdien for endringer i forbruk.....	48
Tabell 6-11: Modellkjøringer gjennomført for å undersøke sensitiviteten til nytteverdien for endringer i kalibreringsfaktorer.....	49
Tabell 7-1: Prosentvis endring i flom mellom ATC- og TAP-kjøringen (ATC i tabellen), og mellom FBMC- og TAP-kjøringen (FB i tabellen) for hvert delområde i Norge og Sverige.....	54
Tabell 7-2: Estimert nytteverdi, fra basisscenarioet, ved å tilpasse vannkraftproduksjonen til en flytbasert markedskobling.....	55
Tabell 7-3: Differansen mellom ATC- og FBMC-kjøringen for ulike variabler som påvirker den totale nytteverdien for basisscenarioet.....	56
Tabell 7-4: Utbygging av mellomlandsforbindelser: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null.....	60
Tabell 7-5: Installert vindkraftkapasitet: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null.....	61
Tabell 7-6: Forbruk justert ned: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null.....	62

Tabell 7-7: Forbruk justert opp: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null.	62
Tabell 7-8: Tilbakekoblingsfaktoren: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null og 80 % konfidensintervall.	63
Tabell 7-9: Formfaktoren: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null og 80 % konfidensintervall.	64
Tabell 7-10: Elastisitetsfaktoren: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null og 80 % konfidensintervall.	64

Liste over forkortelser og sentrale begreper

Begrep	Forklaring
ATC	Tilegnelig overføringskapasitet. En Dagens kapasitetsberegning metode. Brukes i denne oppgaven også om ATC-basert markedskobling.
ATC-kjøring	Modellkjøring i Samkjøringsmodellen. Samlast inkluderes i strategidelen og Samnett inkluderes i simuleringsdelen.
Basisscenarioet	I denne oppgaven: Statnett sitt basisdatasett for 2017
Brukerinnstillinger	I denne oppgaven: Alle valg som gjøres når Samkjøringsmodellen skal kjøres.
Budområde	Markedsområde i kraftsystemet med balanse mellom tilbud og etterspørsel og én uniform pris.
CNE	Kritiske nettverkskomponenter. Komponenter som, i en flytbasert markedskobling, begrenser nettet i vesentlig grad.
Datasett	I denne oppgaven: Verdier i Samkjøringsmodellen som av naturlige årsaker endres over tid.
Delområde	Markedsområde i Samkjøringsmodellen med balanse mellom tilbud og etterspørsel og én uniform pris.
FBMC	Se flytbasert markedskobling.
FBMC-kjøring	Modellkjøring i Samkjøringsmodellen. Samnett inkluderes i strategidelen og Samnett inkluderes i simuleringsdelen.
Flaskehals	Begrensende overføringskapasitet i kraftnettet.
Flom	Vann som strømmer forbi produksjonsklare kraftverk.
Flytbasert markedskobling	Markedskobling med fremtidens kapasitetsberegning metode.
Forklaringsvariabel	Det samme som uavhengig variabel. Benyttes til å forklare sammenhenger med den avhengige variabelen.
Handelsgrense	Maksimal handel av kraft mellom to budområder. Brukes i markedsalgoritmen og fastsettes av TSOene.
Isopriskurve	Viser hvordan magasinfylling varierer over året for en gitt pris.
Kalibrering	Benyttes i Samkjøringsmodellens strategidel for å tilføre informasjon om det totale systemet i vannverdiberegningen.

Tilbakekoblingsfaktor	En kalibreringsfaktor som bestemmer hvor mye fastkraft som etterspørres i delområdet
Formfaktor	En kalibreringsfaktor som bestemmer hvordan etterspørselen etter fastkraft fordeler seg over året.
Elastisitetsfaktor	En kalibreringsfaktor som bestemmer etterspørselastisiteten for prisavhengige kontrakter.
Kapasitetsberegning-metode	Metode for beregning av handlegrensener mellom budområder.
Markedsalgoritme	Klarerer markedet. Setter pris og volum, og handel mellom budområder i en markedskobling.
Markedskobling	Kobler sammen det fysiske kraftnettet og kraftmarkedet.
Modellgrunnlag	I denne oppgaven: Oppsettet til Samkjøringsmodellen som helhet.
Modellpar	Et modellpar består av én ATC-kjøring og én FBMC-kjøring.
Monte Carlo-simulering	Stokastisk beregningsmetode.
Nettmodell	En beskrivelse av det fysiske kraftnettet og dets egenskaper.
Nytteverdi/nytte	Alle effekter av planlagt innsats. I denne oppgaven: Endringen i vannkraftprodusenters produsentoverskudd ved tilpasset produksjon.
PTDF	Sensitivitetsfaktor for effektflytfordeling.
Rasjonering	Definert i Samkjøringsmodellen som utkobling av de prisavhengige kontraktene.
Regulerbar produksjon	Produksjon som stammer fra kontrollert vannføring fra magasin til kraftverk.
Resultatvariabel	Resultater fra Samkjøringsmodellen.
Samkjøringsmodellen	En simuleringsmodell for langtids optimalisering av hydro-termiske kraftsystem.
Samlast	Nettmodell som representerer en ATC-basert markedskobling. Kan inkluderes i Samkjøringsmodellen.
Samnett	Nettmodell som representerer en flytbasert markedskobling. Kan inkluderes i Samkjøringsmodellen.
Samtap	Et delprogram i Samkjøringsmodellen som gjennomfører en tappefordeling.

Sensitivitets-analyse	Analysemetode som benyttes for å undersøke hvor sensitive vurderingsfaktorer er for endring i underleggende parametere.
TAP-kjøring	Modellkjøring i Samkjøringsmodellen. Samtap inkluderes i strategidelen og i simuleringsdelen.
Topologi	Det fysiske kraftnettet og dets egenskaper.
TSO	Systemansvarlig. Ansvarlig for å ivareta driftssikkerheten til kraftsystemet.
Underliggende parameter	Variabler som påvirker vurderingsfaktoren. Benyttes i forbindelse med sensitivitetsanalyse.
Uregulerbar produksjon	Produksjon som ikke kan kontrolleres. Stammer fra uregulerbart tilsig.
Vannverdi-beregning	Beregning av vannverdimatriser.
Vannverdimatrise	Matrise bestående av forventede verdier av vann i et magasin ved ulik fyllingsgrad og tid på året.
Vannverdi-metoden	Metode for optimalisering av vannkraftproduksjon.
Vurderingsfaktor	Variabelen som påvirkes av underliggende parametere. Benyttes i forbindelse med sensitivitetsanalyse.
Værår	Historisk data på tilsig, vind og temperatur med ukeloppløsning.

1 Innledning

Tema for oppgaven er innføringen av flytbasert markedskobling i det nordiske kraftmarkedet. Oppgaven vil undersøke vannkraftprodusentenes nytteverdi ved å tilpasse vannkraftproduksjonen til den flytbaserte markedskoblingen.

Oppgavens oppbygning er som følger. I kapittel 2 gjøres det rede for oppgavens bakgrunn. Her vil leseren gjøres kjent med det nordiske kraftsystemet. I kapittel 3 defineres og avgrenses problemstillingen, samt at tidligere studier om flytbasert markedskobling presenteres. Kapittel 4 er et teorikapittel om Samkjøringsmodellen, modellen som tas i bruk for å simulere det nordiske kraftsystemet. Kapittel 5 beskriver og begrunner metodene som benyttes i oppgaven. Dette innebærer hvordan Samkjøringsmodellen benyttes og hvilke analysemetoder som er relevante. Her vurderes også oppgavens validitet og reliabilitet. I kapittel 6 gjennomgås fremgangsmåten for analysen. Dette innebærer en konkret beskrivelse av hvilke modellkjøringer som gjøres i Samkjøringsmodellen, hvordan nytteverdien estimeres og hvilke forklaringsvariabler som undersøkes. Resultatene fra analysen presenteres i kapittel 7. Kapittel 8 diskuterer gjennomføringen av og resultatene fra analysen. Kapittel 9 redegjør for videre arbeid, mens kapittel 10 inneholder oppgavens konklusjon.

2 Bakgrunn

Formålet med dette kapittelet er å gi leseren en generell innføring i det nordiske kraftsystemet og sentrale utviklingstrekk i tiden fremover.

2.1 Det nordiske kraftsystemet

I 1991 trådte Energiloven av 1990 i kraft. Loven førte til en liberalisering og deregulering av det norske kraftmarkedet. For å øke ressurseffektiviteten, ble de store, vertikalintegreerte kraftselskaper delt opp og konkurranseutsatt. Samme utvikling fant sted i andre nordiske land, noe som åpnet for en integrering av kraftmarkedene (Bye & Hope 2007). Siden 2000 har Norge, Sverige, Finland og Danmark utgjort det integrerte nordiske kraftmarkedet (Nord Pool 2018b).

En tilsvarende liberalisering av kraftsektoren har også foregått ellers i Europa, og EU har arbeidet for å skape et internt elektrisitetmarked. Målet er å øke den sosiale velferden, gjennom økt konkurranse på tvers av landegrenser. For å nå dette målet har EU utviklet en Target Model, som blant annet skal harmonisere lover og reguleringer i medlemslandene (Nord Pool 2018c).

Kraftsystemet består i hovedsak av produksjon i kraftverk, distribusjon via kraftnettet og forbruk. Nettet består av noder, også kalt knutepunkt, og linjer som binder nodene sammen. Elektrisitet kan ikke lagres i stor skala, og det må alltid være balanse mellom produksjon og forbruk (von Meier 2006 s. 40). I et elektrisk sammenkoblet nett vil kraften til enhver tid flyte minste motstands vei. Dette kalles et synkronområde. Med unntak av Jylland er hele det nordiske kraftsystemet del av det samme synkronområdet (Statnett 2012 kap. 2).

Ettersom kraftflyten i synkronområdet ikke kan styres, er det behov for sentrale *systemoperatører*¹ (TSOer) for å ivareta driftssikkerheten til systemet. Begrensende overføringskapasitet i kraftnettet kalles *flaskehals*. For å håndtere langvarige flaskehals i nettet, fastsetter den nasjonale TSOen *budområder* (Forskrift om systemansvaret i kraftsystemet 2002). Figur 2-1 viser inndelingen av budområder i det nordiske kraftsystemet. Kraftbørsene i Europa samarbeider om en felles markedsalgoritme, Euphemia², som klarer markedet i hvert delområde. Dersom det ikke er flaskehals mellom budområder, vil kraftprisen i budområdene være lik (EPEX SPOT et al. 2016).

¹ Statnett i Norge, Svenska Kräftelett i Sverige, Fingrid i Finland, Energinet i Danmark.

² Pan-European Hybrid Electricity Market Integration Algorithm



Figur 2-1: Inndelingen av budområder i det nordiske kraftsystemet (NordREG 2014).

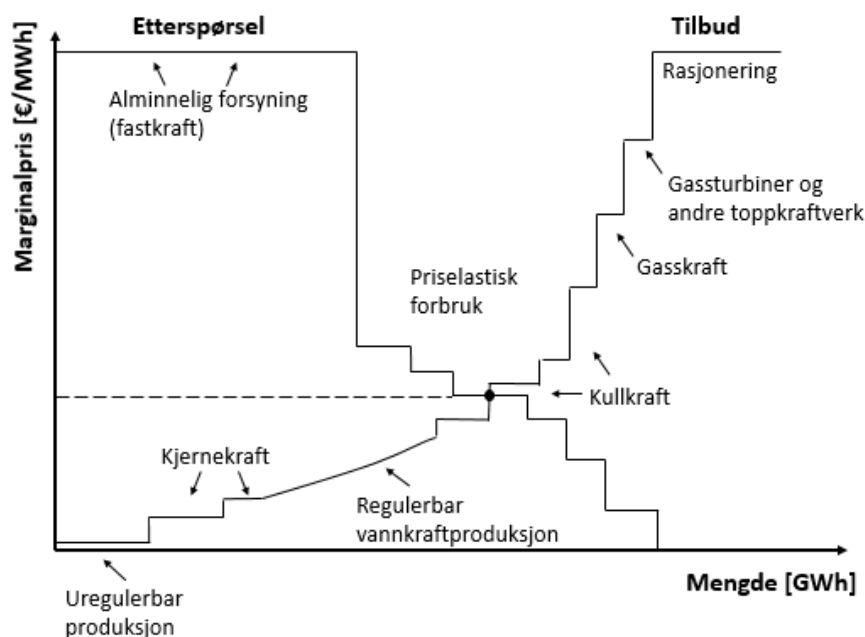
En viktig inputparameter til Euphemia er tilgjengelig overføringskapasitet mellom budområder i kraftnettet. Denne kapasiteten inngår som en *handelsgrense* når markedet klareres. På den måten kobles det fysiske kraftnettet sammen med kraftmarkedet. Dette kalles en *markedskobling* (EPEX SPOT et al. 2016).

I dagens system bestemmes dette på forhånd av den nasjonale TSOen. Metoden som TSOene benytter for å beregne overføringskapasiteten kalles en *kapasitetsberegningmetode*. Dagens kapasitetsberegningmetode i Norden heter ATC. ATC innebærer at TSOen på forhånd antar hvor produksjon og forbruk vil finne sted, slik at kraftflyten i nettet kan analyseres, og overbelastning av kraftlinjer forhindres. Grunnet usikkerhet knyttet til produksjon og forbruk, må en sikkerhetsmargin legges til. Dette begrenser handelen mellom budområder. Kraft flyter alltid minste motstands vei, slik at handelsgrensen ikke kan settes lik summen av fysisk overføringskapasitet mellom to budområder (ENTSO-E 2018). I Norden er det en ATC-basert markedskobling. I denne oppgaven vil den ATC-baserte markedskoblingen forkortes med ATC.

Daglig avholdes kraftbørsene en day-ahead-auksjon for levering av kraft hver time påfølgende dag. Auksjonen gir en uniform pris i hver time for hvert budområde. Denne prisen beregnes av Euphemia og kalles spotprisen. Retten til å overføre kraft fra et budområde til et annet, auksjoneres implisitt bort i day-ahead-auksjonen (Nord Pool 2018a). Mengden kraft som kan

overføres mellom budområder, er på forhånd bestemt av TSOen. Elektrisitet i det nordiske kraftmarkedet handles på kraftbørsen Nord Pool, som formidler bud til markedsalgoritmen (EPEX SPOT et al. 2016). I tillegg beregner Nord Pool en systempris, som er en referansepris for det nordiske kraftmarkedet.

Euphemia forsøker å maksimere den totale samfunnsøkonomiske nytten, definert som summen av flaskehalsinntekter, produsentoverskudd og konsumentoverskudd. Flaskehalsinntekter er netteiers inntekt (evt. kostnad) som følger av prisdifferanser mellom budområder (EPEX SPOT et al. 2016 kap. 6.2). Produsentoverskuddet og konsumentoverskuddet er vist i figur 2-2. Den stiplede linjen markerer kraftprisen ved skjæringspunktet mellom tilbuds- og etterspørselskurven. Arealet mellom etterspørselskurven og den stipla linja utgjør konsumentoverskuddet. Arealet mellom den stipla linja og tilbudskurven utgjør produsentoverskuddet.



Figur 2-2: Eksempel på markedskobling i kraftmarkedet. Inspirert av (Kringstad 2009) og SINTEF Energiforskning (u.å.-a kap. 1).

Etterspørselssiden består av forbrukere med ulik etterspørselsselastisitet, hvor det meste av forbruket er tilnærmet uelastisk. Etterspørselen etter kraft vil variere på kort og lang sikt. En viktig kortsiktig driver på etterspørselssiden er temperatur, ettersom mye kraft brukes til oppvarming. På lang sikt vil etterspørselen avhenge av industriproduksjon og elektrifisering. Tilbudssiden består av kraftprodusenter med ulik marginalkostnad for produksjon av kraft. Produsenten med høyest marginalkostnad, som har fått tilslag i markedet, setter prisen.

Uregulerbar kraftproduksjon fra sol-, vind- og elvekraft vil, i motsetning til termisk kraftproduksjon, som atom-, kull- og gasskraft, ha en marginalkostnad ned mot null ettersom råvaren er gratis og driftskostnadene svært lave (Bye et al. 2010). Uregulerbare produsenter vil derfor ligge først i tilbudskurven. Kraftproduksjonen i Norden domineres av vannkraft. Tilbudet av kraft vil på lang sikt vil variere med samlet tilsig.

For vannkraftprodusenter med lagringskapasitet, vil optimaliseringen av produksjonen baseres på *vannverdimetoden*. Vann som er lagret i magasiner er en begrenset ressurs, og har dermed en alternativkostnad. Kostnaden ved å bruke vannet i dag vil være lik den reduserte inntekten ved å ikke kunne produsere på et senere tidspunkt. Optimal produksjonsstrategi vil være å produsere på tidspunkt som maksimerer den samlede verdien av vannet. Denne verdien av vannet avhenger av faktorer som magasinutfylling, tid på året og forventet tilsig (Førsund 2007). Magasinutfyllingen er mengden vann i magasinet, ofte oppgitt i potensielt produksjonsvolum. Den relative magasinutfyllingen kalles fyllingsgrad. Tilsiget er vann som strømmer til magasinet, eventuelt direkte til kraftverket. Produksjonsstrategien til vannkraftprodusenter representeres i form av en matrise kalt *vannverdimatrisen*. Denne matrisen består av forventede vannverdier ved ulike fyllingsgrad og tid på året. Beregningen av denne matrisen kalles *vannverdiregning* (Førsund et al. 2005).

2.2 Utviklingen i kraftsystemet

Det europeiske og det nordiske kraftsystemet er i stadig utvikling. De siste årene har denne utviklingen ført med seg utfordringer knyttet til sikker drift av kraftsystemet. På etterspørselssiden forventes det at elektrifiseringen vil være større enn effektiviseringen, noe som medfører økt forbruk (Bøhnsdalen et al. 2016 s. 14). Økende andel kraftproduksjon fra ikke-regulerbare energikilder som vind og sol, har medført økende usikkerhet knyttet til leveringsmengde og leveringstid for kraft (Bøhnsdalen et al. 2016 s. 6). Samtidig kobles Norge tettere til utlandet gjennom nye mellomlandsforbindelser til England og Tyskland (Statnett 2017a).

På Norges Energikonferanse (2017) var dette sentrale temaer. Her ble tre virkemidler for å håndtere denne utviklingen presentert. Det første virkemiddelet, for å kunne dekke økende etterspørsel og opprettholde driftssikkerhet i perioder med mye fornybarproduksjon, er *nettutbygging*. Utbygging av nett er ressurskrevende for samfunnet. Det andre virkemiddelet er

forbrukerfleksibilitet. AMS-målere³ blir installert i store dele av Norden (NVE 2015) og det forventes at forbrukernes nettleie vil baseres på effekttariffer⁴ (Energi Norge 2017). Hensikten er å gi forbrukere et insentiv til å redusere eller flytte forbruket til fordel for kraftsystemet. Det tredje er energilagring. I fremtiden forventes en sterk utvikling innen *batteriteknologi*. Dermed kan strøm lagres i perioder med mye produksjon, for så å tilbys til markedet i anstrengte situasjoner. I tillegg er det ønskelig å utnytte det eksisterende nettet bedre ved at ATC erstattes med en *flytbasert markedskobling* (FBMC).

I dagens system, ATC, bestemmes handelsgrensene før markedskoblingen. For å kunne sette riktige handelsgrenser, må TSO på forhånd anta hvor produksjon og forbruk av kraft vil finne sted, slik at kraftflyten i kraftnettet kan evalueres. Handelsgrensene må settes slik at overlast unngås. Dette er vanskelig. Derfor er det nødvendig med en betydelig sikkerhetsmargin når handelsgrensene fastsettes (ENTSO-E 2018). I fremtidens system, FBMC, vil handelsgrensene fastsettes som en del av markedskoblingen. Dette gjøres ved at den fysiske kraftflyten i kraftnettet hensyntas av markedsalgoritmen direkte, heller enn av TSOen på forhånd. Dermed vil handelsgrensene mellom budområder, i mesteparten av tiden, være større med FBMC enn med ATC, da det ikke lenger er nødvendig med en like høy sikkerhetsmargin. Målet er å utnytte det eksisterende nettet bedre, slik at behovet for ressurskrevende nettutbygginger reduseres (Statnett et al. 2017b).

Flytbasert markedskobling

De nordiske systemoperatørene forventer å innføre en FBMC i Norden i 2021 (Statnett et al. 2017a). Statnett et al. (2017b kap. 3 og 6) gir en detaljert beskrivelse av en FBMC i Norden. Ved at en FBMC, i motsetning til en ATC, tar hensyn til den faktiske flyten i kraftnettet er hovedforskjellen mellom kapasitetsberegningemetodene hvordan flaskehalsen håndteres. En FBMC tar hensyn til kraftnettets flaskehalsen i selve markedskoblingen, mens ATC tar hensyn til flaskehalsene på forhånd. I en FBMC inkluderes en forenklet *nettmodell* i markedsalgoritmen. En nettmodell er en beskrivelse av det fysiske kraftnettet og dets egenskaper. Dette kalles kraftnettets *topologi*. Dermed hensyntas den fysiske kraftflyten direkte i markedskoblingen, i motsetning til i en ATC hvor handelsgrensen gis som inndataparameter på forhånd. Kirchhoffs lover danner grunnlaget for å definere PTDF⁵-matrisen. Matrisen beskriver hvordan en endring i den fysiske kraftflyten ett sted i systemet påvirker kraftflyten i

³ Automatiske strømmålere som blant annet gir forbrukere oppdatert informasjon om eget forbruk

⁴ Nettleien baseres på effektnivå og ikke total mengde strøm forbrukt

⁵ Sensitivitetsfaktor for effektflytfordeling (Power Transfer Distribution Factors)

systemet som helhet. Det er en slik nettbeskrivelse, i form av PTDF-matrisen, som inkluderes i markedsalgoritmen ved en FBMC.

En node-til-linje PTDF-matrise forteller hvordan injisert effekt i en node vil påvirke kraftflyten i alle andre linjer. Dersom denne matrisen benyttes i markedsalgoritmen, vil det være én kraftpris per node, altså node-prising. I FBMC bestemmes den maksimale fysiske overføringskapasiteten i kraftnettet av kritiske nettverkskomponenter (CNEer). Disse begrenser nettet i vesentlig grad. Ofte vil begrensningene være mellom budområder. For å kunne beregne én pris per budområde, aggregeres node-til-linje PTDF-matrisen til budområde-til-CNE-PTDF-matrise. Denne forteller hvordan nettoposisjonen⁶ til et budområde påvirker kraftflyten på alle andre kritisk nettverkskomponenter. Dette er overgangen fra node-prising til FBMC. Hensikten med innføringen av FBMC er å håndtere flaskehalsmer effektivt, slik at den totale samfunnsøkonomiske nytten øker. Dette gjøres ved at markedsalgoritmen prioriterer produksjon som bidrar til bedre utnyttelse av kraftnettet.

FBMC er mer kompleks enn ATC, noe som kan medføre utfordringer når markedsaktørene skal planlegge sin produksjon (Van den Bergh & Delarue 2016).

⁶ Tilbud av kraft minus etterspørsel etter kraft

3 Problemstilling

Hensikten med dette kapittelet er å gjøre rede for oppgavens problemstilling. Kapittel 3.1 gir leseren innsikt i litteratur som finnes innenfor temaet FBMC i Norden og hvor det eventuelt er manglende kunnskap. Kapittel 3.2 definerer oppgavens problemstilling med utgangspunkt i tidligere studier. Kapittel 3.3 gjør rede for oppgavens avgrensninger.

3.1 Tidligere studier

Flere tidligere studier undersøker innføringen av en flytbasert markedskobling i Norden. De viktigste og mest relevante studiene presenteres i korte trekk her.

Døskeland et al. (2013) og Helseth og Mo (2012) har gjennomført en samfunnsøkonomisk analyse av FBMC og ATC i Norden. I analysen benyttes *Samkjøringsmodellen*, en hydrotermisk optimaliseringsmodell, i kombinasjon med *Samlast* og *Samnett*, to nettmodeller. Samlast og Samnett representerer henholdsvis en ATC og en FBMC. Begge studiene konkluderer med en forventet økning i samfunnsøkonomisk nytte ved innføring av FBMC. Det vurderes at økningen i hovedsak skyldes bedre utnyttelse av kraftsystemet. Resultatene indikerer at den samfunnsøkonomiske nytten ved innføringen av FBMC er størst i tilfeller med betydelig antall flaskehalser i kraftsystemet. Samtidig forventes det mindre variasjon i pris. Disse studiene antar at vannkraftprodusentene ikke endrer sin vannverdiberegning, uavhengig av om det er ATC eller FBMC.

Statnett et al. (2017b) har publisert et høringsdokument med informasjon om innføringen av FBMC i Norden. Studien benytter Euphemia, reelle markedsbud og en forenklet nettmodell til å modellere det nordiske markedet som om FBMC var innført. Dette blir gjort parallelt med dagens markedskobling. Hensikten er å illustrere konsekvensene en ny markedskobling vil få for markedsaktørene. Som svar på høringsdokumentet, kommer det frem at et sentralt spørsmål blant markedsaktørene er hvordan de skal tilpasse seg FBMC.

I tillegg til Statnett et al. (2017b), har flere masteroppgaver undersøkt og beskrevet tekniske løsninger knyttet til innføringen av FBMC (Jegleim 2015; Nordeng 2016; Svarstad 2016). I forbindelse med innføringen av FBMC i Sentral-Vest-Europa i 2015 publiserte Van den Bergh og Delarue (2016) en beskrivelse av implementeringen. Bakgrunnen for studien var markedskoblingens kompleksitet, og manglende forståelse om virkningen av en flytbasert markedskobling blant markedsaktørene.

3.2 Definisjon av problemstilling

Tidligere studier som omhandler innføringen av en FBMC i Norden, beregner den samfunnsøkonomiske nytten og beskriver tekniske løsninger. Dette er godt belyst. Hvordan vannkraftprodusenter skal tilpasse seg FBMC er derimot ikke undersøkt i tidligere litteratur.

Den nordiske kraftproduksjonen er dominert av vannkraft. Lagret vann i magasiner er en begrenset ressurs som må disponeres optimalt på kort og lang sikt (Førsund 2007). Markedsaktørene bør gjennomføre en nytte-kostnadsvurdering når de skal beslutte hvorvidt de skal tilpasse seg FBMC. Både kostnaden og nytten ved tilpasning vil variere for de ulike aktørene. Oppgaven avgrenses til å undersøke nytten vannkraftprodusenter har ved å tilpasse vannkraftproduksjonen til en FBMC. Austeng et al. (2005a s. 117) definerer *nytte* som «alle effekter av planlagt innsats». Nyttens kan være både positiv og negativ, og inkluderer alle virkninger av en beslutning. Innsatsen er de benyttede ressursene, ofte kostnaden, som følger av beslutningen.

Målet med oppgaven er å kvantifisere hvilken nytte vannkraftprodusenter har ved å tilpasse vanddisponeringen optimalt, når det innføres en flytbasert markedskobling i Norden. Resultatene fra oppgaven kan benyttes som en del av nytte-kostnadsvurderingen til produsentene. Følgende problemstilling er utarbeidet:

«Hva er nytteverdien for vannkraftprodusenter ved å tilpasse vannkraftproduksjon til en flytbasert markedskobling?»

Hypotesen er at vannkraftprodusentenes nytteverdi øker dersom de tilpasser produksjonen til en flytbasert markedskobling. For å besvare problemstillingen og teste hypotesen er følgende forskningsspørsmål utarbeidet:

- 1) Hva er endringen i vannkraftprodusenters produsentoverskudd ved å tilpasse vannverdiberegning til en flytbasert markedskobling?
- 2) Hvor sensitiv er endringen i produsentoverskudd for endring i underliggende parametere?

Nytteverdien, målt ved endring i vannkraftprodusentenes produsentoverskudd, beregnes ved å ta i bruk en ny metodikk basert på kjente analyseverktøy. Den hydro-termiske optimaliseringsmodellen, *Samkjøringsmodellen*, benyttes for å simulere det nordiske

kraftsystemet. Nettmodeller som representerer ATC og FBMC vil inkluderes i Samkjøringsmodellens vannverdiberegning. Usikkerheten knyttet til endringen i produsentoverskudd undersøkes ved å benytte *Monte Carlo-simulering*.

For å undersøke hvor sensitiv endringen i produsentoverskudd er for endring i *underliggende parametere*, gjennomføres en *sensitivitetsanalyse*. I denne analysen velges underliggende parametere som er relevante for den fremtidige utviklingen i kraftmarkedet. Valget baseres på at oppgaven skal være virkelighetsnær og relevant for markedsaktørene.

3.3 Avgrensning

Oppgaven avgrenses til å undersøke endringer i nytteverdi for vannkraftprodusenter i Sverige og Norge. Resultater for hele det nordiske kraftmarkedet vil derfor ikke presenteres. Med Norden menes her Sverige, Danmark, Norge og Finland. Dette valget baseres på at Norge og Sverige har langt høyere vannkraftproduksjon enn Danmark og Finland.

Det er ulike faktorer som påvirker kraftprodusentenes inntekter på kort og lang sikt. I en nytte-kostnadsvurdering vil produsentene undersøke langsiktige effekter av å tilpasse vannkraftproduksjonen til en FBMC. Samtidig er Samkjøringsmodellen best egnet til langtidsoptimalisering av hydro-termiske kraftsystem. Derfor avgrenses oppgaven til å undersøke langsiktige effekter av en tilpasning til FBMC.

4 Samkjøringsmodellen

Hensikten med dette kapittelet er å presentere relevant teori om Samkjøringsmodellen. Kapittelet beskriver optimaliseringsmodellen og dens integrasjon med nettmodellene, Samlast og Samnett, som representerer henholdsvis en ATC og en FBMC. I tillegg beskrives brukergrensesnittet til modellen.

Samkjøringsmodellen er utviklet av SINTEF for langtidsoptimalisering av hydrotermiske kraftsystem (SINTEF Energiforskning u.å.-a). Modellen forsøker å etterlikne det nordiske kraftsystemet ved å modellere samspillet mellom kraftsystemets fundamentale elementer, gitt antagelsen om et perfekt fungerende marked (Kringstad 2009).

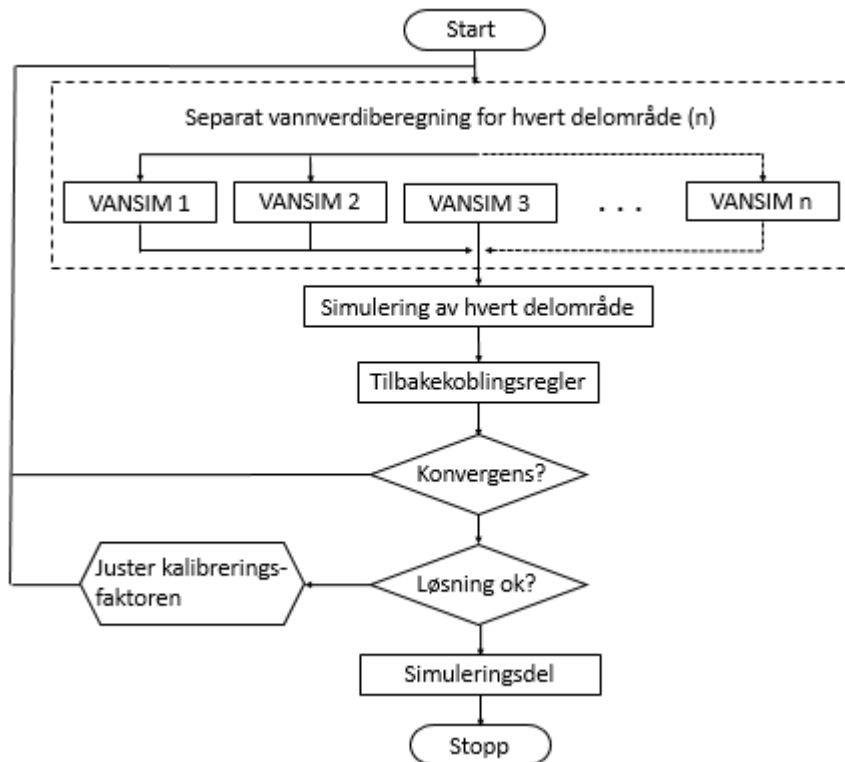
Samkjøringsmodellen forsøker å optimalisere disponeringen av vann i ulike delområder basert på informasjon om tilbud, etterspørsel og utveksling av kraft. Et delområde er tilnærmet likt et budområde. Se kapittel 2.1. Modellen er en kombinasjonsmodell i to deler. I den første delen, strategidelen, forsøker modellen å finne en strategi som maksimerer verdien av vannet over perioden det simuleres for. Til dette benyttes vannverdimetoden. Dette gjøres separat for hvert delområde. I den andre delen, simuleringsdelen, simuleres strategiene fra alle delområder, samlet som et helhetlig system, i en markedsmodell.

4.1 Strategidelen i Samkjøringsmodellen

I strategidelen beregnes vannverdimatrisen i hvert delområde basert på vannverdimetoden, ved å benytte stokastisk dynamisk programmering. Etterspørselssiden i kraftmarkedet avhenger av temperatur, og tilbudssiden avhenger av tilsig og vindhastighet. Som inndata benytter Samkjøringsmodellen historiske data for disse tre variablene. Dette kalles værår. Værårene har ukesoppløsning, og hvert delområde har sin dataserie. Basert på dette finner modellen en sannsynlighetsfordeling som beskriver utfallsrommet til hver av de tre variablene. Dermed kan strategidelen gi et forventningsrett estimat på de stokastiske variablene, som brukes når produksjonsstrategien, representert ved en vannverdimatrise, fastsettes (SINTEF Energiforskning u.å.-a kap. 1). Se kapittel 2.1.

Figur 4-1 gir en skjematisk beskrivelse av hvordan Samkjøringsmodellen er bygget opp, med vekt på strategidelen. Strategidelen utgjør selve vannverdiregningen. Den stiplede boksen viser at vannverdiregning gjøres separat for hvert delområde. Deretter simuleres markedet i delområdet for å fastsette produksjonen i hvert delområde. Vannverdiregningen i

strategidelen er en iterativ prosess hvor et sett med tilbakekoblingsregler benyttes for å justere inndataen. Når modellen har funnet vannverdier som konvergerer, og når alle regler for disponering av vann er oppfylt, gjennomføres en kalibrering hvor inndataen til vannverdberegningen igjen justeres, frem til vannverdiene gir en fornuftig og virkelighetsnær vanddisponering (Wangensteen 2007 kap. 6).

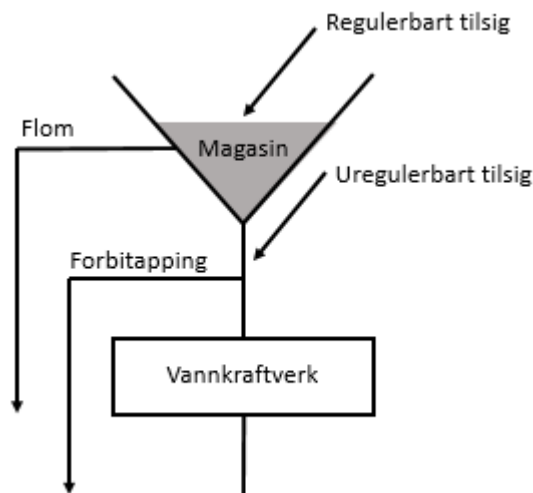


Figur 4-1: Flytskjema for Samkjøringsmodellen. Inspirert av SINTEF Energiforskning (u.å.-a kap. 5) og Wangensteen (2007 kap. 6).

4.1.1 Enmagasinmodellen og vannverdimatrisen

Vannkraftsystemet presenteres ved en modell bestående av *vannkraftmoduler*, som er knyttet sammen av *hydrologiske koblinger*. Vannkraftmodulene gir en detaljert beskrivelse av vannkraftverkene størrelse, restriksjoner og egenskaper, samt tilhørende vassdrag. Se figur 4-2 for skjematisk beskrivelse av en vannkraftmodul. De hydrologiske koblingene inneholder informasjon om hvordan ulike vassdrag er koblet sammen, og hvordan produksjon fra ett kraftverk påvirker tilsiget til andre kraftverk. I teorien kan vannverdien kalkuleres per magasin, men regneprosessen ville blitt for tidkrevende (SINTEF Energiforskning u.å.-a). Derfor

aggregeres vannkraftmodulene sammen til én enmagasinmodell for hvert delområde. Det vil altså være like mange enmagasinmodeller som delområder (Kringstad 2009).



Figur 4-2: Sjematisk beskrivelse av en vannkraftmodul. Inspirert av SINTEF Energiforskning (u.å.-a kap. 1).

Flom er i Samkjøringsmodellen definert som vann som renner forbi produksjonsklare kraftverk. Dette innebærer tapt vann som kunne vært produsert ved større produksjonskapasitet, eller ved lagring til et senere tidspunkt. *Forbitapping* er vann som renner forbi kraftverk, for å ta hensyn til for eksempel minstevannføring. *Regulerbart tilsig* er vann som strømmer inn til magasinet og kan lagres. *Uregulerbart tilsig* derimot, er vann som strømmer direkte ned til vannkraftverket, uten muligheter for lagring. Dette kalles tvungen, eller *uregulerbar produksjon*, og finner sted både i elvekraftverk og i vannkraftverk med magasin. *Regulerbar produksjon* er all produksjon som ikke er uregulerbar. Dermed er den totale produksjonen lik summen av regulerbar og uregulerbar produksjon (SINTEF Energiforskning u.å.-a kap. 6).

Vannverdimatrisen beregnes for alle enmagasinmodeller. En matematisk beskrivelse av hvordan Samkjøringsmodellen beregner vannverdimatrisen ved hjelp av vannverdimetoden, er gitt i vedlegg A1. Matrisen er en funksjon av fyllingsgrad og tid på året. Verdiene i matrisen er forventningsverdien til vannet, og dermed strategien for disponering av vann (SINTEF Energiforskning u.å.-b). Resultatet er en matrise bestående av én vannverdi per uke, for hver andre prosent fyllingsgrad i magasinet (Kringstad 2009).

Vannverdberegningen i strategidelen er en iterativ prosess, hvor resultatene fra forrige simulering benyttes som startverdier i iterasjonen. Startverdiene vil dermed variere mellom kjøring, noe som resulterer i at verdiene i vannverdimatrisen også varierer, selv med identiske

inndata. Likevel gir dette normalt minimale utslag på resultatene. Dersom det sammenliknes simuleringer med relativt liten forskjell kan imidlertid denne støyen i modellen utgjøre en betydelig del av resultatet (Døskeland 2018c).

4.1.2 Det resterende kraftmarkedet

Termiske produksjonsenheter, som atom-, kull- og gasskraftverk, modelleres ved å ta hensyn til marginalkostnaden og produksjonskapasiteten til hver enhet. Uregulerbar vannkraft og vindkraft modelleres som produksjon fra uregulerbart tilsig. Sammen med enmagasinmodellene danner dette tilbudssiden.

Etterspørselen deles i hovedsak i to kategorier; fastkraft og priselastiske kontrakter. Fastkraft er kraft som etterspørres uavhengig av pris (SINTEF Energiforskning u.å.-a kap. 1). Dette tilsvarer alminnelig forsyning fra figur 2-2. Resten av etterspørselskurven i figuren er priselastiske kontrakter, som for eksempel industri. For priselastiske kontrakter defineres en mengde forbruk og en utkoblingspris. Når markedsprisen overstiger utkoblingsprisen, vil forbruket kuttes helt. Tilsammen danner dette etterspørselssiden i kraftmarkedet (Kringstad 2009).

Som nevnt i kapittel 2.1, vil etterspørselen etter kraft variere over tid. I Samkjøringsmodellen deles hver uke inn i ulike prisavsnitt, hvor hvert prisavsnitt består av timer med liknende etterspørsel. Antall prisavsnitt er brukerdefinert. Flere prisavsnitt tar lengere tid å simulere. Tilgjengelig gir dette finere tidsoppløsning. Tilbud og etterspørsel fra ulike enheter aggregeres til en tilbudskurve og en etterspørselskurve med denne tidsoppløsningen. Til sammen utgjør dette kraftmarkedet (Kringstad 2009).

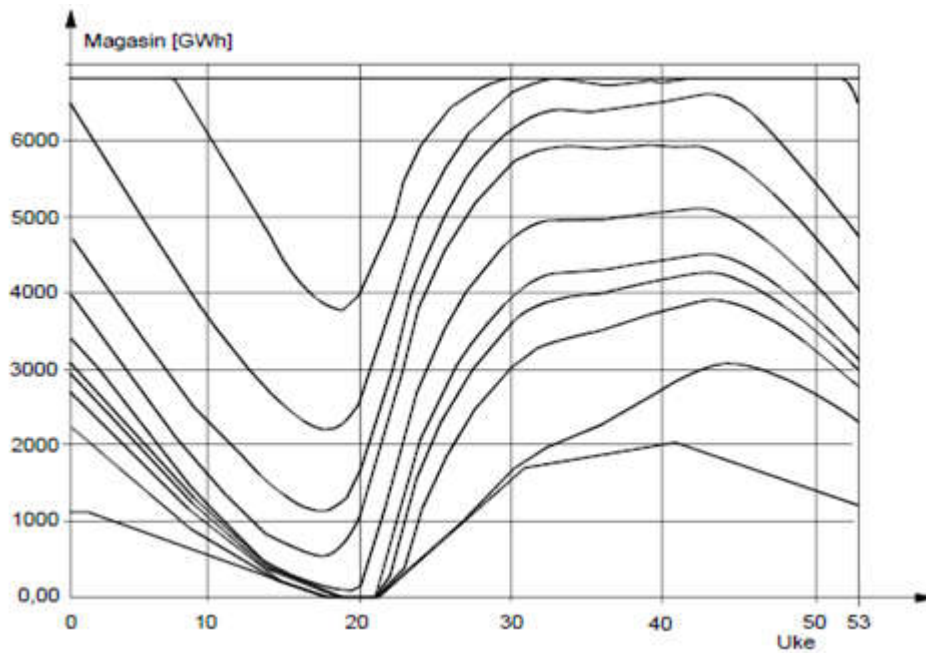
En europeisk kraftsimuleringsmodell, BID3, kan benyttes for å modellere kraftpriser på kontinentet. Disse prisene, i kombinasjon med overføringstap, vil bestemme importbalansen. Ved lavere pris på kontinentet vil det være import. Motsatt vil det ved høyere priser på kontinentet eksporteres kraft. Prisene på kontinentet påvirkes ikke av det nordiske markedet (Døskeland 2018b).

4.1.3 Kalibrering

I virkeligheten vil vannverdimatrisen i hvert delområde avhenge av andre tilknyttede delområder. Ved å justere tre ulike kalibreringsfaktorer, knyttet til fastkraft og prisavhengige kontrakter i hvert delområde, tilføres modellen informasjon om utvekslingsmuligheter med andre delområder. Dette kan enten gjøres automatisk eller manuelt. Kalibreringsprosessen er illustrert i figur 4-1 (SINTEF Energiforskning u.å.-a kap. 5).

De tre kalibreringsfaktorene er tilbakekoblingsfaktoren, formfaktoren og elastisitetsfaktoren. Tilbakekoblingsfaktoren bestemmer hvor mye fastkraft som etterspørres i delområdet. Formfaktoren bestemmer hvordan etterspørselen etter fastkraft fordeler seg over året. Elastisitetsfaktoren bestemmer etterspørselastisiteten for prisavhengige kontrakter. En mer detaljert beskrivelse av de tre kalibreringsfaktorene finnes i vedlegg A2.

For å visualisere konsekvensen av kalibreringsprosessen illustreres vannverdiene fra vannverdimatrisen ved hjelp av *isopriskurver*, som er en funksjon av magasinifylling og årstid. Se figur 4-3. Isopriskurvene viser den korresponderende magasinifylling for en gitt pris og en gitt uke. Hvordan de ulike faktorene burde justeres fanges opp av isopriskurvene. Til eksempel vil gjennomgående høye isopriskurver indikere unaturlig mye flom. Motsatt vil gjennomgående lave isopriskurver indikere rasjonering. Rasjonering er ikke realistisk i det nordiske kraftmarkedet (Wolfgang & Skjelbred 2012).

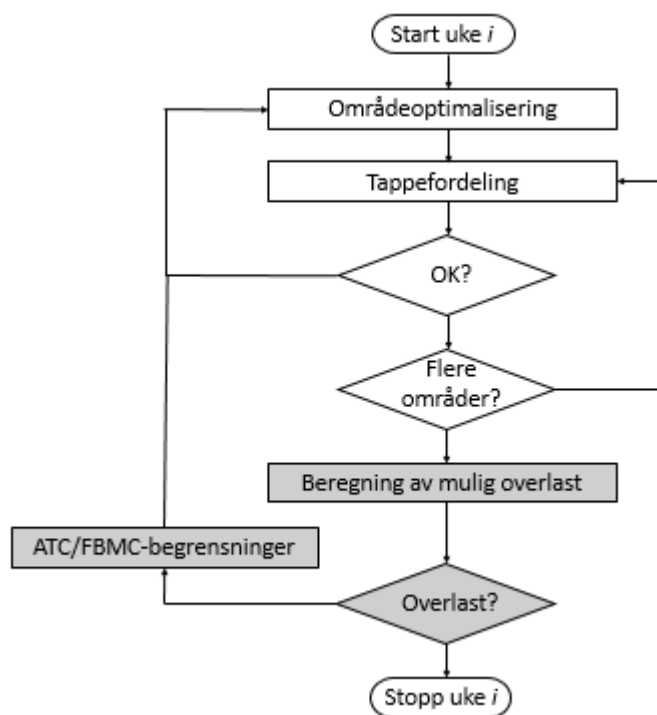


Figur 4-3: Eksempel på isopriskurver for en vannverdimatrise (SINTEF Energiforskning u.å.-a kap. 5).

En god kalibrering vil resultere i en vannverdimatrise som er fornuftig og virkelighetsnær. Ved manuell kalibrering er det brukeren som må vurdere om disponeringen av vann er god. Dette gjør modellen sårbar for dårlig kalibrering. Modellen er kjent for å være sensitiv for valg av kalibreringsverdier (Kringstad 2009). SINTEF Energiforskning (u.å.-a kap. 5) nevner fire tradisjonelle kalibreringskriterier for gode vannverdier: magasinene utnyttes godt, mye rasjonering unngås, mye flom unngås og systematiske pristopper om vinteren unngås.

4.2 Simuleringsdelen i Samkjøringsmodellen

Strategidelen etterfølges av en simuleringsdel. Hensikten med simuleringsdelen er å teste strategiene, vannverdimatrisene, i en markedsmodell. (Wangensteen 2007). Her simuleres systemet som helhet for ulike værår. Vannverdimatrisen fra strategidelen benyttes og holdes konstant under hele simuleringen. Figur 4-4 viser en oversikt over prosessene i simuleringsdelen, som gjennomgås i dette kapittelet. De grå boksene viser prosessene som følger av at Samlast eller Samnett benyttes i kombinasjon med Samkjøringsmodellens simuleringsdel (Helseth et al. 2011).



Figur 4-4: Flytskjema over simuleringsdelen i Samkjøringsmodellen (Helseth et al. 2011).

4.2.1 Områdeoptimalisering

I områdeoptimaliseringen optimaliseres mengden vannkraftproduksjon i hvert delområde, ved å ta hensyn til systemet som helhet. Vannverdimatrisene benyttes for å undersøke systemtilstanden for ulike stokastiske utfall, gitt av været, på ukesbasis. For hvert utfall forsøkes det å finne den optimale produksjonsstrategien. Optimaliseringsproblemet løses deterministisk ettersom tilsiget i hvert værår er gitt. Total produksjon fra andre kraftkilder, forbruk og utveksling av kraft beregnes på delområdenivå, og avhenger av hvilken vannkraftproduksjon som er optimal (Wangensteen 2007).

4.2.2 Tappefordeling

I tappefordelingen avgjøres det hvordan den simulerte produksjonen for hvert delområde skal fordeles på delområdets vannkraftmoduler. Denne fordelingen er regelstyrt, og avhenger av tid på året. Tappefordelingen benyttes for å undersøke om produksjonen i hvert delområde er mulig, når de fysiske egenskapene i hver vannkraftmodul hensyntas. Dersom det er betydelige avvik, gjennomføres justeringer og en ny områdeoptimalisering. Se figur 4-4. Denne iterative

prosessen fortsetter, for ett og ett delområde, frem til resultatet konvergerer for alle delområder. Tappefordelingen gjøres av delprogrammet *Samtap* (Førsund et al. 2005).

Samtap kan i tillegg inkluderes i strategidelen under «Tilbakekoblingsregler». Se figur 4-1. På den måten legges det til et ekstra sett med regler, som sørger for at disponeringen av vannet i magasinene er fysisk mulig (Førsund et al. 2005).

4.2.3 Lastflytanalyse

For å undersøke om vannkraftmodulenes produksjon, beregnet ved å gjøre en tappefordeling med Samtap, er i overenstemmelse med kraftnettets topologi kan enten delprogrammet Samlast eller Samnett inkluderes i simuleringsdelen. Beskrivelsen av Samlast og Samnett baseres i hovedsak på rapporter skrevet av henholdsvis Kringstad (2009) og Helseth et al. (2011). Samlast er basert på ATC. ATC benytter den tilgjengelige overføringskapasiteten mellom budområder som handelsgrenser i markedsalgoritmen. Samnett er basert på FBMC. I denne markedskoblingen inkluderes en nettmodell i selve markedsalgoritmen, for å øke utnyttelse av nettet. Se kapittel 2.2.

Både Samlast og Samnett inneholder en detaljert nettmodell. Nettmodellene undersøker om løsningen fra markedsmodellen overholder de fysiske overføringsbegrensningene i nettet, slik at overlast unngås. Ved overlast legger Samlast og Samnett til handelsgrenser, tilsvarende henholdsvis ATC og FBMC, i områdeoptimaliseringen. Se figur 4-4. Simuleringen gjennomføres på nytt for å finne en ny markedskobling med mindre overlast. Produksjon og forbruk justeres til begrensningene overholdes.

I tillegg til Samtap kan Samnett og Samlast inkluderes i strategidelen under «Tilbakekoblingsregler». Se figur 4-1. På den måten sørger Samkjøringsmodellen for at både disponeringen av vannet i magasinene er fysisk mulig, ved hjelp av Samtap, og at overføringsbegrensningene overholdes, ved hjelp av Samnett eller Samlast (SINTEF Energiforskning u.å.-a kap. 5). Dermed modelleres et kraftsystem hvor vannkraftprodusentene tar hensyn til hvilken kapasitetsberegning metode som benyttes i markedskoblingen. Dette er en metode som verken Statnett eller SINTEF har benyttet tidligere (Døskeland 2018a).

4.2.4 Parallell- og seriesimulering

Simuleringen kan gjennomføres enten i serie eller i parallell. I begge tilfeller fastsettes en startverdi for magasinfyllingen. Parallellsimuleringen vil med utgangspunkt i denne startverdien simulere ulike værår fremover i tid. Magasinfyllingen antas å være lik i starten av hvert værår. Denne typen simulering benyttes normalt dersom det lages prognoser for noen år frem i tid. Ved seriesimulering antas startverdien for magasinfyllingen kjent i det første året. Deretter benyttes magasinfyllingen ved slutten av et værår som startverdier i begynnelsen av det neste året. Denne typen simulering benyttes normalt dersom markedet skal studeres på lengere sikt under ulike forutsetninger (Førsund et al. 2005).

4.3 Brukergrensesnitt og resultatvariabler

Samkjøringsmodellen har vært under kontinuerlig utvikling siden tidlig på 1970-tallet (SINTEF Energiforskning u.å.-a). Modellen kjøres imidlertid fortsatt fra et MS-DOS-vindu med et kommandolinje-grensesnitt. Modellgrunnlaget for hvert delområde er lagret i en egen mappestruktur. For å automatisere modellkjøringene er det vanlig å lage flx-filer, også kalt inndatafiler, som automatisk velger ønskede brukerinnstillinger. For å automatisk starte delprogrammer, navigere mellom ulike modellgrunnlag og forskjellige flx-filer kan bat-filer benyttes. Bat-filer kalles fra DOS-vinduet (Døskeland 2018b).

For effektiv redigering av datasettet i Samkjøringsmodellen har Statnett utviklet et inndataredigeringsprogram, Tempo. Her kan blant annet fastkraft, installert vindkraftkapasitet og mellomlandsforbindelser endres (Døskeland 2018b).

For å hente ut simuleringresultater benyttes ulike resultatbehandlingsprogrammer. Disse har samme brukergrensesnitt som Samkjøringsmodellen. Også her benyttes flx-filer for å effektivisere prosessen. SINTEF Energiforskning (u.å.-a kap. 6) gir en detaljert beskrivelse av hvilke resultatprogrammer som finnes i Samkjøringsmodellen og hvilke resultatvariable det er mulig å hente ut etter endt modellkjøring. Resultatprogrammene og resultatvariablene som er relevante for oppgaven presenteres her. De relevante programmene er KURVETEGN, VVPRINT og AVREGN.

Ved bruk av KURVETEGN kan det hentes ut resultater for variablene listet nedenfor. Resultatene er gitt per prisavsnitt (evt. per uke) for alle historiske værår og per delområde.

- *Kraftverdi (KRV)* [€ cent/kWh]: Verdien av kraft, det samme som spotpris.
- *Magasinfylling (MAG)* [GWh]: Mengden vann, omregnet til energi, lagret i enmagasinmodellen (verdi per uke).
- *Flom + forbitapping (FLOM)* [GWh]: Mengden vann, omregnet til energi, som renner forbi kraftverk som produserer fullt (verdi per uke).
- *Regulerbart tilsig (REG)* [GWh]: Det regulerbare tilsiget, omregnet til energi, som strømmer til magasinet.
- *Uregulerbart tilsig (UREG)* [GWh]: Det uregulerbare tilsiget, omregnet til energi, som strømmer til magasinet/kraftverket.
- *Egenproduksjon (EGPR)* [GWh]: Den totale vannkraftproduksjonen.

Ved bruk av VVPRINT kan det hentes ut resultater fra vannverdideregningen.

- *Vannverdimatrise (VVM)* [€]: Verdien av vannet som funksjon av fyllingsgrad og tid på året. For hvert delområde gir dette en vannverdimatrise med 50 rader, én rad for hver andre prosent fyllingsgrad, og 52 kolonner, én kolonne for hver uke i året.

Ved bruk av AVREGN kan det hentes ut resultater for blant annet rasjonering. Verdiene for rasjonering er gitt for hvert land, beregnet som et gjennomsnitt for alle værårårene.

- *Rasjonering (RAS)* [GWh/år]: Total rasjonering per år.

5 Metode

Hensikten med dette kapittelet er å beskrive og begrunne valg av metoder som benyttes for å besvare problemstillingen. Inspirert av Johannessen et al. (2011) defineres fire faser i forskningsprosessen: forberedelse, datainnsamling, dataanalyse og rapportering. Første fase, *forberedelse*, gjøres rede for i kapittel 5.1. Her beskrives utarbeidelsen av problemstillingen, gjennomføringen av litteratursøk og valg av simuleringsmodell. Andre fase, *datainnsamling*, gjøres rede for i kapittel 5.2. Her beskrives det generelt hvordan Samkjøringsmodellen skal benyttes som analysemetode, gjennom valg av modellgrunnlag og datasett. Tredje fase, *dataanalyse*, gjøres rede for over flere kapitler. I kapittel 5.3 gjengis teori om sensitivitetsanalyse og Monte Carlo-simulering. Den konkrete fremgangsmåten for analysen beskrives i kapittel 6, mens resultatene fra analysen presenteres i kapittel 7. Fjerde fase, *rapportering*, utgjør oppgaven som helhet.

Det skilles ofte mellom kvalitativ og kvantitativ metode. Den kvalitative metoden omhandler innsamling av data i form av tekst, lyd eller bilder, mens den kvantitative metoden omhandler innsamling og registrering av data i form av tall (Johannessen et al. 2011). Basert på den definerte problemstillingen velges en kvantitativ forskningsmetode. Dette valget baseres på at oppgaven har som mål å kvantifisere vannkraftprodusenters nytteverdi ved å tilpasse sin produksjon til en FBMC. Oppgaven har en hypotetisk deduktiv tilnærming, hvor en går fra teori til empiri (Johannessen et al. 2011).

I denne oppgaven benyttes hovedsakelig simulering som forskningsmetode. En simuleringsstudie gir en «... forenklet representasjon av den virkeligheten man ønsker å studere» (Johannessen et al. 2011s. 85). Gjennom simuleringer er det mulig å forutsi et mulig utfall av fremtidige avgjørelser. En fordel med dette valget er at parametere som påvirker resultatet kan justeres, for å undersøke hvor sensitivt resultatet er for endringer i inndata. Ulempen med simuleringer er at metoden kan skape et kunstig bilde av den virkeligheten som ønskes undersøkt (Johannessen et al. 2011).

5.1 Forberedelse

Forberedelsesfasen startet med å fastsette det overordnede tema for oppgaven til kraftsystemet i Norden. Sentral litteratur gjennomgås for å kartlegge ulike utfordringer og problemer i kraftsystemet. For å sikre en virkelighetsnær og aktuell problemstilling kontaktes Hydro Energi.

Temaet avgrenses til å omhandle FBMC i Norden, sett fra et kraftprodusentperspektiv. Statnett er ansvarlige for innføringen av FBMC i Norge og er dermed, sammen med de nordiske TSOene, en av aktørene som kan mest om dette temaet. I tillegg innehar Statnett en rekke velutviklede simuleringsmodeller som de benytter i sitt arbeid som systemansvarlig. Dermed er det hensiktsmessig å starte et samarbeid med Statnett.

Før en konkret problemstilling defineres, hentes det inn informasjon om det valgte temaet. Innhenting av informasjon baseres i hovedsak på litteratursøk, deltagelse på konferanser, og samtaler med informanter i Hydro Energi⁷ og Statnett. Denne typen informasjonsinnhenting danner et generelt teoretisk grunnlag for utarbeidelse av en nyskapende problemstilling med solid forankring hos markedsaktørene. Vannkraftprodusenter i markedet ønsker kunnskap om hvilket behov de har for å tilpasse seg FBMC i Norden. Samtidig har Statnett, med overordnet mål om å maksimere samfunnsøkonomisk nytte, ønske om at markedsaktørene optimaliserer sin drift. Dermed konkretiseres problematikken og en kvantifiserbar problemstilling utarbeides:

«Hva er nytteverdien for vannkraftprodusenter ved å tilpasse vannkraftproduksjon til en flytbasert markedskobling?»

For å operasjonalisere begrepet nytteverdi er det valgt å undersøke endringen i vannkraftprodusentenes produsentoverskudd, dersom de tilpasser produksjonen til en FBMC. Bakgrunnen for dette er at marginalkostnaden til vannkraftprodusentene antas å være lik null. Under en slik antagelse er vannkraftprodusenters produsentoverskudd lik pris ganger volum. Dermed vil differansen i produsentoverskuddet tilsvare vannkraftprodusentenes nytteverdi. Videre i oppgaven vil kun produsentoverskudd og nytteverdi benyttes som begrep.

5.1.1 Litteratursøk og informasjonsinnhenting

For å få en generell oversikt over utviklingen i kraftsystemet gjennomføres litteratursøk med hovedfokus på å finne rapporter fra ulike markedsaktører. Rapportene som benyttes er i hovedsak utarbeidet av Statnett og NVE⁸. I tillegg har deltagelsen på Norges Energidager 2017 og Elsertifikatkonferansen 2018 vært sentral. Dette økte forståelsen for kraftsystemet og gav

⁷ Norsk vannkraftprodusent med en årlig produksjon på om lag 10 TWh (Hydro Energi 2018).

⁸ Norges vassdrags- og energidirektorat

nyttig informasjon om den forventede utviklingen fremover. Slik kan oppgavens fokus på relevante og virkelighetsnære resultater og konklusjoner styrkes.

Temaet for oppgaven er innføringen av en FBMC i Norden. Nordisk RSC⁹, et samarbeid mellom de nordiske TSOene, publiserer fortløpende rapporter og informasjon om dette temaet. Disse rapportene er en sentral del av bakgrunnen for oppgaven. Det gjennomføres også et systematisk litteratursøk. Hensikten med dette er å kartlegge hva som finnes av litteratur, samt å avdekke behov for videre undersøkelser. I tillegg gir denne informasjonen sentral bakgrunnskunnskap for diskusjonen av resultatene. Søkemotorene som benyttes er i hovedsak Google Scholar og Web of Science. Ved søk på «flytbasert markedskobling» og «flytbasert markedsklarering», både på norsk og engelsk, er det få relevante treff. Litteratur som benyttes fra disse søkene omhandler i hovedsak generell teori om FBMC. Litteratursøket gir ikke informasjon om tidligere studier som har undersøkt kraftprodusenters tilpasning til en FBMC.

Som beskrevet i kapittel 4, er Samkjøringsmodellen en velutviklet, men relativt komplisert simuleringsmodell. Forståelsen og beskrivelsen av denne modellen baseres i hovedsak på modellens brukermanualer, og dialog med brukere av modellen. En ulempe er at manualene ikke er offentlig tilgjengelig. Det gjennomføres litteratursøk med mål om å finne andre beskrivelser av modellen. Søkemotorer som benyttes er i hovedsak Google Scholar og BIBSYS Brage. Søkeordet «Samkjøringsmodellen» gir flere relevante treff. En svakhet er at flere av kildene er over 10 år gamle. Samtidig er Samkjøringsmodellen i kontinuerlig utvikling. Det er derfor en risiko for at kildene er utdaterte.

For å kvalitetssikre beskrivelse av Samkjøringsmodellen gjennomføres ustrukturerte intervjuer med en informant i Statnett. Johannessen et al. (2011) omtaler ustrukturerte intervjuer som uformelle samtaler hvor intervjuer stiller åpne spørsmål. På grunn av manglende kunnskap om Samkjøringsmodellen benyttes denne metoden. Informanten vil i slike situasjoner legge vekt på informasjon som informanten selv finner mest relevant. I samarbeid med informanten oppdateres modellgrunnlaget som benyttes i Samkjøringsmodellen. Dette er nødvendig for å kunne besvare problemstillingen.

Relevante analysemetoder for kvantifisering og vurdering av usikkerheten i resultatene hentes primært fra rapporter fra forskningsprosjektet Concept ved NTNU. Prosjektet tar for seg usikkerheten knyttet til estimering av kostnader i store statlige prosjekter. Det vurderes dithen

⁹ The Nordic Regional Security Coordinator

at flere av metodene beskrevet her er overførbare til vurderingen av usikkerheten knyttet oppgavens nytteverdiregning. I tillegg gjennomgås bakenforliggende litteratur for metodene som benyttes.

5.1.2 Simulering av det nordiske kraftsystemet

Ettersom det er en svært omfattende prosess å simulere det nordiske kraftsystemet, velges det å benytte en eksisterende simuleringsmodell. Simuleringsmodellen som benyttes er Samkjøringsmodellen. Se kapittel 4. For å kunne besvare problemstillingen er det nødvendig å benytte en simuleringsmodell som kombinerer modellering av kraftnett med modellering av kraftmarked. Det er flere eksisterende modeller som har disse funksjonene. I tillegg er det nødvendig å benytte en simuleringsmodell som kan hensynta både ATC og FBMC. Dette kravet er det derimot kun Samkjøringsmodellen som oppfyller (Døskeland 2018c).

Samkjøringsmodellen er godt egnet til å «... sammenlikne to ulike scenarier, visualisere en problemstilling/situasjon eller lage en prognose med utgangspunkt i dagens situasjon» (Kringstad 2009 s. 8). Ettersom oppgaven undersøker en forandring knyttet til markedskoblingen i Norden, er det naturlig å benytte Samkjøringsmodellen i kombinasjon med nettmodellene, Samlast og Samnett. Samkjøringsmodellen er en velutprøvd modell for simulering av hydro-termiske kraftsystem, og benyttes av brorparten av markedsaktørene i Norden (SINTEF Energiforskning u.å.-a).

5.2 Bruk av Samkjøringsmodellen som analysemetode

Hensikten med dette kapittelet er å beskrive hvilket modellgrunnlag og datasett som benyttes i den valgte simuleringsmodellen, Samkjøringsmodellen. Brukerinnstillingen som benyttes er en del av fremgangsmåten for analysen, og er beskrevet i kapittel 6.1. *Modellgrunnlaget* defineres i denne oppgaven til å omfatte oppsettet til modellen som helhet. Eksempler på dette er valg om inkluderingen av Samtap, Samnett og Samlast i de to ulike delene av modellen. *Datasettet* defineres til å inneholde verdier som av naturlige årsaker endres med tiden. Eksempler på dette er installert vindkraftkapasitet, forbruk og kalibreringsverdier. *Brukerinnstillingene* er alle valgene som gjennomføres når det kommer til selve modellkjøringene.

5.2.1 Modellgrunnlag

Statnett benytter normalt delprogrammet Samtap i Samkjøringsmodellen sin strategidel. Se kapittel 4.2.2. Nettmodellene, Samnett eller Samlast, benyttes normalt kun i simuleringsdelen. Da vil vannverdimatrisen, som beregnes i strategidelen, være uavhengig av hvilken nettmodell som benyttes. Dermed gjør Statnett en antagelse om at vanndisponeringen, gitt av vannverdimatrisen, er uavhengig av om markedet har ATC eller FBMC. Dette er en antagelse denne oppgaven ikke vil gjøre. Metoden som benyttes i denne oppgaven innebærer at to ulike vannverdiregninger sammenlignes i et kraftmarked med FBMC. Den ene vannverdiregningen baseres på ATC, og den andre baseres på FBMC. To slike modellkjøringer vil heretter refereres til som et *modellpar*, hvor førstnevnte kalles en *ATC-kjøring* og sistnevnte kalles en *FBMC-kjøring*. Samkjøringsmodellen har funksjonalitet for å gjøre dette, men hverken Statnett eller SINTEF har erfaring med å benytte denne metoden, som nevnt i kapittel 4.2.3.

Hvordan dette gjøres i Samkjøringsmodellen er vist i tabell 5-1. For å kunne gjennomføre slike modellkjøringer legges nettbegrensinger til i strategidelen. Se kapittel 4.2.3. I en ATC-kjøring vil alle vannkraftprodusenter tilpasse vanndisponeringen til en ATC. Dette gjøres ved å inkludere Samlast i Samkjøringsmodellens strategidel. I en FBMC-kjøring vil alle vannkraftprodusenter tilpasse vanndisponeringen til en FBMC. Dette gjøres ved å inkludere Samnett i Samkjøringsmodellens strategidel. Vannverdimatrisene fra disse to modellkjøringene simuleres deretter hver for seg i et marked med FBMC. Dette gjøres ved å inkludere Samnett i Samkjøringsmodellens simuleringsdel. En antagelse som ligger til grunn i denne metoden er at enten alle eller ingen vannkraftprodusenter tilpasser seg FBMC.

Tabell 5-1: Oversikt over hvordan et modellpar er definert og hvordan Samnett og Samlast inkluderes i Samkjøringsmodellen.

Modellkjøringsnavn	Strategidel	Simuleringsdel
ATC-kjøring	Samtap + Samlast	Samtap + Samnett
FBMC-kjøring	Samtap + Samnett	Samtap + Samnett

5.2.2 Datasett

Samkjøringsmodellen simulerer kraftsystem med utgangspunkt i definerte datasett. Et datasett inneholder forenklete beskrivelser av kraftsystemet, knyttet til tilbud, etterspørsel og

kraftnettets topologi. Statnett utarbeider datasett som beskriver både dagens kraftsystem, og datasett som beskriver deres forventninger til fremtidens kraftsystem. Dette kalles basisdatasett. I tillegg inneholder datasettet kalibreringsverdier til vannverdiberegningen som Statnett har utviklet over lang tid.

Basisdatasettet for 2017 er valgt for denne analysen, og modellkjøringer med dette datasettet kalles heretter *basisscenarioet*. Dette gjøres for å kunne undersøke hvilken effekt flytbasert markedskobling vil ha på dagens kraftsystem. Når datasett lengere frem i tid undersøkes, vil dette inneholde betydelig usikkerhet knyttet til fremtidig utvikling i kraftsystemet. Dermed veies det dithen at dagens kraftsystem undersøkes. Dette for å redusere andre usikkerhetsfaktorer.

Statnett og SINTEF har lang erfaring med Samkjøringsmodellen. Siden Samlast og Samnett normalt ikke inkluderes i strategidelen, må effekten av dette undersøkes for å vurdere behovet for en ny kalibrering. Med ny kalibrering menes en endring i kalibreringsverdiene som ligger til grunn i basisdatasettet. Kalibrering, som beskrives i kapittel 4.1.3, er svært styrende for modellens resultater. Derfor er det essensielt å avgjøre om kalibreringsverdiene i valgte datasett kan benyttes når nettmodellene inkluderes i strategidelen. Ved behov for ny kalibrering vil automatisk kalibrering benyttes.

5.3 Øvrige analysemetoder som benyttes

På grunn av den iterative vannverdiberegningen i Samkjøringsmodellen, gir modellen ulikt resultat for modellkjøringer med samme modellgrunnlag, datasett og brukerinnstillinger. Derfor velges det å gjennomføre flere modellkjøringer med samme inndata. For å estimere nytteverdien basert på flere like modellkjøringer benyttes Monte Carlo-simulering. For å kunne kvantifisere hvor sensitiv den estimerte nytteverdien er for ulike endringer i datasettet, gjennomføres en sensitivitetsanalyse. En teoretisk beskrivelse av disse analysemetodene presenteres i dette kapitlet.

5.3.1 Monte Carlo-simulering og Crystal Ball

Drevland et al. (2005) gir en beskrivelse av simulering som beregningsmetode. Simulering går ut på at en datamaskin «imiterer» eller simulerer ulike sammenhenger i et virkelig system. For å kunne gjennomføre en simulering er det nødvendig å forta antagelser i form av matematiske

og logiske forklaringer av systemet. Disse antagelsene utgjør en simuleringsmodell som benyttes for å forstå virkelige systemer og sammenhenger.

For å estimere ønskede verdier kan en Monte Carlo-simulering benyttes. I en slik simuleringsmodell tilordnes usikre variabler en sannsynlighetsfordeling. Fordelingen gir sannsynligheten for ulike utfall for de usikre variablene. I en Monte Carlo-simulering kan beregninger gjennomføres tusenvis av ganger. For hver gjennomregning, eller iterasjon, trekker datamaskinen en tilfeldig verdi fra de definerte sannsynlighetsfordelingene. Ønskede resultater lagres for hver iterasjon. Hver iterasjon gir en mulig beskrivelse av systemet som undersøkes. Ved gjennomføring av tilstrekkelig antall iterasjoner vil resultatet være et statistisk grunnlag som benyttes til å utarbeide en sannsynlighetsfordeling. Denne sannsynlighetsfordelingen gir en beskrivelse av det ønskede resultatet. Tilstrekkelig antall iterasjoner bestemmes ut i fra hvor mange simuleringer som er nødvendig for at resultatet skal konvergere (Drevland et al. 2005).

Crystal Ball er et simuleringsverktøy som benyttes i kombinasjon med Excel. Verktøyet gjør det mulig å gi usikre variabler i en beregning en sannsynlighetsfordeling. I tillegg er det mulig å oppgi korrelasjonen mellom variablene. Verktøyet benytter Monte Carlo-simulering og gir en simulert sannsynlighetsfordeling til ønskede resultatvariable. Ut fra denne sannsynlighetsfordelingen kan innebygde funksjoner benyttes for å hente ut ønsket informasjon om blant annet usikkerheten i resultatet.

5.3.2 Sensitivitetsanalyse

Sensitivitetsanalyse, også omtalt i litteratur som følsomhetsanalyse, er en analyseteknikk som benyttes for å avgjøre hvor sensitive, eller følsomme, ulike estimerte verdier er for endring i underliggende parametere som estimatet avhenger av (Andersen 2007). En sensitivitetsanalyse forsøker, i likhet med en usikkerhetsanalyse, å fange opp forhold som kan påvirke estimerte verdier. Kvalitetssikring av dataen som legges til grunn er svært viktig for å kunne oppnå gode analyser.

Andersen (2007) definerer fem trinn for gjennomføring av en sensitivitetsanalyse:

- 1) Bestemme hvilken *vurderingsfaktor* som skal undersøkes.
- 2) Bestemme hvilke *underliggende parametere* som skal inkluderes i analysen.
- 3) Beregne endringen i vurderingsfaktoren som følge av endringer i underliggende parametere.

- 4) Fremstille resultatene i et *følsomhetsdiagram*.
- 5) Vurdere sensitiviteten for ulike beslutningsalternativer opp mot hverandre.

En sensitivitetsanalyse kan i hovedsak gjennomføres på to måter. Det første alternativet er å endre én og én underliggende parameter. Det andre alternativet er en multivariabel analyse hvor flere underliggende parametere endres samtidig. En svakhet med det første alternativet er antagelsen om at alle andre underliggende parametere holdes konstante. Dette vil sjeldent være tilfellet i virkeligheten, da parameteren ofte varierer simultant (Austeng et al. 2005b).

Resultatene fra en sensitivitetsanalyse kan presenteres i et følsomhetsdiagram, hvor relativ endring i underliggende parametere plasseres langs x-aksen og verdien for vurderingsfaktoren plasseres langs y-aksen. Vurderingsfaktoren vil være mest sensitiv for underliggende parametere med relativt bratte kurver i følsomhetsdiagrammet (Andersen 2007).

5.4 Validitet og reliabilitet

Kvaliteten på oppgaven og de valgte metodene vurderes gjennom grad av validitet og reliabilitet. Johannessen et al. (2011) beskriver validitet som hvor gode eller relevante dataene er til å representere fenomenet som undersøkes. I denne oppgaven vurderes validiteten ut fra hvor godt modellen og dataene som benyttes beskriver den virkeligheten som undersøkes. Videre beskrives reliabilitet som hvor pålitelig dataen er, altså om metodene som benyttes i denne oppgaven kan gjentas for å reproducere samme resultat. Det skiller i denne oppgaven mellom svært høy, høy, middels, lav og svært lav validitet eller reliabilitet.

Johannessen et al. (2011 s. 73) definerer begrepsvaliditeten som graden av samsvar mellom fenomenet som undersøkes og operasjonaliseringen av fenomenet. Begrepsvaliditeten knyttet til operasjonaliseringen av nytteverdien vurderes til å være svært høy. Nytteverdien defineres, i denne oppgaven, som endringen i produsentoverskuddet til vannkraftprodusentene dersom de tilpasser produksjonen til en FBMC. Definisjonen gjelder under antagelsen om at marginalkostnaden til vannkraftprodusenter er lik null. Produsenter vil ha noen kostnader knyttet til drift av kraftverkene. Disse kostnadene vurderes som relativt lave, sammenliknet med det totale produsentoverskuddet, og kan derfor neglisjeres. I tillegg vil ikke nytteverdien påvirkes dersom produsentenes marginalkostnader ikke endres ved tilpassing.

En simuleringsmodell vil aldri kunne gi et korrekt bilde av et virkelig system. Likevel har Samkjøringsmodellen over tid vist at den er svært godt egnet til å simulere hydro-termiske kraftsystem. Modellen er kjent for å gi svært gode og virkelighetsnære resultater, se kapittel 4, noe som styrker oppgavens validitet. Hvorvidt de gode resultatene stammer fra modellens gode representasjon av markedet, eller om den gir gode resultater fordi de fleste markedsaktører benytter den samme modellen er usikkert. Uansett årsak er Samkjøringsmodellen er god modell for det nordiske kraftsystemet. Det legges til grunn at alle eller ingen vannkraftprodusenter tilpasser produksjonen til en FBMC. I praksis er sannsynligheten for dette minimal, noe som svekker oppgavens validitet. Det vil være en kostnad for produsentene knyttet til å tilpasse seg FBMC (Statnett 2013 s. 124). Store ressurssterke selskaper vil i større grad ha mulighet til å tilpasse seg enn mindre selskaper. Derfor svekker antagelsen om at enten alle eller ingen tilpasser seg oppgavens validitet. For å styrke oppgavens validitet gjennomføres en vurdering av den nye metoden. En del av formålet med vurderingen er å avgjøre hvor godt resultatene fra modellen stemmer overens med hva som observeres i det virkelige kraftsystemet, når det kommer til disponering av vannmagasinene. At Samkjøringsmodellen er en anerkjent og velutviklet simuleringsmodell veier tyngre enn svakhetene nevnt ovenfor. Derfor vurderes validiteten knyttet til bruk av Samkjøringsmodellen og den valgte metoden som høy.

Samkjøringsmodellen vil på grunn av den iterative vannverdiberegningen gi ulikt resultat for modellkjøringer med samme modellgrunnlag, datasett og brukerinnstillinger. Derfor er det en risiko for at personer som gjennomfører samme modellkjøringer får ulike resultater. Dette vil i utgangspunktet svekke oppgavens reliabilitet. For å styrke reliabiliteten gjøres flere modellkjøringer med samme modellgrunnlag, datasett og brukerinnstillinger. Deretter tilpasses en sannsynlighetsfordeling, basert på resultater fra flere modellkjøringer, til ønskede verdier. Så fremt det gjennomføres tilstrekkelig antall modellkjøringer øker sannsynligheten betraktelig for at personer som benytter samme metode også får svært like resultater. I Monte Carlo-simuleringen velges antall simuleringer slik at svaret konvergerer, noe som også er med på å sikre reliable resultater. Oppgavens reliabilitet knyttet til bruk av Samkjøringsmodellen vurderes derfor som høy.

En alternativ måte for å styrke reliabiliteten, knyttet til bruk av Samkjøringsmodellen, er å definere et sett med faste startverdier for iterasjonen i vannverdiberegningen. På den måten ville andre brukere av Samkjøringsmodellen fått identiske resultater. Ulempen ved bruk av denne metoden er at validiteten reduseres kraftig. Dette skyldes at det er uvisst hvorvidt de valgte startverdiene gir en korrekt beskrivelse av virkeligheten. Derfor vurderes det som mest

hensiktsmessig å foreta en rekke modellkjøringer, heller enn å definere faste startverdier for iterasjonen.

Statnett har utarbeidet datasettet som benyttes i denne oppgaven. Datasettet beskriver dagens kraftsystem. Personene som har utarbeidet datasettene har svært gode kunnskaper om kraftnettet. Dette bidrar til å styrke oppgavens validitet. Værårene som benyttes i modellen baseres på historiske data. Det er usannsynlig at de eksakt samme værårene vil inntreffe i fremtiden, noe som svekker oppgavens validitet. Likevel vurderes gjennomsnittet av 29 væår som en god representasjon av været vannkraftprodusenter kan vente seg i årene fremover. Deler av datasettet baseres på faktiske verdier i kraftsystemet, grunnet valget om å benytte 2017 basisdatasettet. Det er derfor sannsynlig at andre som undersøker disse verdiene kommer frem til tilnærmet like resultater, noe som styrker oppgavens reliabilitet. Andre deler av datasettet baseres på antagelser og prognoser. Sannsynligheten for at andre som ønsker å gjenskape disse datasettene kommer frem til de samme variablene er svært liten, noe som svekker oppgavens reliabilitet. I historiske måleserier vil det alltid kunne forekomme feilmålinger, noe som også svekker reliabiliteten til målingene. Validiteten knyttet til datasettet som benyttes vurderes som høy, mens reliabiliteten vurderes til å være lav.

Alt i alt konkluderes det med at oppgaven har høy validitet og middels reliabilitet.

6 Fremgangsmåte for analyse

Hensikten med dette kapittelet er å gi en beskrivelse av fremgangsmåten for analysen som er gjennomført. Resultatene fra den gjennomførte analysen presenteres i kapittel 7. Kapittel 6.1 gir en detaljert beskrivelse av brukerinnstillingene som benyttes i Samkjøringsmodellen. Kapittel 6.2 beskriver fremgangsmåten for hvordan behovet for ny kalibrering vurderes, samt hvilke modellkjøringer som gjennomføres i denne analysen. Kapittel 6.3 beskriver modellkjøringene som gjennomføres i forbindelse med basisscenarioet. I tillegg beskrives fremgangsmåten for beregningen av produsentoverskuddet, estimeringen av nytteverdien og beregningen av valgte forklaringsvariabler. Kapittel 6.4 beskriver fremgangsmåten for gjennomføringen av sensitivitetsanalysen og modellkjøringene som gjennomføres for hver valgte underliggende parameter.

I denne oppgaven analyseres totalt 1 400 modellkjøringer med Samkjøringsmodellen. For flere av resultatvariablene som hentes ut fra Samkjøringsmodellen er det i overkant av 200 millioner verdier. Det er derfor nødvendig at analysen er systematisk og strukturert. Beskrivelsene i dette kapittelet må sees i sammenheng med kapittel 4.3, som beskriver hvilke resultatvariabler som hentes ut fra Samkjøringsmodellen.

6.1 Brukerinnstillinger i Samkjøringsmodellen

For å få sammenlignbare resultater gjennomføres hver av modellkjøringene i Samkjøringsmodellen med de samme brukerinnstillingene. Disse er presentert i tabell 6-1. Modellkjøringen startes ved å skrive inn kommandoen Saminn i brukergrensesnittet til Samkjøringsmodellen. Deretter velges brukerinnstillingene. Som beskrevet i kapittel 4.3 automatiseres gjerne denne prosessen dersom flere modellkjøringer med samme brukerinnstillinger gjennomføres. Dette gjøres også i denne oppgaven.

Tabell 6-1: Oversikt over valgte brukerinnstillinger i Samkjøringsmodellen.

Nr.	Beskrivelse av brukerinnstilling	Valgt innstilling
1	Antall delområder	34
2	Antall år det skal stilles opp data for	1
3	Årstall for første år i dataperioden	2016
4	Antall år i tilsigsstatistikken	29
5	Årstall for første år i tilsigsstatistikken	1988
6	Antall prisavsnitt som uken er delt inn i	5
7	Realrente (%)	0,0
8	Brukes et eksogent prisnivå i vannverdiberegningen	Nei
9	Gruppering av delområder	Nei
10	Hvilke delområder skal detaljsimuleres?	1-21 og 28
11	Type simulering	Seriesimulering
12	Første simuleringsuke	1
13	Siste simuleringsuke	52
14	Skal vannverdiberegningen utføres?	Ja
15	Skal det simuleres med tappefordeling?	Ja
16	Ønskes det oppdatering av startmagasinene?	Nei
17	Tast utførselskode for kalibrering	Enter
18	Start vannverdiberegning	Auto/Manu

Kart og tabelloversikt over delområdene som benyttes i Samkjøringsmodellen er presentert i vedlegg A3. Delområdene er utarbeidet av Statnett og baseres på hvor i kraftsystemet det er flaskehals. Det vurderes at 29 værår, fra 1988 til 2016, er tilstrekkelig. Ettersom klimaet endrer seg over tid kan værår lenger tilbake bidra til støy. Antall prisavsnitt er en avveining mellom beregningstid og tidsoppløsningen til resultatene. Beregningstiden øker dramatisk dersom antall prisavsnitt økes. Ved bruk av fem prisavsnitt tar én modellkjøring omtrent 30 minutter. Ettersom oppgaven avgrenses til langtidsoptimalisering veies det dithen at ulempen ved økt beregningstid, ikke veies opp av fordelene ved flere prisavsnitt. Seriesimulering benyttes da dette er best egnet til å undersøke en fremtidig situasjon, med ukjent inngående magasinifylling. Som følger av dette valget er kommandonummer 2, 12 og 13 gitt, da seriesimulering gir resultater per år. Realrenten settes lik null ettersom det ikke er nødvendig å neddiskontere de økonomiske verdiene. Prisen simuleres på bakgrunn av vannverdimatrisene og er derfor ikke eksogent gitt. For kommandonummer 9 velges «Nei», ettersom oppgaven ikke

ønsker å aggregere delområder til budområder. Samkjøringsmodellen benytter flere delområder enn hva det er budområder i kraftmarkedet. Denne innstillingen kan slå sammen modellens delområder til budområdene i kraftmarkedet. Se figur 2-1. Ved å beholde inndelingen kan konsistensen i resultatene undersøkes for langt flere delområder. Dette for å styrke troverdigheten til resultatene. Delområdene som detaljsimuleres er alle delområdene hvor det er vannkraft. For at vannverdiberegningen skal starte med en tappefordeling velges det «Ja» ved både punkt 14 og 15. Standardverdiene for startmagasinene og kalibreringsverdiene er en del av datasettet som benyttes og oppdateres ikke manuelt. Derfor velges «Nei» og *Enter* for punkt 16 og 17. Dersom det er ønskelig å gjennomføre en automatisk kalibrering velges «Auto» i punkt 18. Kalibreringsverdiene valgt i punkt 17 vil da ikke legges til grunn i modellkjøringen. Dersom det er ønskelig å gjennomføre en modellkjøring med kalibreringsverdiene som ligger til grunn i datasettet velges «Manu» for punkt 18. Brukerinnstillingene i punkt 17 og 18 vil avhenge av konklusjonene fra vurderingen av behov for ny kalibrering.

6.2 Fremgangsmåte for vurdering av behov for nye kalibrering

Kapittel 5.2.2 fastslår at det må gjennomføres en vurdering for å avgjøre om det er behov for ny kalibrering. Ved behov for kalibrering vil automatisk kalibrering benyttes. Grunnen til det er at manuell kalibrering er en svært tidkrevende oppgave, som egner seg for erfarne brukere av Samkjøringsmodellen. Dette anses som for omfattende i denne sammenheng. Ettersom oppgaven undersøker differansen mellom to typer modellkjøringer med ulik vannverdiberegning, vil det være en fordel å holde alt annet likt. Automatisk kalibrering vil derimot trolig føre til ulik kalibrering for ATC-kjøringen og FBMC-kjøringen. Dermed vil det være uvisst om det er ulik kalibrering eller ulik vannverdiberegning som er årsaken til den estimerte nytteverdien. Derfor er ny kalibrering ikke ønskelig. Automatisk kalibrering kan likevel rettferdiggjøres ved at samme kalibreringsmetode legges til grunn.

Statnett legger de samme kalibreringsverdiene til grunn når Samkjøringsmodellen benyttes for å analysere konsekvensen av en endring i kraftsystemet, eller når utviklingen fremover skal undersøkes. Dette gjøres for å få sammenlignbare resultater. Det betyr at selv ved betydelige ulikheter i vurderingen av behov for ny kalibrering, vil samme kalibreringsverdier kunne legges til grunn. Statnett gjennomfører dog en manuell kalibrering for å sørge for at gode vannverdier legges til grunn i alle modellkjøringer som sammenliknes (Døskeland 2018b).

For å undersøke behovet for ny kalibrering, gjennomføres tre modellkjøringer i henhold til tabell 6-2. *TAP-kjøringen* inkluderer programmet Samtap i strategidelen, mens de to andre, *ATC-kjøringen* og *FBMC-kjøringen*, i tillegg inkluderer henholdsvis Samlast og Samnett. Merk at alle tre kjøringer har Samnett i simuleringsdelen. *TAP-kjøringen* er slik Statnett normalt benytter Samkjøringsmodellen. Alle modellkjøringene gjennomføres med modellgrunnlaget og datasettet beskrevet i kapittel 5.2 og brukerinnstillingene beskrevet i kapittel 6.1. For punkt 18 av brukerinnstillingene velges «Manu» og kalibreringene fra basisdatasettet legges til grunn i modellkjøringene.

Tabell 6-2: Oversikt over modellkjøringer som benyttes for å vurdere behovet for ny kalibrering.

Modellkjøringsnavn	Strategidel	Simuleringsdel	Antall
TAP-kjøring	Samtap	Samtap + Samnett	1
ATC-kjøring	Samtap + Samlast	Samtap + Samnett	1
FBMC-kjøring	Samtap + Samnett	Samtap + Samnett	1

Hensikten med modellkjøringene er å sammenlikne resultatene fra *TAP-kjøringen* med resultatene fra *ATC-* og *FBMC-kjøringen*. Dette gjøres ettersom Statnett har utviklet de underliggende kalibreringsverdiene i basisdatasettet, med utgangspunkt i *TAP-kjøringer*. Det antas derfor at resultatene fra *TAP-kjøringen* representerer gode kalibreringsverdier. Ved store avvik mellom *TAP-kjøringen* og *ATC-* og/eller *FBMC-kjøringen* antas det å være behov for ny kalibrering. Ved mindre avvik kan samme kalibrering benyttes. *ATC-kjøringen* og *FBMC-kjøringen* sammenlignes ikke, ettersom dette ikke er relevant for å vurdere behovet for ny kalibrering.

Resultatet fra strategidelen er én vannverdimatrise per delområde. De tre modellkjøringene vil derfor resultere i tre ulike vannverdimatriser for hvert delområde. I første omgang vil vannverdimatrisen undersøkes for å se om det er betydelig forskjell mellom isopriskurvene. Se figur 4-3. Dette gjøres ved visuell inspeksjon av utvalgte isopriskurver. Er isopriskurvene tilnærmet identiske, vil det ikke være behov for videre undersøkelser. Det konkluderes da med at Statnetts kalibreringsverdier kan benyttes videre i oppgaven. Er kurvene derimot ulike, vil det være nødvendig å undersøke resultatene fra simuleringsdelen, der konsekvensene av denne ulikheten kommer til syne. Her er det svært mange variabler som kan undersøkes. Kriteriene for gode vannverdier, nevnt i kapittel 4.1.3, vil benyttes i analysen. Kriteriene for gode

vannverdier og korresponderende resultatvariabler, som hentes fra Samkjøringsmodellen, er vist i tabell 6-3.

Tabell 6-3: Oversikt over kriteriene for gode vannverdier.

Kriterium	Beskrivelse	Resultatvariabel
1	Magasinene utnytted godt	MAG
2	Store mengder rasjonering unngås	RAS
3	Store mengder flom unngås	FLOM
4	Systematiske pristopper på vinteren unngås	KRV

Dersom vannverdiene fra ATC- og FBMC-kjøringen oppfyller kravene til gode vannverdier, kan Statnetts kalibrering benyttes. Dersom modellkjøringene vurderes til å ikke oppfylle kriteriene vil det være nødvendig å gjennomføre en automatisk kalibrering.

Det legges til grunn at TAP-kjøringen, slik Statnett benytter modellen, representerer gode vannverdier. Dermed vil denne kjøringen fungere som en fasit som de to andre kjøringene måles mot. *Kriterium 1* undersøkes ved å sammenligne magasinutnyttelsen i samtlige delområder over de 29 værårene det er simulert for. For *kriterium 2* vurderes forskjellen i mengden rasjonering i både Norge og Sverige. *Kriterium 3* undersøkes ved gjennomsnittlig endring i mengden flom i hvert delområde, og for hvert simulert værår. *Kriterium 4* undersøkes ved antall priser høyere enn to ganger gjennomsnittspris i hvert delområde. Dette vurderes til å være et godt mål på antall pristopper.

I denne sammenheng vurderes det at tre modellkjøringer er tilstrekkelig. Hver modellkjøring representerer en helhetlig og logisk konsistent løsning på vanddisponeringsproblemet. Det innebærer at gjennomsnittet av flere kjøringene ikke nødvendigvis representerer en mulig løsning for systemet. Ved tvil om kriteriene er oppfylt vil flere modellkjøringer gjennomføres.

Resultatene fra vurderingen av behovet for ny kalibrering presenteres i kapittel 7.1. Disse resultatene diskuteres i kapittel 8.2.1.

Konklusjonen fra vurderingen av behov for ny kalibrering er at Statnetts kalibreringsfaktorer kan benyttes. Dette er nødvendig informasjon når brukerinntilleggene i basisscenarioet og sensitivitetsanalysen skal bestemmes.

6.3 Fremgangsmåte for analyse av basisscenarioet

Hensikten med dette kapitlet er å beskrive modellkjøringene som gjennomføres i forbindelse med basisscenarioet. I tillegg beskrives fremgangsmåten for beregningen av produsentoverskuddet, estimeringen av nytteverdien og beregningen av valgte forklaringsvariabler. Resultatene fra den gjennomførte analysen presenteres i kapittel 7.2.

Det er valgt fem prisavsnitt per uke og en simuleringsperiode på 29 år. For resultatvariablene benyttet her, gir dette 7540 verdier per delområde. Resultatfilen for én enkelt resultatvariabel i én enkelt modellkjøring består derfor av en matrise med 7540 rader, en rad for hvert prisavsnitt, og 19 kolonner, en kolonne for hvert delområde. Et eksempel på Python-kodene som er benyttet i databehandlingen finnes i vedlegg B.

For å kunne beregne vannkraftprodusenters nytteverdi ved å tilpasse produksjonen til en FBMC gjennomføres 40 modellkjøringer i henhold til tabell 6-4. Modellpar er definert i tabell 5-1. Alle modellkjøringene gjennomføres med modellgrunnlaget og datasettet beskrevet i kapittel 5.2. De valgte brukerinnstillingene er beskrevet i kapittel 6.1. For punkt 18 av brukerinnstillingene velges «Manu», ettersom Statnetts kalibreringsverdier skal benyttes.

Tabell 6-4: Modellkjøringene gjennomført for å analysere basisscenarioet.

Modellpar	Endring	Antall par
1	Ingen	20

6.3.1 Beregning av produsentoverskudd

Basert på modellkjøringene fra tabell 6-4, beregnes produsentoverskuddet fra hver ATC-kjøring og hver FBMC-kjøring. Vannkraftprodusentenes nytteverdi ved å tilpasse produksjonen til FBMC, er estimert basert på disse resultatene. Nyttteverdien defineres som endringen i produsentoverskuddet til vannkraftprodusentene dersom de tilpasser seg FBMC. Dette tilsvarer differansen mellom produsentoverskuddet fra ATC-kjøringene og FBMC-kjøringene.

Ved å benytte formel 6-1 beregnes det totale gjennomsnittlige produsentoverskuddet per år, $PO_{TOT,k}$, per modellkjøring, k , for K ATC-kjøringer og K FBMC-kjøringer. Vannkraftprodusentenes marginalkostnad antas å være lik null, slik at produsentenes inntekt vil være like produsentoverskuddet. $KRV_{k,l,m,n}$ og $EGPR_{k,l,m,n}$ er henholdsvis kraftpris og total produksjon, i hver modellkjøring, k . Her representerer n et prisavsnitt i år m , med totalt N

prisavsnitt for hvert værår i M værår. l representerer hvert av totalt L antall delområder. Python-koden som benyttes til å beregne produsentoverskuddene uttrykt ved formel 6-1 finnes i vedlegg B.

$$PO_{TOT,k} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L KRV_{k,l,m,n} * EGPR_{k,l,m,n} \quad 6-1$$

Produsentoverskuddet, i hver modellkjøring, k , kan deles i to elementer. På den ene siden er det produsentoverskuddet fra regulerbar vannkraftproduksjon, og på andre siden er det produsentoverskuddet fra uregulerbar vannkraftproduksjon. Dermed beregnes et produsentoverskudd knyttet til regulerbar produksjon, $PO_{REG,k}$, og et knyttet til uregulerbar produksjon, $PO_{UREG,k}$. Se formel 6-2 og 6-3. $UREG_{k,l,m,n}$ er den uregulerbare produksjonen. Hensikten med denne oppdelingen er å kunne avgjøre hvorvidt det er forskjell i estimert nytteverdi for produsenter med relativt mye eller relativt lite regulerbar produksjon.

Produsentoverskuddet beregnet ved formel 6-1, 6-2 og 6-3 er et gjennomsnitt av alle værår, og er summert for alle delområdene.

$$PO_{REG,k} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L KRV_{k,l,m,n} * (EGPR_{k,l,m,n} - UREG_{k,l,m,n}) \quad 6-2$$

$$PO_{UREG,k} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L KRV_{k,l,m,n} * UREG_{k,l,m,n} \quad 6-3$$

For å beregne det totale produsentoverskuddet per delområde for hver modellkjøring, $PO_{TOT,k,l}$, benyttes formel 6-4. For å beregne det totale produsentoverskuddet per værår for hver modellkjøring, $PO_{TOT,k,m}$ benyttes formel 6-5. Hensikten med disse beregningene er å kunne vurdere hvorvidt den estimerte nytteverdien er lik for hvert værår, og for hvert delområde i Samkjøringsmodellen.

$$PO_{TOT,k,l} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N KRV_{k,l,m,n} * EGPR_{k,l,m,n} \quad 6-4$$

$$PO_{TOT,k,m} = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L KRV_{k,l,m,n} * EGPR_{k,l,m,n} \quad 6-5$$

6.3.2 Estimering av nytteverdi

Dersom formlene beskrevet i kapittel 6.3.1 benyttes på 20 ATC-kjøringer og 20 FBMC-kjøringer vil resultatet være 40 ulike produsentoverskudd. Resultatene fra ATC-kjøringene er uavhengige av resultatene fra FBMC-kjøringene. For å estimere forventningsverdien til nytteverdien, basert på de to rekkene med produsentoverskudd, utarbeides en simuleringsmodell. Videre i oppgaven vil forventningsverdien til nytteverdien omtales som nytteverdien. Simuleringsmetoden som benyttes er Monte Carlo-simulering, og simuleringsverktøyet er Crystal Ball. Se kapittel for 5.3.1 for en teoretisk beskrivelse. Simuleringsmodellen utarbeides for å ta hensyn til usikkerheten knyttet til at Samkjøringsmodellen gir ulikt resultat for modellkjøringer med samme modellgrunnlag, datasett og brukerinnstillinger.

Nytteverdien er definert som differansen i produsentoverskudd mellom FBMC-kjøringene og ATC-kjøringene. De to rekkene med produsentoverskudd tilordnes en kontinuerlig sannsynlighetsfordeling. En kontinuerlig fordeling velges fordi det er uendelig mange utfall. Et verktøy i Crystal Ball benyttes for å tilpasse en best mulig sannsynlighetsfordeling. Dette gjøres ved at Crystal Ball gjennomfører tre ulike statistiske tester¹⁰. Testene vurderer tilpasningsdyktigheten som fordelingen har til rekken med produsentoverskudd. Figur 6-1 viser et eksempel på oppsettet som er benyttet i Crystal Ball. I figuren simuleres produsentoverskuddet for FBMC-kjøringene og ATC-kjøringene i andre kolonne.

	Simulert	Simulert	Forventningsverdi
PO fra FB-kjøring	4281,90	4281,90	4281,91
- PO fra ATC-kjøring	4280,22	4280,22	4280,22
= Nytteverdi		1,69	1,69

Figur 6-1: Oppsett for Monte Carlo-simulering ved bruk av Crystal Ball.

For å kunne hente ut relevant informasjon under Monte Carlo-simuleringen defineres prognoser, kolonne 3 i figur 6-1, til hver av de simulerte verdiene. Det samme gjøres også for nytteverdien, som er lik differanse mellom de simulerte produsentoverskuddene. Deretter gjennomføres en Monte Carlo-simulering med 50 000 iterasjoner.

¹⁰ Testene som benyttes er Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov og Chi-kvadrat.

Ut i fra disse simuleringene kan usikkerheten kvantifiseres. Kvantifiseringen gjennomføres ved å beregne et 80 % konfidensintervall. I tillegg estimeres sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null. Etter gjennomført simulering lages en kumulativ sannsynlighetsfordeling for den totale nytteverdien. Funksjoner i Crystal Ball benyttes for å hente ut slik informasjon. Funksjonene benytter den simulerte verdien, a , som inndata. Formel 6-6 gir forventningsverdien til den simulerte verdien. For valgt sannsynlighet, b , gir formel 6-7 ulike kvantiler for den simulerte verdien. I denne oppgaven benyttes 10 % kvantilen og 90 % kvantilen, heretter referert til som henholdsvis P10 og P90. Formel 6-8 gir sannsynligheten for at den simulerte verdien er mindre enn en valgt verdi, c .

$$= CB.GetForeStatFN(a; 2) \quad 6-6$$

$$= CB.GetForePercentFN(a; b) \quad 6-7$$

$$= CB.GetCertainty(a; c) \quad 6-8$$

6.3.3 Beregning av forklaringsvariabler

Produsentoverskuddet, beregnet ved bruk av kraftpris og produsert volum, benyttes for å estimere nytteverdien. Variablene kraftpris og produsert volum kan derfor sees på som forklaringsvariabler når nytteverdien undersøkes. Disse variablene vil være uavhengige variabler, mens nytteverdien er den avhengige variabelen. Videre i oppgaven benyttes forklaringsvariabel som begrep for en uavhengig variabel.

Ut fra kraftprisen og det produserte volumet beregnes en timesvektet og en volumvektet pris. Disse verdiene benyttes som forklaringsvariabler. Den timesvektede prisen er den gjennomsnittlige spotprisen, og benyttes i diskusjon av endringen i kraftsystemet ved produsenters tilpasning til FBMC. For en produsent med lik produksjon i alle prisavsnitt, vil den timesvektede prisen være produsentens oppnådde pris. Denne prisen representerer derimot i liten grad den oppnådde prisen til en regulerbar vannkraftprodusent, som forsøker å produsere ved høyest mulig pris. Derfor undersøkes også den volumvektede prisen. Den volumvektede prisen er prisen som kraftprodusentene i gjennomsnitt har oppnådd. En reduksjon i volumvektet pris innebærer at produsentene i gjennomsnitt har oppnådd en lavere pris for det produserte volumet. Tilsvarende innebærer en økning at produsentene har oppnådd en høyere pris.

Den volumvektede prisen, P_{VV} , beregnes ved formel 6-9. V_{Tot} er den totale mengden kraft produsert i løpet av 29 år. V_n og P_n er henholdsvis produsert mengde (EGPR) og prisen (KRV) i prisavsnitt n . Det er totalt $N = 7540$ prisavsnitt.

$$P_{VV} = \frac{1}{V_{Tot}} \sum_{n=1}^N V_n * P_n \quad 6-9$$

Den timesvektede prisen, P_{TV} , beregnes ved formel 6-10. w_n er vekten som benyttes for å ta hensyn til at ulike prisavsnitt inneholder ulikt antall timer. Verdiene for w_n er beregnet basert på antall timer per prisavsnitt. Se tabell 6-5. Når $N = 6$ vil w_n igjen være lik vekten for prisavsnitt nummer 1.

$$P_{TV} = \sum_{n=1}^N w_n * P_n \quad 6-10$$

Tabell 6-5: Oversikt over antall timer per uke for hvert prisavsnitt og tilhørende vektet verdi.

Prisavsnitt-nummer	Prisavsnitt	Timer per uke	Vektet verdi
1	Topp	25	0,15
2	Høy	35	0,21
3	Morgen/kveld	25	0,15
4	Natt	49	0,29
5	Helg	34	0,20

Den regulerbare og uregulerbare produksjonen undersøkes for å avgjøre om produsentene får henholdsvis mer eller mindre kontroll over egen produksjon ved en tilpasning til FBMC. Mer kontroll innebærer mer regulerbar produksjon, og mindre uregulerbar produksjon og flom. Dette gjør at produsentene i større grad kan produsere når prisen er høy. Dermed forventes en positiv nytteverdi, dersom mengden regulerbar produksjon øker, gitt at den totale produksjonen ikke reduseres betydelig.

Det er relevant å undersøke nytteverdien fra uregulerbar produksjon ettersom de fleste regulerbare produsenter også i perioder vil ha uregulerbar produksjon.

Den gjennomsnittlige årsproduksjonen beregnes ved bruk av EGPR. Verdiene for alle delområder og prisavsnitt summeres og deles på de 29 værårene. Det samme gjelder for

uregulerbar produksjon (UREG) og flom (FLOM). Den regulerbare produksjonen beregnes som differansen mellom totalproduksjon og uregulerbar produksjon.

6.4 Fremgangsmåte for sensitivitetsanalyse

Hensikten med dette kapitlet er å beskrive modellkjøringene som gjennomføres i forbindelse med sensitivitetsanalysen. Beskrivelsen av fremgangsmåten for beregningen av produsentoverskuddet, estimeringen av nytteverdien og beregningen av valgte forklaringsvariabler er beskrevet i kapittel 6.3. Den samme fremgangsmåten vil langt på vei benyttes for å kunne presentere resultatene knyttet til sensitivitetsanalysen. Resultatene fra den gjennomførte analysen presenteres i kapittel 7.3.

I et langtidsperspektiv er de færreste størrelser i kraftsystemet kjente og faste. Dermed er det viktig å undersøke hvordan den estimerte nytteverdien i basisscenarioet endrer seg, når forutsetningene i datasettet endres. En kraftprodusent som vurderer å bruke ressurser på nye analyseverktøy kan benytte resultatene av oppgavens sensitivitetsanalyse som en del av sin nytte-kostnadsvurdering. Sensitivitetsanalysen legger vekt på å analysere relevante og dagsaktuelle underliggende parametere. Se kapittel 5.3.2 for teoretisk beskrivelse av sensitivitetsanalysen.

De underliggende parameterne som undersøkes i denne oppgaven er gjengitt i tabell 6-6. Som beskrevet i kapittel 4.1.3 er Samkjøringsmodellen sensitiv for valg av kalibreringsverdier. Ettersom hverken Statnett eller SINTEF har erfaring med lignende modellkjøringer, vurderes det som hensiktsmessig å undersøke om nytteverdien er sensitiv for endring i kalibreringsverdiene. Kapittel 2.2 trekker frem flere størrelser i kraftsystemet som markedsaktørene mener vil endres i tiden fremover. Nytteverdiens sensitivitet for tre av disse størrelsene undersøkes. Kolonnen til høyre i tabell 6-6 viser hvordan endringen i underliggende parametere er kvantifisert. For å gjøre endringer i datasettet knyttet til de tre første underliggende parameterne benyttes inndataredigeringsprogrammet Tempo.

Tabell 6-6: Underliggende parametere undersøkt i sensitivitetsanalysen og hvordan disse er kvantifisert i Samkjøringsmodellen.

Underliggende parameter	Kvantifisering
Mellomlandsforbindelser	Legger planlagte kabler inn i modellen
Installert vindkraftkapasitet	Endrer mengden installert vindkraftkapasitet
Kraftforbruk	Øker/reducerer mengden fastkraft
Kalibreringsverdiene	Øker/reducerer hver kalibreringsverdi

Alle modellkjøringene i sensitivitetsanalysen vil gjennomføres med modellgrunnlaget beskrevet i kapittel 5.2. Brukerinnstillingene for modellkjøringene knyttet til mellomlandsforbindelser, installert vindkraftkapasitet og kraftforbruk er beskrevet i kapittel 6.1. For punkt 18 av brukerinntillingene velges «Manu», ettersom Statnetts kalibreringsverdier benyttes. For modellkjøringene med justering av kalibreringsverdiene er brukerinntillingene noe annerledes. Se vedlegg A5.

De underliggende parameterne kvantifiseres med mål om at oppgaven skal undersøke reelle situasjoner basert på markedsaktørenes forventninger til utviklingen fremover, heller enn en hypotetisk utvikling. Vurderingen av nytteverdiens sensitivitet for de underliggende parameterne klassifiseres på følgende måte: svært sensitiv, sensitiv, lite sensitiv og svært lite sensitiv. Klassifiseringen baseres på subjektive vurderinger.

Mellomlandsforbindelser

Tabell 6-7 viser mellomlandsforbindelser som er planlagt fra Norge til andre synkronområder de neste årene. NordLink til Tyskland og North Sea Link til England er begge under utbygning og forventes å være i kommersiell drift i henholdsvis 2020 og 2021 (Statnett 2017a). NorthConnect til Skottland er planlagt til 2022 (NorthConnect AS 2017), men kabelens fremtid er høyst usikker grunnet både politisk motstand (Mollestad 2018; NTB 2018) og motstand fra markedsaktører (Hovland 2018; Industri Energi 2017). Alle kablene er undersøkt i sensitivitetsanalysen.

Tabell 6-7: Mellomlandsforbindelser undersøkt i sensitivitetsanalysen.

Kabel nr.	Navn på prosjekt	Kapasitet	Fra - til	År
1	NordLink	1400 MW	Norgesyd – DE	2020
2	North Sea Link	1400 MW	Vestsyd – GB	2021
3	NorthConnect	1400 MW	Hallingdal – GB	2022

For å undersøke hvor sensitiv nytteverdien fra basisscenarioet er for utbygging av mellomlandsforbindelser gjennomføres 120 modellkjøringer fordelt på 3 modellpar, som vist i tabell 6-8. Datasettet i Samkjøringsmodellen tillegges én og én mellomlandsforbindelse etter hvilket år det forventes at forbindelsen er i drift. Dermed analyseres ikke effekten av hver enkelt kabel separat, men hvordan nytteverdien endres etter hvert som flere mellomlandforbindelser ferdigstilles. Dette valget baseres på målet om å gjennomføre en virkelighetsnær sensitivitetsanalyse.

Tabell 6-8: Modellkjøringer gjennomført for å undersøke sensitiviteten til nytteverdien for utbygging av mellomlandsforbindelser.

Modellpar	Endring	Antall par
1	Kabel nr. 1	20
2	Kabel nr. 1+2	20
3	Kabel nr. 1+2+3	20

Installert vindkraftkapasitet

For å undersøke hvor sensitiv nytteverdien fra basisscenarioet er for endring i installert vindkraftkapasitet, endres mengden installert vindkraftkapasitet i hvert delområde i henhold til tredje kolonne i tabell 6-9. Den tilsvarende endringen målt i GW for hele Norden vises i fjerde kolonne i samme tabell. Denne fremgangsmåten innebærer at delområder uten vindkraft i dag heller ikke vil ha vindkraft i denne sensitivitetsanalysen. På samme måte vil den største økning målt i GW være i delområder hvor det alt er mye vindkraft. Hvert modellpar består av 40 modellkjøringer, noe som gir totalt 200 modellkjøringer.

Tabell 6-9: Modellskjøringer gjennomført for å undersøke sensitiviteten til nytteverdien for endringer i installert vindkraftkapasitet.

Modellpar	Endringsvariabel	Endring [%]	Endring [GW]	Antall par
1	Vindkraftkapasitet	+ 30 %	4,03	20
2	Vindkraftkapasitet	+ 50 %	6,72	20
3	Vindkraftkapasitet	+ 100 %	13,44	20
4	Vindkraftkapasitet	+ 150 %	20,16	20
5	Vindkraftkapasitet	+ 200 %	26,88	20

Ved å justere mengden installert vindkraftkapasitet likt i alle delområder vil ikke konsekvensen av enkeltprosjekter fanges opp. Det er en generell økning av vindkraft i det nordiske kraftsystemet som undersøkes. Lik prosentvis justering av vindkraftkapasitet i alle delområder er en forenkling. I Norge er det i dag relativt lite installert vindkraftkapasitet sammenlignet med Sverige og Danmark. Se vedlegg C. I 2018 er det i Norge mer kapasitet under utbygging enn hva det er installert kapasitet i dag (Weir & Aksnes 2018 s. 7). En økning på 200 % er derfor ikke urealistisk. Danmark har besluttet at 50 % av deres kraftproduksjon skal stamme fra vindkraft innen 2020 (Danish Ministry of Climate 2012). Dette vil kreve mye ny kapasitet også de neste årene, ettersom andelen i 2016 var på 37 %. Se vedlegg C. Likevel fremstår justeringene som høyere enn hva som er realistisk. I motsetning til Norge vil Sverige fortsette ordningen med grønne sertifikater fram til 2030, noe som skal gi 18 TWh ny fornybar kraft i landet (Olje- og energidepartementet 2017). I 2016 produserte Sveriges 6 GW installert vindkraftkapasitet til sammen 15 TWh. Se vedlegg C. Dette gjør at de høyeste justeringene fremstår som høyere enn hva som er realistisk de neste årene.

Oppgaven rettes mot aktører i kraftmarkedet. En sensitivitetsanalyse for å undersøke en teoretisk nedgang i installert vindkraftkapasitet anses derfor ikke å være relevant for oppgaven.

Kraftforbruk

I årene fremover forventer både NVE og Statnett en økning i kraftforbruket i Norden. Spilde et al. (2018) konkluderer med at forbruket i Norge kan øke med 24 TWh frem mot 2035 relativt til forbruket i 2016. Bønnsdalen et al. (2016 s. 36) forventer en forbruksøkning på i overkant av 50 TWh i Norden frem mot 2040 relativt til 2016, hvorav 15 TWh er i Norge. Samtidig falt etterspørselen betydelig i kjølvannet av finanskrisen i 2008. Basert på Eurostat (2017) falt både det europeiske og det nordiske kraftforbruket med 5 % i 2009. I 2011 var det et nytt fall i

etterspørselen i Europa på 2 %. I Norden falt til sammenligning etterspørselen med 4 % samme år. Dette viser at det også er relevant å undersøke en reduksjon i forbruk.

Den prosentvise endringen i kolonne tre i tabell 6-10 er dermed basert på statistikk og markedsaktørenes forventinger til fremtidig etterspørsel etter kraft. For å undersøke hvor sensitiv nytteverdien fra basisscenarioet er for endringer i kraftforbruk, endres mengden fastkraft i samtlige delområder i Norden. Totalt gir dette 8 modellpar, hvorav hvert par består av 40 modellkjøringer.

Tabell 6-10: Modellkjøringer gjennomført for å undersøke sensitiviteten til nytteverdien for endringer i forbruk.

Modellpar	Endringsvariabel	Endring [%]	Endring kraft [TWh]	Antall par
1	Fastkraft	+10 %	+23,3	20
2	Fastkraft	+6 %	+14,0	20
3	Fastkraft	+4 %	+9,3	20
4	Fastkraft	+2 %	+4,7	20
5	Fastkraft	-2 %	-4,7	20
6	Fastkraft	-4 %	-9,3	20
7	Fastkraft	-6 %	-14,0	20
8	Fastkraft	-10 %	-23,3	20

Etterspørselssiden i Samkjøringsmodellen er delt i fastkraft og priselastiske kontrakter. Se figur 2-2. Som beskrevet ovenfor vil kun mengden fastkraft endres, noe som er en forenkling. Dette er gjort av modelltekniske årsaker. I Samkjøringsmodellen er det tidkrevende og relativt komplisert å endre datasettet knyttet til de priselastiske kontraktene, sammenlignet med fastkraft. Samtidig er dette en rimelig forenkling. Spilde og Skotland (2016) beregner at en elektrifisering av transportsektoren i Norge vil kreve 20 TWh, noe som vil øke etterspørselen etter fastkraft. Samtidig viser tall fra Eurostat at mesteparten av etterspørselen i Norden er fastkraft, altså andre sektorer enn industri (Eurostat 2016).

Kalibreringsverdiene

Endring av kalibreringsverdiene vil si en endring i hvordan kraftprodusentene i hvert delområde antar at kraftmarkedet ser ut, når strategien, representert ved vannverdimatrisen, fastsettes. Samkjøringsmodellen er kjent for å være sensitiv for endring i kalibreringsverdiene. Se

kapittel 4.1.3. Her undersøkes hvordan nytten, differansen mellom produsentoverskuddene i modellpar, endres når kalibreringen endres.

For å undersøke hvor sensitiv nytteverdien fra basisscenarioet er for endringer i de tre kalibreringsfaktorene, endres én og én kalibreringsverdi i henhold til kolonne tre i tabell 6-11. Hvert av de 18 modellparene består av 40 modellkjøringer. Dermed gjennomføres totalt 720 modellkjøringer.

Tabell 6-11: Modellkjøringer gjennomført for å undersøke sensitiviteten til nytteverdien for endringer i kalibreringsfaktorer.

Modellpar	Endringsvariabel	Endring [%]	Antall par
1	Tilbakekoblingsfaktor	+20 %	20
2	Tilbakekoblingsfaktor	+10 %	20
3	Tilbakekoblingsfaktor	+5 %	20
4	Tilbakekoblingsfaktor	-5 %	20
5	Tilbakekoblingsfaktor	-10 %	20
6	Tilbakekoblingsfaktor	-20 %	20
7	Formfaktor	+20 %	20
8	Formfaktor	+10 %	20
9	Formfaktor	+5 %	20
10	Formfaktor	-5 %	20
11	Formfaktor	-10 %	20
12	Formfaktor	-20 %	20
13	Elastisitetsfaktor	+20 %	20
14	Elastisitetsfaktor	+10 %	20
15	Elastisitetsfaktor	+5 %	20
16	Elastisitetsfaktor	-5 %	20
17	Elastisitetsfaktor	-10 %	20
18	Elastisitetsfaktor	-20 %	20

Samkjøringsmodellen er mer sensitiv for justeringer av tilbakekoblingsfaktoren, enn for de to andre parameterne (Døskeland 2018c). Det innebærer at en 20 % justering muligens er urealistisk høyt for tilbakekoblingsfaktoren, mens det er for lavt for de to andre. Justeringer på 5, 10 og 20 % er derfor et kompromiss mellom disse to hensynene.

7 Resultater fra analyse

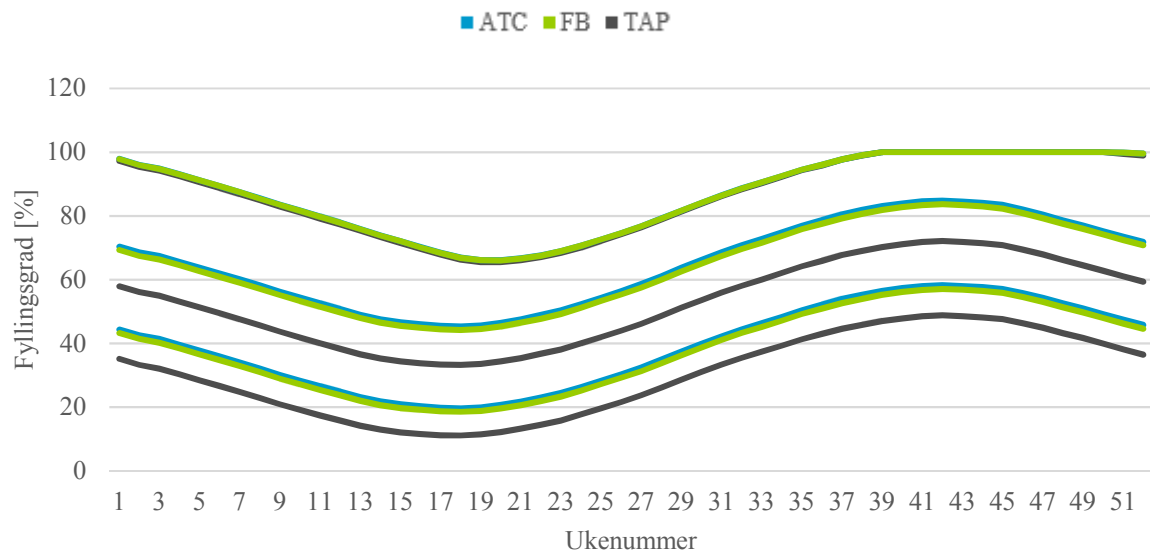
Hensikten med dette kapitlet er å presentere resultatene fra modellkjøringene og analysen som er beskrevet i kapittel 6. Kapittel 7.1 presenterer resultatene fra vurderingen av behov for ny kalibrering. Kapittel 7.2 og 7.3 presenterer resultatene fra henholdsvis basisscenarioet og sensitivitetsanalysen. En diskusjon av resultatene er presentert i kapittel 8.2.

7.1 Resultater fra vurdering av behov for ny kalibrering

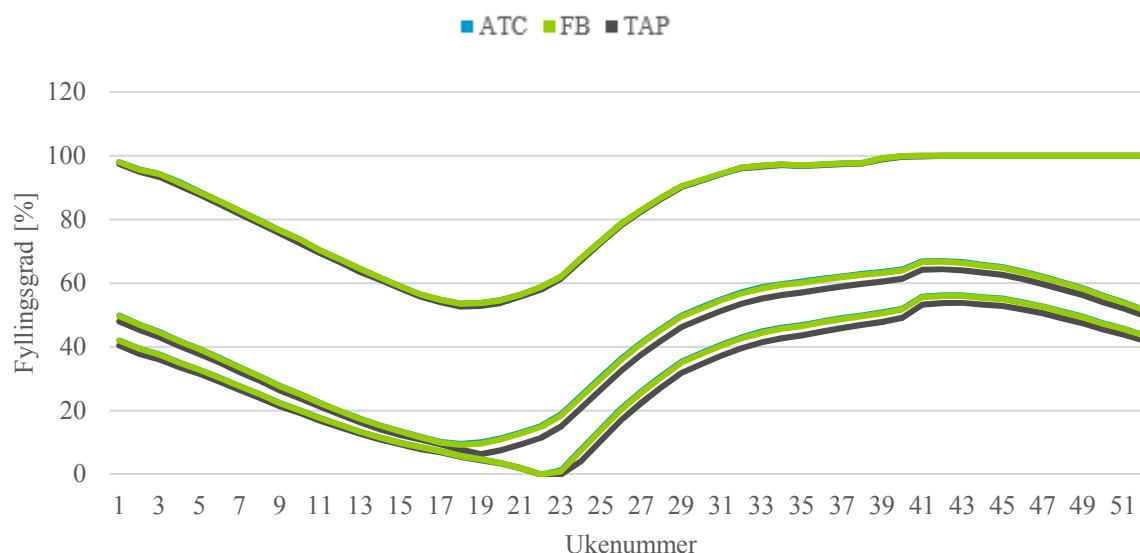
For å vurdere behovet for en ny kalibrering gjennomføres tre modellkjøringer: TAP-, ATC- og FBMC-kjøringen. Disse er beskrevet i tabell 6-2. Resultatene som presenteres i dette kapitlet skal gjøre det mulig å diskutere om det er nødvendig å gjennomføre en ny kalibrering. Fremgangsmåten for analysen er beskrevet i kapittel 6.1.

Inspeksjon av isopriskurver

Figur 7-1 og figur 7-2 viser isopriskurvene for henholdsvis delområde 3 og delområde 4 ved prisnivåer lik 10, 40 og 100 €/MWh. Disse delområdene presenteres fordi det er her isopriskurvene mellom modellkjøringene avviker mest.



Figur 7-1: Isopriskurver for delområdet 3 for TAP-, ATC- og FBMC-kjøringen. Prisnivå [€/MWh]: 100 (de tre nederste kurvene), 40 (de tre midtre kurvene) og 10 (de øverste kurvene).



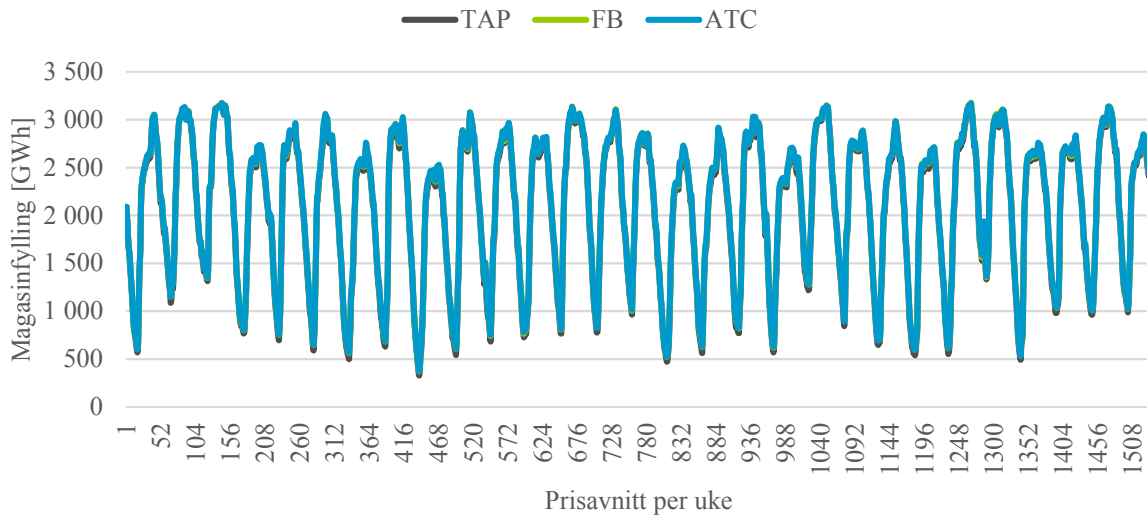
Figur 7-2: Isopriskurver for delområdet 4 for TAP-, ATC- og FBMC-kjøringen. Prisnivå [€/MWh]: 100 (de tre nederste kurvene), 40 (de tre midtre kurvene) og 10 (de øverste kurvene).

Generelt for alle delområder er at formen til isopriskurvene er den samme. I de fleste delområder er det svært liten forskjell mellom isopriskurvene, men det er en tendens til at TAP-kjøringen har en lavere magasinifylling for samme prisnivå, sammenliknet med ATC- og FBMC-kjøringen.

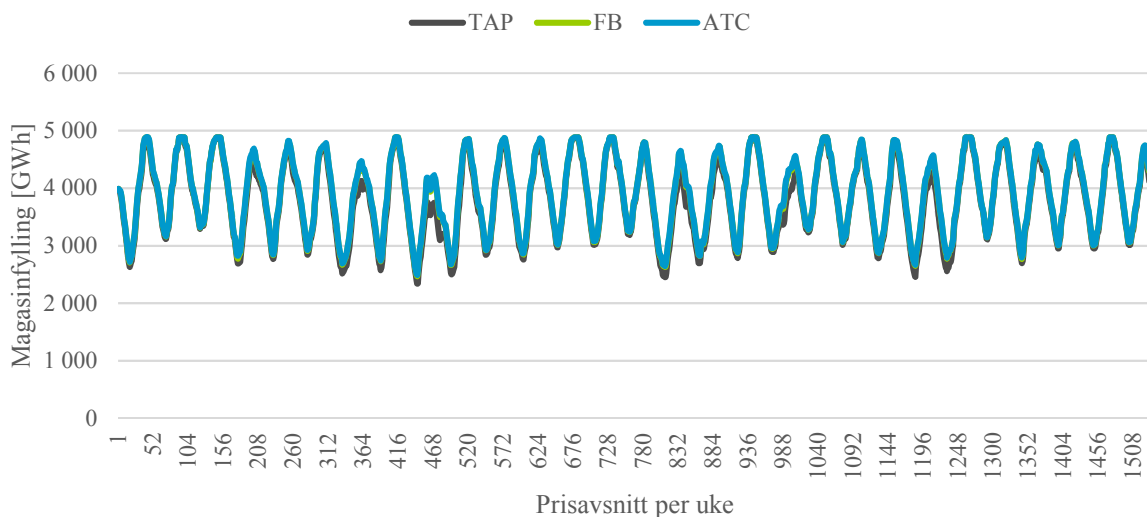
Isopriskurvene i figur 7-1 og figur 7-2 viser en forskjell mellom TAP-kjøringen og ATC- og FBMC-kjøringen, som vurderes til å kunne gi betydelige utslag i Samkjøringsmodellens simuleringsdel. På bakgrunn av disse resultatene vurderes det som hensiktsmessig å undersøke kriteriene for gode vannverdier fra kapittel 4.1.3. Dette gjøres for å kunne avgjøre hvorvidt det er nødvendig å gjennomføre en automatisk kalibrering.

Kriterium 1: Magasinene utnyttet godt

Figur 7-3 viser magasinifyllingen over alle simulerte værår for delområde 5. Dette delområdet er valgt ut for å illustrere hvordan forskjellen mellom TAP-kjøringen og ATC- og FBMC-kjøringen ser ut i de fleste delområder. TAP-kjøringen ligger med marginalt lavere magasinifylling relativt til de to andre kjøringene. Dette gjør at de lokale bunnpunktene og toppunktene ligger noe lavere. Figur 7-4 viser magasinutnyttelsen i delområde 3. Delområde 3 er delområdet hvor forskjellen mellom TAP-kjøringen og ATC- og FBMC-kjøringen er størst. Figuren viser at det i perioder er større avvik, mens i de fleste år er magasinifyllingen tilnærmet identisk.



Figur 7-3: Magasinfylting i delområde 5 over 29 værår.



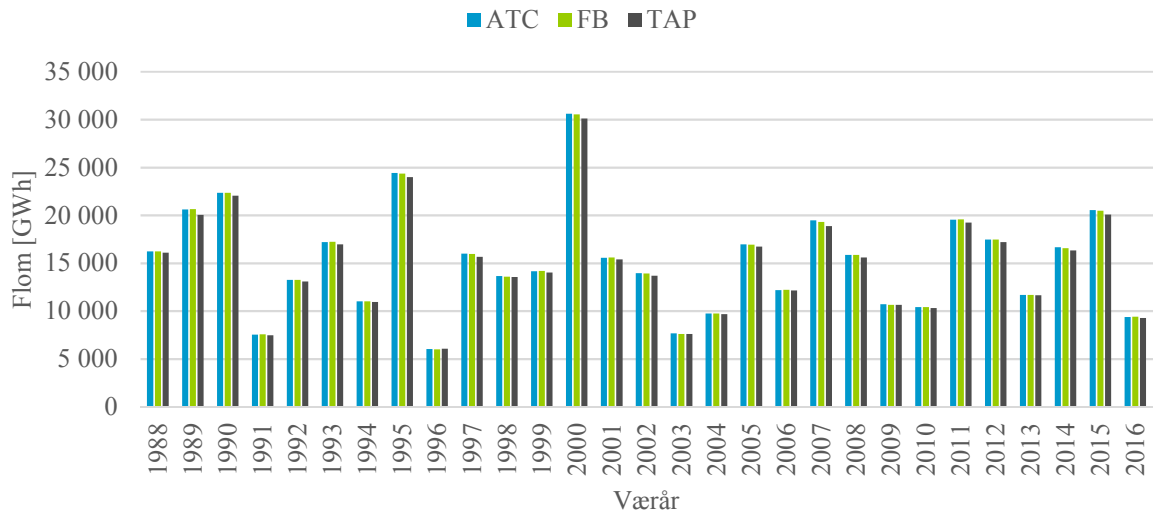
Figur 7-4: Magasinfylting i delområde 3 over 29 værår.

Kriterium 2: Store mengder rasjonering unngås

Ingen av modellkjøringene gir rasjonering i Norge. Derimot viser resultatene 0,001 TWh/år rasjonering i Sverige i alle tre modellkjøringene. Resultatene fra TAP-kjøringen er med andre ord identiske resultatene fra ATC- og FBMC-kjøringen.

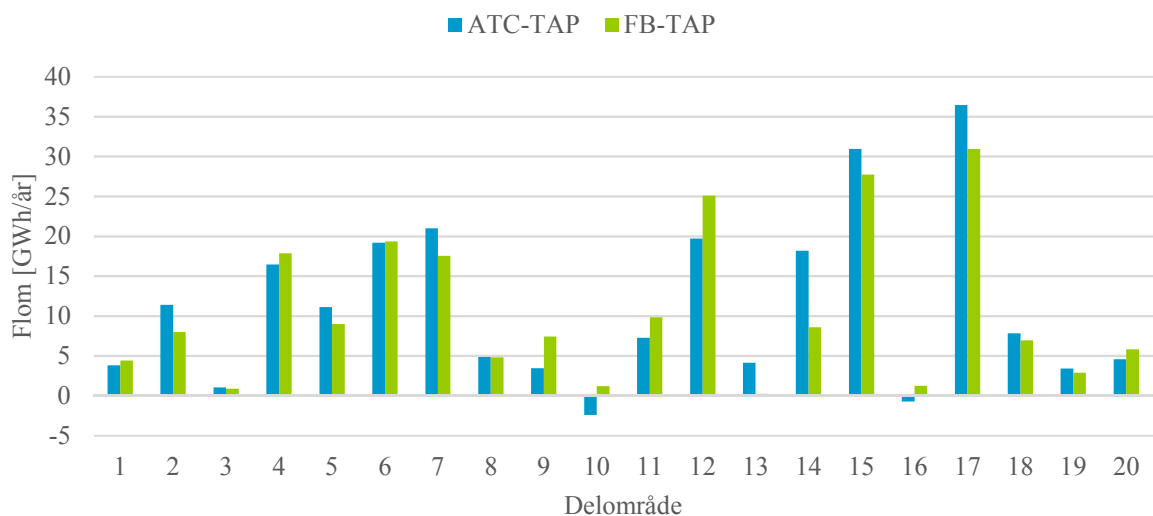
Kriterium 3: Store mengder flom unngås

Figur 7-5 viser den totale mengden flom for hvert værår i Norge og Sverige. Mengden flom varierer fra mellom 6 000 GWh og 30 000 GWh. Det ser ut til å være liten forskjell mellom de tre kjøringene for ulike værår, selv om TAP-kjøringen tenderer til å være noe lavere.



Figur 7-5: Total mengden flom i Norge og Sverige i hvert vårår for TAP-, ATC- og FBMC-kjøringen.

Figur 7-6 viser at det er en økning i flom i de aller fleste delområdene både for ATC- og FBMC-kjøringen, relativt til TAP-kjøringen. I gjennomsnitt er mengden flom i overkant av 10 GWh/år høyere.



Figur 7-6: Endring i årlig gjennomsnittlig flom mellom TAP-kjøringen og ATC/FBMC-kjøringen, målt i GWh, for delområdene i Norge og Sverige.

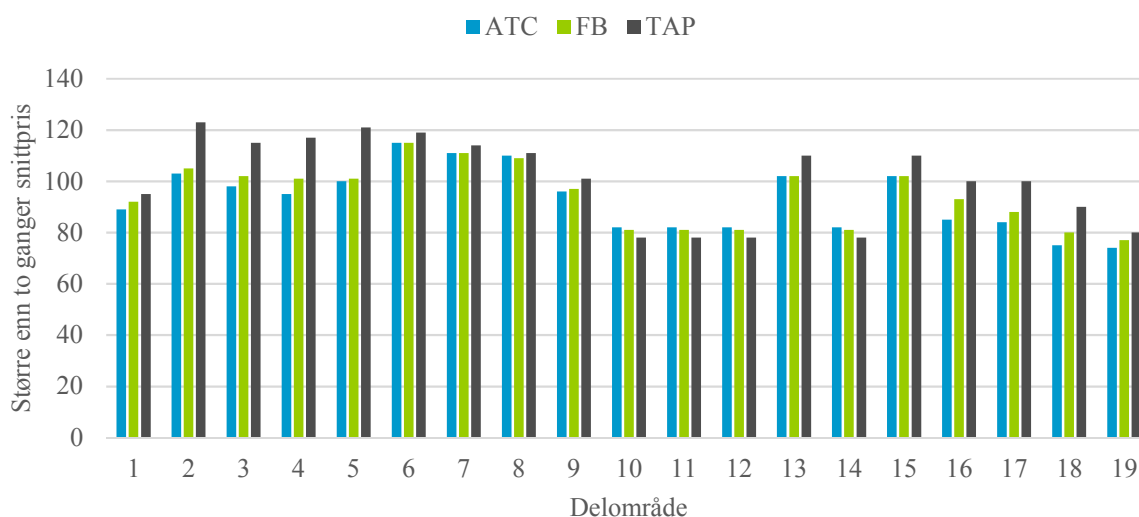
Tabell 7-1 viser den prosentvise endringen i flom for de ulike delområdene. Endringen er størst i delområdet 3, hvor det generelt er lite flom relativt til de andre delområdene. I delområdene med høyest endring målt i GWh, delområde 12, 15 og 17, tilsvarer endringen en liten andel av den totale mengden flom. Delområde 4, 6 og 7 har alle en økning i flom på om lag 20 GWh, noe som tilsvarer mellom 2,5 % og 4,2 % økning.

Tabell 7-1: Prosentvis endring i flom mellom ATC- og TAP-kjøringen (ATC i tabellen), og mellom FBMC- og TAP-kjøringen (FB i tabellen) for hvert delområde i Norge og Sverige.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ATC	0,6 %	2,6 %	7,0 %	3,8 %	2,0 %	3,9 %	3,0 %	1,7 %	0,3 %	-0,6 %
FB	0,7 %	1,8 %	5,8 %	4,2 %	1,7 %	3,9 %	2,5 %	1,7 %	0,7 %	0,3 %
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
ATC	1,1 %	1,5 %	0,7 %	3,4 %	0,7 %	-0,9 %	2,1 %	1,9 %	1,2 %	
FB	1,5 %	1,9 %	0,0 %	1,6 %	0,6 %	1,6 %	1,8 %	1,6 %	1,0 %	

Kriterium 4: Systematiske pristopper på vinteren unngås

Figur 7-7 viser forekomsten av priser høyere enn to ganger gjennomsnittspris i hvert delområde, over 29 værår, for Norge og Sverige. Resultatene viser at det stort sett er flere pristopper for TAP-kjøringen, sammenlignet med ATC- og FBMC-kjøringen.



Figur 7-7: Oversikt over antall pristopper, prisavsnitt med en pris større enn to ganger gjennomsnittlig pris, for delområdene i Norge og Sverige for TAP-, ATC- og FBMC-kjøringen.

7.2 Resultater fra analyse av basisscenarioet

Hensikten med dette kapittelet er å presentere resultatene fra analysen av basisscenarioet. Ved å benytte resultatene fra modellkjøringene, beskrevet i kapittel 6.3, er nytteverdien estimert. I tillegg presenteres forklaringsvariablene beskrevet i samme kapittel.

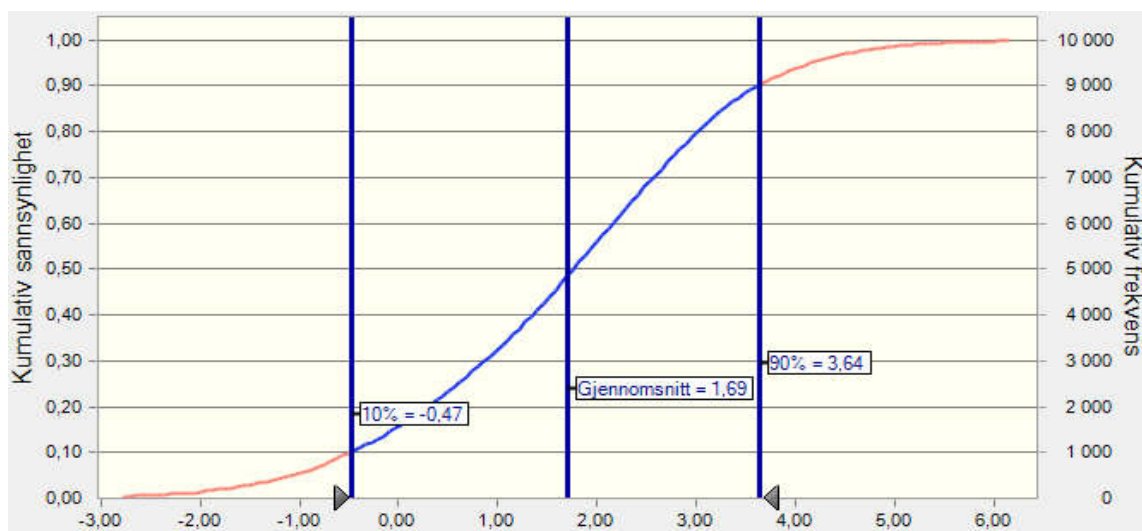
Resultater for estimert nytteverdi

Nytteverdien knyttet til total, regulerbar og uregulerbar produksjon er presentert i tabell 7-2. Formel 6-1 er benyttet for å beregne det totale produsentoverskuddet, mens formel 6-2 og 6-3 er benyttet for å beregne henholdsvis produsentoverskuddet knyttet til regulerbar og uregulerbar vannkraftproduksjon.

Nytteverdien estimeres til å være 1,7 M€/år samlet sett for Norge og Sverige. Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null estimeres til å være 84 %. 80 % konfidensintervallet går fra -0,5 M€/år til 3,6 M€/år, og har dermed en lengde på 4,1 M€/år. Det er en økning i nytteverdien for regulerbar produksjon, mens nytteverdien knyttet til uregulerbar produksjon reduseres. Det er knyttet lavere usikkerhet til nytteverdien for uregulerbar produksjon. Figur 7-8 viser den kumulative sannsynlighetsfordelingen til den totale nytteverdien. Sannsynlighetsfordelingen er noe forskjøvet mot venstre.

Tabell 7-2: Estimert nytteverdi, fra basisscenarioet, ved å tilpasse vannkraftproduksjonen til en flytbasert markedskobling.

Nytteverdi [M€/år]	P10	Forventet	P90
Regulerbar produksjon	0,6	2,3	4,0
Uregulerbar produksjon	-2,0	-0,6	0,8
Total produksjon	-0,5	1,7	3,6



Figur 7-8: Kumulativ sannsynlighetsfordeling for den totale nytteverdien fra basisscenarioet.

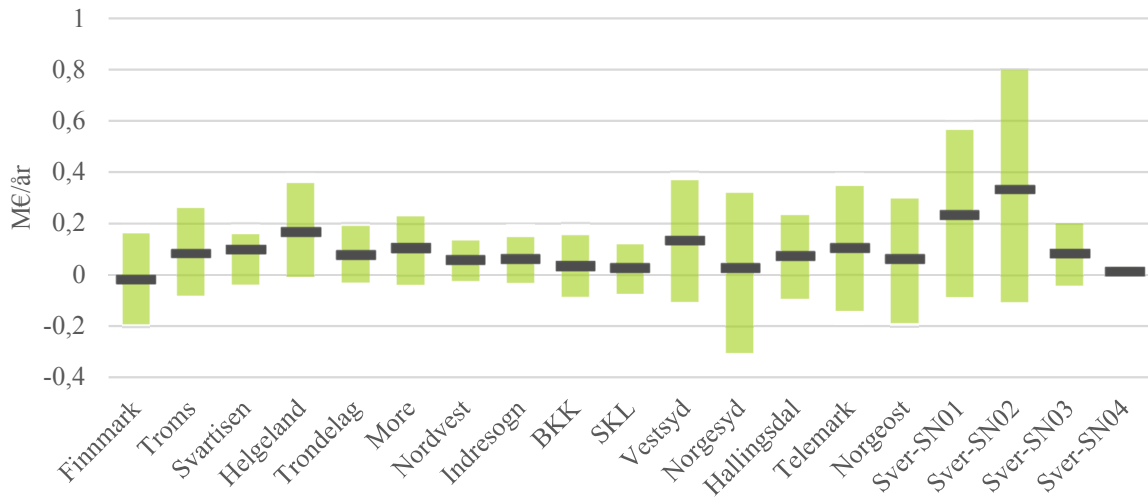
Tabell 7-3 viser differansen, mellom ATC- og FBMC-kjøringene, for forklaringsvariablene. Forklaringsvariablene er beskrevet i kapittel 6.3.3. Som vist i tabell 7-3 øker både den timesvektede og den volumvektede prisen når produsentene tilpasser seg. Samtidig øker den regulerbare produksjonen og den uregulerbare produksjonen avtar. I tillegg observeres det en relativt liten økning i totalproduksjon og en reduksjon i mengden flom.

Tabell 7-3: Differansen mellom ATC- og FBMC-kjøringen for ulike variabler som påvirker den totale nytteverdien for basisscenarioet.

Forklaringsvariabel	Verdi
Timesvektet pris [€/GWh]	2,8
Volumvektet pris [€/GWh]	7,3
Regulerbar produksjon [GWh/år]	95,8
Uregulerbar produksjon [GWh/år]	-84,9
Total produksjon [GWh/år]	10,9
Flom [GWh/år]	-13,7

Resultater for estimert nytteverdi per delområde

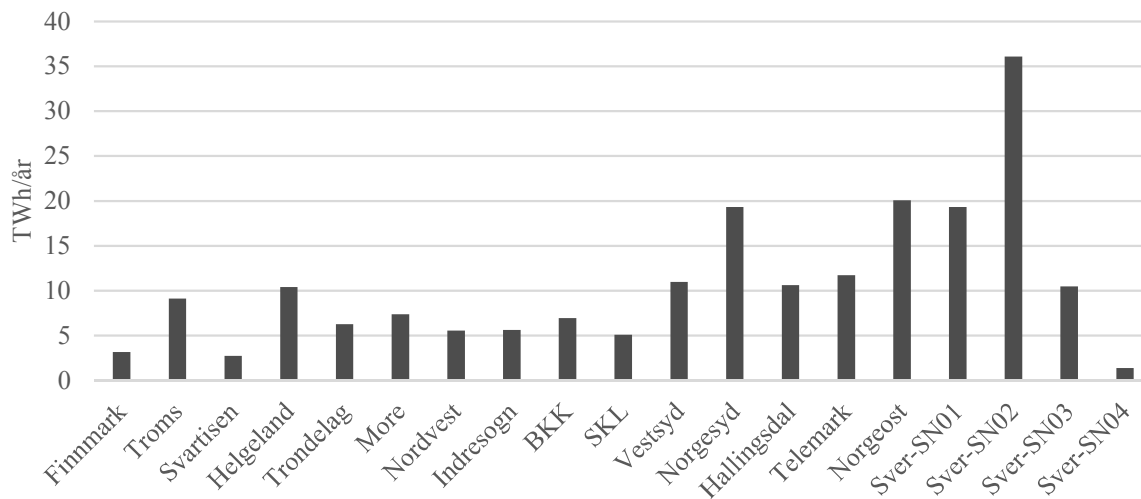
Nytteverdien per delområde er presentert i figur 7-9. Formel 6-4 er benyttet for å beregne produsentoverskuddet per delområde, før nytteverdien estimeres. Strekene i figuren er nytteverdien, mens båndet er verdiens 80 % konfidensintervall.



Figur 7-9: Nyttverdien, for hvert delområde, ved å tilpasse vannkraftproduksjonen til en flytbasert markedskobling, med tilhørende 80 % konfidensintervall

Sver-SNO2 og Sver-SNO1 er delområdene hvor den totale nytteverdien er størst. Nyttverdien er estimert til å være henholdsvis 0,3 ME/år og 0,2 ME/år. Finnmark er eneste delområdet hvor verdien er negativ. Usikkerheten, målt ved 80 % konfidensintervall, varierer mellom delområdene.

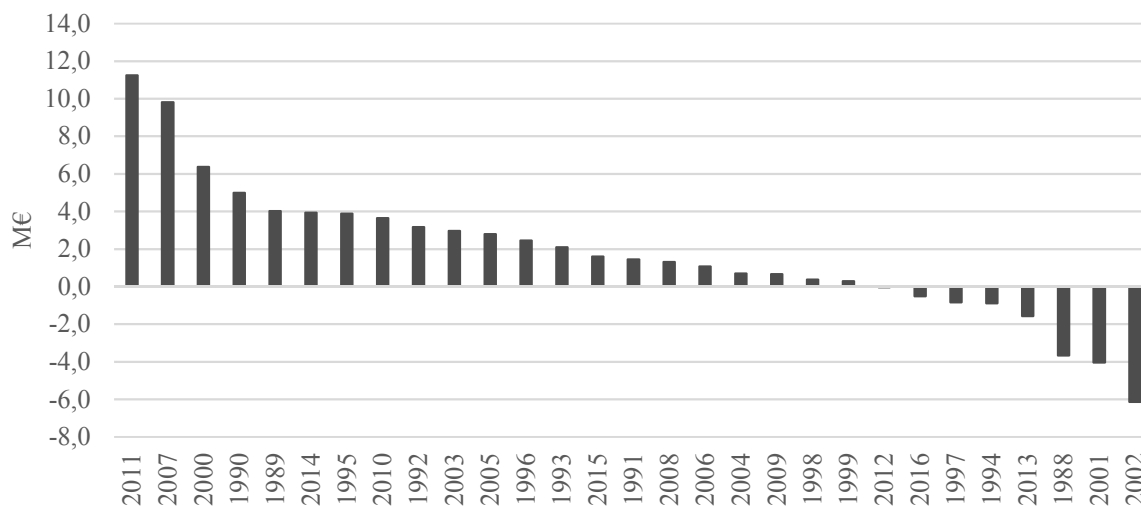
For å kunne si noe om nytteverdiens relative størrelse, viser figur 7-10 den gjennomsnittlige årsproduksjonen i hvert delområde. Figuren viser at det er relativt stor forskjell i produksjon mellom delområder.



Figur 7-10: Gjennomsnittlig årsproduksjon i delområdene i Norge og Sverige.

Resultater for estimert nytteverdi per værår

Nytteverdien varierer mellom ulike værår, slik figur 7-11 viser. Formel 6-5 er benyttet for å beregne det årlige produsentoverskuddet. Den estimerte nytteverdien er høyest i 2011 og 2007, med en verdi lik henholdsvis 11,3 M€ og 9,8 M€. I 2002 og 2001 er nytteverdien lavest med en verdi lik henholdsvis -6,0 M€ og -4,0 M€. Nyttverdi er positiv i 21 av de 29 værårene. Usikkerheten er relativt stor. Et 80 % konfidensintervall har i gjennomsnitt en lengde på 20 M€ for hvert værår. Figur 7-11 bør ses i sammenheng med tilsig per værår. Se vedlegg A4.



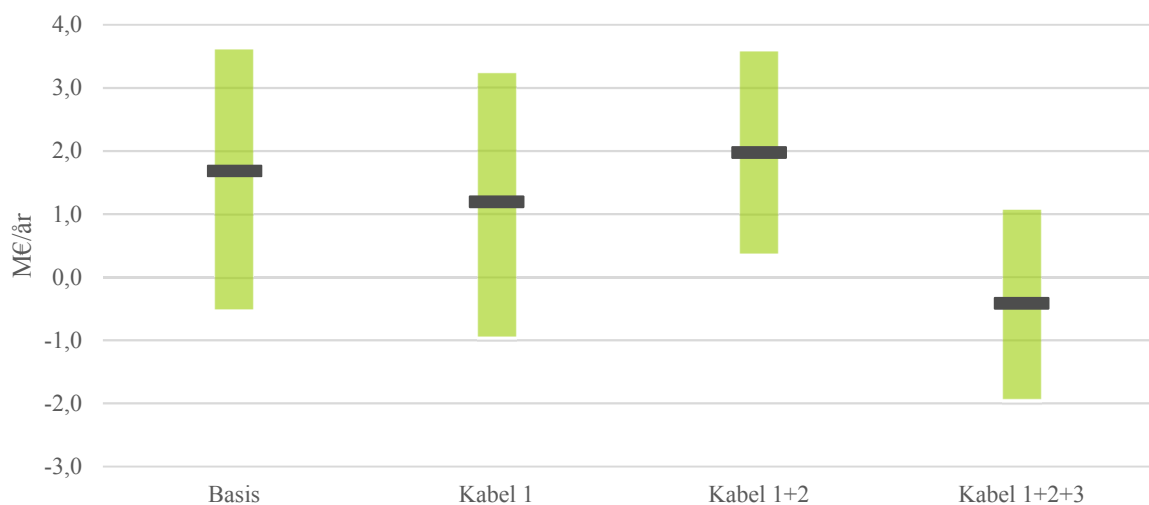
Figur 7-11: Nyttverdien, for hvert værår, ved å tilpasse vannkraftproduksjonen til en flytbasert markedskobling.

7.3 Resultater fra sensitivitetsanalyse

For å undersøke hvor sensitiv nytteverdien fra basisscenarioet er for endringer i underliggende parametere, endres forbruket, installert vindkraftkapasitet, antall mellomlandsforbindelser og kalibreringsverdiene i henhold til beskrivelsen i kapittel 6.4. Produsentoverskuddet for modellkjøringene beregnes ved å benytte formel 6-1. Nytteverdien estimeres og forklaringsvariablene beregnes på samme måte som for basisscenarioet. Se henholdsvis kapittel 6.3.2 og kapittel 6.3.3.

Mellomlandsforbindelser

Figur 7-12 viser hvordan nytteverdien og tilhørende usikkerhet endres etter hvert som utbygging av de tre mellomlandsforbindelser gjennomføres. Figuren viser at nytteverdien faller når kabel 1 legges til. Usikkerheten er tilnærmet uforandret, som lengden på de to konfidensintervallene til venstre viser. Usikkerheten reduseres for kabel 1+2 og kabel 1+2+3. Samtidig øker nytteverdien til 2,0 M€/år for kabel 1+2, før den faller til -0,4 M€/år for kabel 1+2+3.



Figur 7-12: Nytteverdiens sensitivitet for utbygging av mellomlandsforbindelser med tilhørende 80% konfidensintervall.

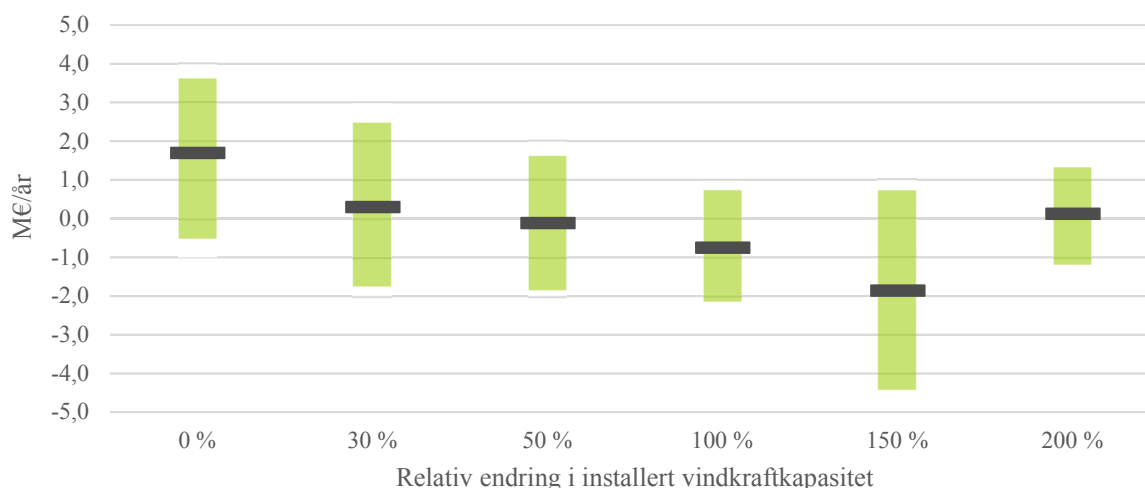
Tabell 7-4 viser sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null, ved inkluderingen av tre nye mellomlandsforbindelser. Sannsynligheten er godt over 70 % for kabel 1 og kabel 1+2. Med alle tre kablene faller sannsynligheten lik 35 %.

Tabell 7-4: Utbygging av mellomlandsforbindelser: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null.

Mellomlandsforbindelser	Kabel 1	Kabel 1+2	Kabel 1+2+3
P(nytteverdi > 0) [%]	77	95	35

Installert vindkraftkapasitet

Figur 7-13 viser hvordan nytteverdien og tilhørende usikkerhet endres når installert vindkraftkapasitet justeres opp. Det observeres en fallende trend frem til og med en justering på + 150 %. Her øker også usikkerheten. Deretter øker nytteverdien for en justering på + 200 %. Usikkerheten, målt ved 80 % konfidensintervall, halveres mellom de to verdiene lengst til høyre i figuren.



Figur 7-13: Nyttieverdiens sensitivitet for endring av vindkraftkapasitet med tilhørende 80% konfidensintervall. OBS: Ikke lik avstand mellom verdiene på x-aksen.

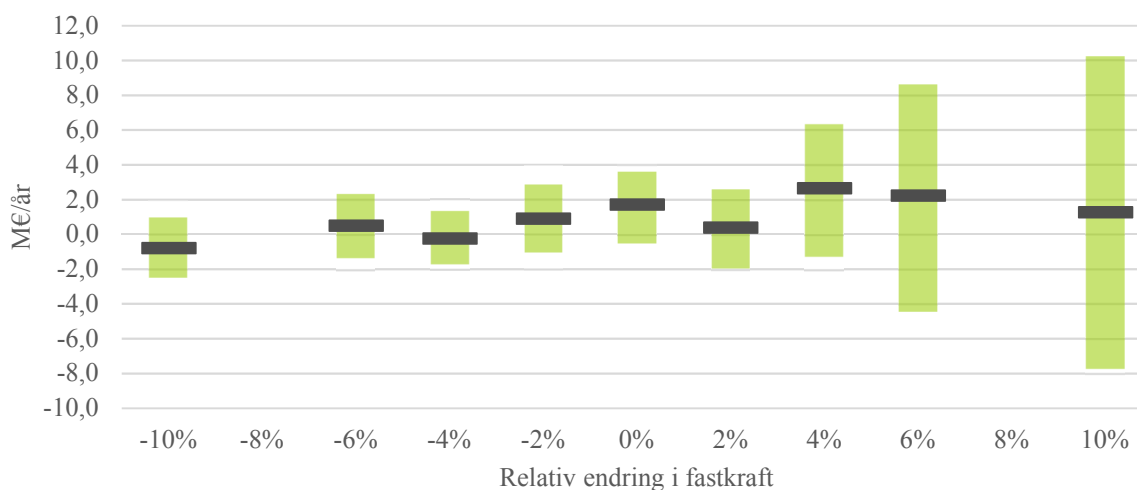
Tabell 7-5 viser sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null, ved oppjustering av mengden installert vindkraftkapasitet. Sannsynligheten faller jevnt fra 59 % for justeringen på + 30 % til 19 % for justeringen på 150 %. Deretter øker sannsynligheten til 59 % for justeringen på + 200 %.

Tabell 7-5: Installert vindkraftkapasitet: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null.

Installert vindkraftkapasitet	+ 30 %	+ 50 %	+ 100 %	+ 150 %	+ 200 %
P(nytteverdi > 0) [%]	59	46	25	19	59

Kraftforbruk

Figur 7-14 viser hvordan nytteverdien og tilhørende usikkerhet endres når mengden fastkraft justeres opp og ned. Figuren viser at nytteverdien er lavere enn i basisscenarioet når mengden fastkraft senkes, mens usikkerheten er tilnærmet uforandret. Nytteverdien faller også når fastkraften justeres opp med + 2 % og + 10 %, mens for justeringer på + 4 % og + 6 % øker nytteverdien. Usikkerheten stiger kraftig fra en justering på + 2 % og utover.



Figur 7-14: Nytteverdiens sensitivitet for endring av forbruk med tilhørende 80% konfidensintervall.

Tabell 7-6 viser sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null, ved nedjustering av mengden fastkraft. Sannsynligheten er høyere enn 50 % i alle tilfeller. Høyeste er verdien for justeringen på - 6 %, hvor sannsynligheten er 83 %.

Tabell 7-6: Forbruk justert ned: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null.

Kraftforbruk justert ned	-10 %	-6 %	-4 %	-2 %
P(nytteverdi > 0) [%]	60	83	67	57

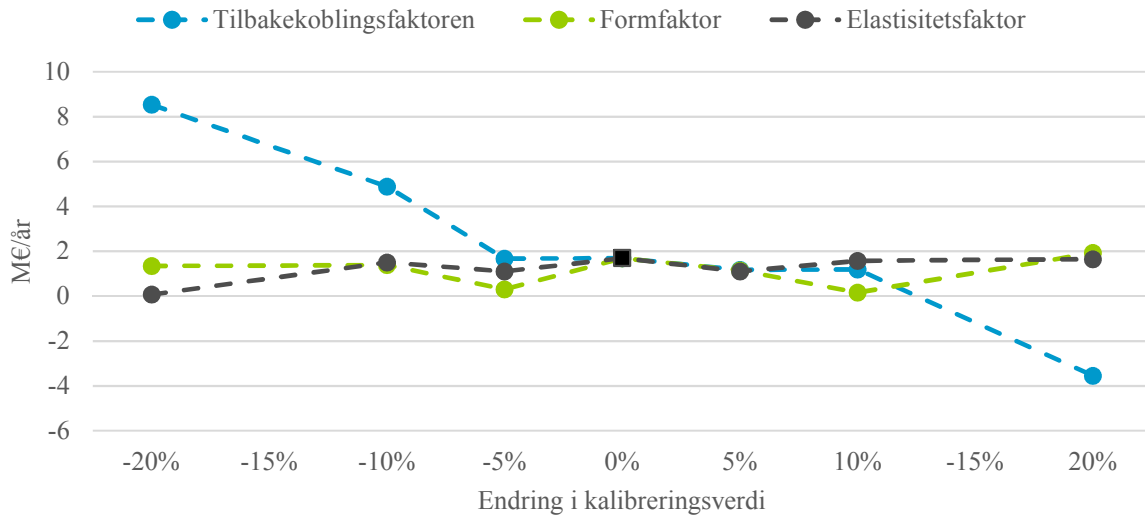
Tabell 7-7 viser sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null, ved oppjustering av mengden fastkraft. Sannsynligheten varierer fra 72 % til 27 %, og faller etter hvert som forbruket justeres opp.

Tabell 7-7: Forbruk justert opp: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null.

Kraftforbruk justert opp	+ 2 %	+ 4 %	+ 6 %	+ 10 %
P(nytteverdi > 0) [%]	72	40	65	27

Kalibreringsverdiene

Figur 7-15 viser hvordan nytteverdien endres når de tre kalibreringsfaktorene justeres opp og ned. Når tilbakekoblingsfaktorene justeres ned, indikere resultatene at nytteverdien øker, spesielt for de to høyeste nedjusteringene. Nytteverdien faller når tilbakekoblingsfaktorene justeres opp. Ved en justering på + 20 % er nytteverdien negativ. Det samme spennet vises ikke for formfaktoren og elastisitetsfaktoren. Ved justering av formfaktoren varierer nytteverdien usystematisk. Samme tendens observeres ved justering av elastisitetsfaktorene. For kalibreringsfaktorene er 80 % konfidensintervallet presentert i hver av faktorenes respektive tabell.



Figur 7-15: Følsomhetsdiagram for justering av kalibreringsfaktorene.

Tabell 7-8 viser sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null og lengden på 80 % konfidensintervallet, ved opp- og nedjustering av tilbakekoblingsfaktoren. Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null varierer mellom 78 % og 93 %, med unntak av justeringen på +20 %. Usikkerheten, målt ved lengden av konfidensintervallet, er mellom 3,6 M€/år og 26,1 M€/år, og ser ut til å øke ved både oppjustering og nedjustering.

Tabell 7-8: Tilbakekoblingsfaktoren: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null og 80 % konfidensintervall.

Tilbakekoblingsfaktoren	-20 %	-10 %	-5 %	+5 %	+10 %	+20 %
Lengden av 80 % KI [M€/år]	26,1	10,2	4,3	3,6	4,0	6,9
P(nytteverdi > 0) [%]	78	93	83	79	79	10

Tabell 7-9 viser sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null og lengden på 80 % konfidensintervallet, ved opp- og nedjustering av formfaktoren. Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null varierer fra mellom 50 % til 86 %. Usikkerheten, målt ved lengden av konfidensintervallet, er mellom 4,1 M€/år og 4,8 M€/år.

Tabell 7-9: Formfaktoren: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null og 80 % konfidensintervall.

Formfaktoren	- 20 %	- 10 %	- 5 %	+ 5 %	+ 10 %	+ 20 %
Lengden av 80 % KI [M€/år]	4,2	4,8	4,4	4,1	4,1	4,5
P(nytteverdi > 0) [%]	79	76	56	74	50	86

Tabell 7-10 viser sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null og lengden på 80 % konfidensintervallet, ved opp- og nedjustering av elastisitetsfaktoren. Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null holder seg over 70 %, med unntak av justeringen på - 20 %. Usikkerheten, målt ved lengden av konfidensintervallet, er mellom 4,1 M€/år og 5,7 M€/år.

Tabell 7-10: Elastisitetsfaktoren: Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null og 80 % konfidensintervall

Elastisitetsfaktoren	- 20 %	- 10 %	- 5 %	+ 5 %	+ 10 %	+ 20 %
Lengden av 80 % KI [M€/år]	5,4	5,7	4,7	4,5	5,3	4,1
P(nytteverdi > 0) [%]	51	79	74	73	80	86

8 Diskusjon

Hensikten med dette kapittelet er å diskutere fremgangsmåten og resultatene fra henholdsvis kapittel 6 og kapittel 7. Kapittel 8.1 diskuterer fremgangsmåten for analysen, mens kapittel 8.2 diskuterer resultatene fra analysen. Diskusjonen av resultatene gjøres i tre deler: vurdering av behov for ny kalibrering, basisscenarioet og sensitivitetsanalyse.

8.1 Diskusjon av fremgangsmåte for analyse

I oppgaven gjennomføres 20 ATC-kjøringer og 20 FBMC-kjøringer. Dette for å øke presisjonen i resultatene og for å kvantifisere usikkerheten som stammer fra variasjon i resultatene mellom like modellkjøringer. I intervju med en informant i Statnett, kom det frem at de normalt benytter en usikkerhet på ± 1 M€/år når de undersøker en endring i samfunnsøkonomisk nytte. Samtidig er denne usikkerheten i liten grad undersøkt. Statnett gjennomfører normalt 5 til 8 modellkjøringer i sine analyser. I noen tilfeller benyttes et gjennomsnitt av disse modellkjøringene for å beregne den totale samfunnsøkonomiske nytten.

Innledende undersøkelser i denne oppgaven viste at nytteverdien, definert som endringen i produsentoverskudd, var mellom 1 M€/år og 3 M€/år. Denne verdien er lav sammenliknet med usikkerheten som Statnett benytter for den totale samfunnsøkonomiske nytten. Hvorvidt Statnetts usikkerhetsmål er gyldig også for endring i produsentoverskudd er uklart. Statnett har liten erfaring med dette. Det vurderes derfor som hensiktsmessig å gjennomføre en rekke modellkjøringer.

Crystal Ball benyttes for å tilpasse en sannsynlighetsfordeling til produsentoverskuddene. Deretter benyttes Monte Carlo-simuleringer for å estimere nytteverdien. Ideelt sett burde flere enn 20 verdier ligge til grunn når en sannsynlighetsfordeling tilpasses. Det er derfor knyttet usikkerhet til formen på sannsynlighetsfordelingen. Den sanne sannsynlighetsfordelingen kan ha både ulik skjevhet og kurtose sammenliknet med den tilpassede sannsynlighetsfordelingen. For eksempel kan sannsynlighetsfordelingen være spissere enn den virkelige usikkerheten tilsier. Usikkerheten vil i et slikt tilfelle underestimeres. Det motsatte vil være tilfellet dersom sannsynlighetsfordelingen er flatere enn det den virkelige usikkerheten tilsier. Nytteverdien vil også feilestimeres dersom sannsynlighetsfordelingen er forskjøvet for mye eller for lite. Det gjennomføres ikke flere modellkjøringer ettersom hver modellkjøring tar omtrent 30 minutter. Like fullt er Samkjøringsmodellen en robust modell utviklet gjennom mange år. Normalt

gjennomføres ikke Monte Carlo-simuleringer for å kvantifisere usikkerheten til resultatene. Derfor kan det argumenteres for at målet på usikkerheten til nytteverdien er et viktig resultat i seg selv, og gir et langt klarere bilde enn et gjennomsnitt av kjøringene.

De underliggende parameterne i sensitivitetsanalysene er valgt med utgangspunkt i en kjent svakhet i Samkjøringsmodellen, kalibreringen, og tre dagsaktuelle utviklingstrekk fra kraftsystemet med høy sannsynlighet for å inntreffe: endret forbruk, økt installert vindkraftkapasitet og utbygging av mellomlandsforbindelser. Ideelt sett burde sensitivitetsanalysen undersøkt en rekke parametere. Det vurderes at en slik analyse vil være for omfattende i denne sammenheng. Dette skyldes den betydelige variasjonen i resultatene fra Samkjøringsmodellen, som gjør at flere modellkjøringer må gjennomføres. I vårt tilfelle krever Crystal Ball minst 15 verdier for å kunne tilpasse en sannsynlighetsfordeling til det beregnede produsentoverskuddet. For hver parameter som undersøkes må det derfor gjennomføres minst 30 modellkjøringer. Dette tar om lag 15 timer. I tillegg justeres hver parameter flere ganger, noe som resulterer i enda flere modellkjøringer.

Kvantifiseringen av den relative endringen i hver underliggende parameter baseres på forventninger knyttet til utviklingen i kraftsystemet. Dermed skiller de valgte endringene seg fra en standard sensitivitetsanalyse. Hver parameter endres ulikt, både målt i GWh og i prosent. Svakheten ved denne fremgangsmåten er at parameterne ikke direkte kan sammenlignes med hverandre. I tillegg vil det være lite hensiktsmessig å lage et følsomhetsdiagram som inkluderer alle underliggende parametere, da endringene ikke er like store relativt til basisscenarioet. Dermed kan ikke stigningstallene fra et eventuelt følsomhetsdiagram benyttes for å avgjøre hvilke underliggende parametere den estimerte nytteverdien er mest sensitiv for. Fordelen ved fremgangsmåten er dermed at sensitivitetsanalysen er dagsaktuell og virkelighetsnær. Analysen vil derfor like fullt fange opp hvilke parametere nytteverdien i realiteten er sensitiv for.

Nytteverdien, beregnet med endringer i de underliggende parameterne, gir en indikasjon på hvor sensitivt resultatet er. En svakhet med denne metoden er at det ikke simuleres en total forventet fremtidig nytteverdi. Et alternativ kunne vært en utvidelse av simuleringsmodellen laget i Crystal Ball. Utvidelsen ville skjedd ved at ulike justeringer av underliggende parametere tilordnes en sannsynlighet. Dermed kunne en sannsynlighetsfordeling tilpasses hver underliggende parameter. Til slutt ville forventet endring i nytteverdi simuleres basert på sannsynlighetsfordelingene til alle underliggende parametere. Kraftsystemet er komplekst og de fleste variablene avhenger av hverandre. I stedet for å utvide simuleringsmodellen, ville et

bedre alternativ vært å undersøke andre basisdatasett i Samkjøringsmodellen. Statnett utarbeider basisdatasett for blant annet 2020, 2025 og 2030. Disse datasettene inneholder detaljert informasjon om den forventede fremtidige utviklingen i kraftsystemet. Det vurderes derfor som mer hensiktsmessig å gjennomføre flere modellkjøringer med disse datasettene heller enn å utvide simuleringsmodellen i Crystal Ball, slik beskrevet tidligere.

8.2 Diskusjon av resultater fra analyse

Denne delen vil diskutere resultatene fra analysen. Se kapittel 7. Dette gjøres i tre kapitler som tar for seg vurdering av behov for ny kalibrering, basisscenarioet og sensitivitetsanalysen. Det er ikke funnet litteratur på hvordan vannverdiberegningen påvirkes av overgangen fra ATC til FBMC. Dermed representerer oppgaven i så måte et nybrottsarbeid. Diskusjonen gir plausible forklaringer basert på teori om Samkjøringsmodellen, kraftmarkedet og kraftsystemet.

8.2.1 Diskusjon av resultater for vurdering av behov for ny kalibrering

Hensikten med dette kapitlet er å diskutere resultatene fra vurderingen av behov for ny kalibrering. Dette innebærer å diskutere hvorvidt resultatene fra kapittel 7.1 oppfyller de fire kriteriene for gode vannverdier.

Under antagelsen om at TAP-kjøringen oppfyller *kriterium 1*, magasinene utnyttet godt, vurderes det dithen at dette kriteriet også er oppfylt for ATC- og FBMC-kjøringen. Som både figur 7-3 og figur 7-4 viser, er det liten forskjell i hvordan vannkraftprodusentene disponerer sine magasiner

Det observeres svært små mengder rasjonering i alle modellkjøringene. Det er ingen målbar forskjell mellom TAP-kjøring og ATC- og FBMC-kjøringen, hverken i Sverige eller i Norge. *Kriterium 2*, store mengder rasjonering unngås, er derfor oppfylt under antagelsen om at TAP-kjøringen representerer gode vannverdier. Dette er i overensstemmelse med hvordan isopriskurvene ligger i forhold til hverandre. Isopriskurvene ligger høyere i ATC- og FBMC-kjøringen relativt til TAP-kjøringen. Det innebærer at det til enhver pris er mer vann i magasinet i ATC- og FBMC-kjøringen. Dette indikerer en lavere sannsynlighet for rasjonering, gitt at kraftprisen er tilnærmet den samme i de tre modellkjøringene.

Hvorvidt *kriterium 3*, store mengder flom unngås, oppfylles er ikke like klart. Det er en tendens til at mengden flom øker fra TAP-kjøringen til ATC- og FBMC-kjøringen, slik figur 7-5 viser. Figur 7-6 bekrefter denne tendensen ved å vise at mengden flom øker i de aller fleste delområder, mens tabell 7-1 viser at denne økningen er relativt liten sammenlignet med den totale mengden flom. At mengden flom øker, samtidig som mengden rasjonering er lik, indikerer at en ny kalibrering kan være fordelaktig. En nedjustering av tilbakekoblingsfaktoren vil senke isopriskurvene. Se kapittel 4.1.3. Dette vil trolig redusere mengden flom, samtidig som mengden rasjonering ikke endres. På den ene siden veier dette for at det er riktig å gjennomføre en ny kalibrering.

På den andre siden er verdien av flomvannet trolig lav. Grunnen er at produsentene vil produsere ved maksimal kapasitet for å unngå flom. Det er rimelig å anta at når ett magasin er i fare for flom, vil andre magasin være i samme situasjon. Dette gjør tilbudssiden i kraftmarkedet stor. Videre er det trolig at flom forekommer enten på våren i smelteperioden eller ved store uventede regnbyger, altså ikke i perioder med normalt høy etterspørsel etter kraft. Høyt tilbud og lav etterspørsel gir et prispress nedover. Dermed vil den økonomiske konsekvensen for vannkraftprodusentenes produsentoverskudd være liten. For denne oppgaven innebærer dette trolig en marginal endring i kraftprodusentenes nytteverdi ved å tilpasse seg FBMC. I tillegg er det vanskelig å forutsi hvilke konsekvenser en ny kalibrering har på de øvrige to kriteriene. Ulempen, økt flomtap, vurderes mindre enn fordelene, velutviklede kalibreringsverdier. Samtidig er den prosentvise økningen i flom relativt beskjeden, slik tabell 7-1 viser. Dermed veies det dithen at *kriterium 3* oppfylles.

Pristoppene forekommer vinterstid, når etterspørselen er stor og tilsiget lavt. Definisjonen av en pristopp settes til to ganger gjennomsnittlig pris. I denne sammenheng er det forskjellen i antall pristopper som undersøkes, ikke tallet i seg selv. Figur 7-7 viser at det i 15 av 19 delområder, observeres en reduksjon i antall pristopper for ATC- og FBMC-kjøringen relativt til TAP -kjøringen. Ettersom det er en reduksjon i antall pristopper konkluderes det med at *kriterium 4*, systematiske pristopper på vinteren unngås, er oppfylt. Reduksjonen stammer trolig fra at isopriskurvene til TAP -kjøringen i noen tilfeller ligger lavere enn for de to andre kjøringene.

Avviket mellom TAP-kjøringen og ATC/FBMC-kjøringen vurderes som smått i det store bildet. Alle kriteriene til gode vannverdier vurderes til å være oppfylt. Med utgangspunkt i oppgavens problemstilling vurderes det som mer hensiktsmessig å benytte like og velutviklede

kalibreringsverdier, heller enn å gjennomføre en automatisk kalibrering. Et annet hensyn som veier for dette, er at Bøhnsdalen et al. (2016) benytter de samme kalibreringsverdiene for alle modellkjøringene, når kraftsystemet analyseres frem mot 2040 (Døskeland 2018b). En endring i datasettet som tilsvarer endringen i kraftsystemet fra 2020 til 2040, er trolig langt større enn endringen knyttet til at Samlast og Samnett inkluderes i Samkjøringsmodellens strategidel. Resultatene vurderes derfor til å være tilstrekkelig til å konkludere med at det heller ikke er behov for å gjennomføre flere modellkjøringer.

8.2.2 Diskusjon av resultater fra basisscenarioet

Diskusjon av estimert nytteverdi

Det forventes at det er en bedre strategi for vannkraftprodusentene å tilpasse produksjonen til en FBMC, når denne markedskoblingen innføres i Norden. Dermed forventes det at produsentene får en positiv nytteverdi ved å tilpasse seg, noe resultatene tilsier. Resultatene i tabell 7-2 viser at kraftprodusenters nytteverdi er 1,7 M€/år samlet sett for Norge og Sverige.

For å kunne diskutere hvor den positive nytteverdien stammer fra, undersøkes nytteverdien fra uregulerbar og regulerbar produksjon. Det er en positiv nytteverdi knyttet til regulerbar produksjon på 2,3 M€/år, og en negativ nytteverdi knyttet til uregulerbar produksjon på -0,6 M€/år.

Nytteverdien er en funksjon av pris og volum. Tabell 7-3 viser at den regulerbare kraftproduksjonen øker med i overkant av 95 GWh/år, mens den uregulerbare produksjonen reduseres med -85 GWh/år. Ved å tilpasse sin produksjonsstrategi til FBMC, får kraftprodusentene dermed mer kontroll over egen produksjon. Mer kontroll fører trolig til at produsentene kan produsere mer kraft når prisen er høy. Ettersom den volumvektede prisen øker, kan resultatene tyde på at produsentene har klart å produsere mer kraft når prisen er høy. Produsentene har dermed i gjennomsnitt oppnådd en høyere pris for det produserte volumet. Dette er i overensstemmelse med forventningene, og tilsynelatende hovedgrunnen til den økte nytteverdien.

Uregulerbare produsenter har trolig ikke mulighet til å dra nytte av en økt volumvektet pris, ettersom denne produksjonen ikke kan tilpasses. Likevel kan det forventes en positiv nytteverdi fra uregulerbar produksjon, ettersom den timesvektede prisen øker. Dette stemmer ikke overens med resultatene. Trolig skyldes dette at det er en reduksjon i uregulerbar produksjon.

Resultatene i tabell 7-2 viser at nytteverdien, med 80 % sannsynlighet, befinner seg innenfor intervallet -0,5 M€/år og 3,6 M€/år. Usikkerheten er dermed relativt høy. Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null er lik 84 %. Dette indikerer at nytteverdien ved å tilpasse seg FBMC er lav, men trolig større enn null. Usikkerheten i resultatene stammer fra at Samkjøringsmodellen gir ulikt resultat selv med samme modellgrunnlag, datasett og brukerinnstillinger. Som diskutert i kapittel 8.1, ville trolig resultatene vært mer nøyaktig dersom antall modellkjøringer hadde vært høyere. Dette indikerer ikke nødvendigvis at den beregnede usikkerheten reduseres.

Den kumulative sannsynlighetsfordelingen i figur 7-8 viser at den estimerte nytteverdien, forventningsverdien, ligger mot høyre i konfidensintervallet. Dette betyr at sannsynlighetsfordelingen er venstreskjev, og at nedsiden tilsynelatende er større enn oppsiden. Dermed er risikoen større enn muligheten.

Ved at produsentene tilpasser seg forventes det i utgangspunktet at markedet som helhet blir mer velfungerende. I et velfungerende marked utnyttes kraftsystemet bedre. På bakgrunn av dette forventes en reduksjon i timesvektet pris. Derimot tilsier resultatene en svak økning i timevektet pris, dersom produsentene tilpasser seg. Endringen i regulerbar produksjon, uregulerbar produksjon og flom peker i to ulike retninger:

- Økt regulerbar produksjon kan tyde på at produsentene i større grad kan produsere når prisene i markedet er høye. Økt tilbud kan gi lavere pris i disse timene, noe som resulterer i lavere pristopper. Dette indikerer lavere timesvektet pris.
- Redusert uregulerbar produksjon og flom kan tyde på mindre produksjon i perioder med lave priser. Se diskusjon av *kriterium 3* i kapittel 8.2.1. Redusert tilbud i disse perioden kan gi høyere pris, noe som resulterer i at de laveste prisene øker.

Økning i timesvektet pris indikerer at den første effekten, effekten knyttet til økt regulerbar produksjon, er mindre enn den andre effekten, effekten knyttet til redusert uregulerbar produksjon og flom. Dette tyder også på at den timesvektede prisen varierer mindre når produsentene tilpasser seg FBMC. Dette stemmer overens med at det generelt forventes en mindre variasjon i pris ved innføringen av FBMC. Se kapittel 3.1.

En annen grunn til den økte nytteverdien kan være økt total produksjon. Ettersom det er gjennomført en seriesimulering i Samkjøringsmodellen, vil magasinfyllingen i første periode

for hver modellkjøring være lik. Se kapittel 4.2.4. Når det observeres en endring i produsert volum, stammer dette i hovedsak fra to ting: endring i mengden flom eller endring i magasinfylling i slutten av simuleringsperioden. En reduksjon i flom innebærer at mindre vann har strømmet forbi produksjonsklare kraftverk grunnet fulle magasin. Se kapittel 4.1.1. Dette vannet kan benyttes i produksjon på et senere tidspunkt. Er magasinfyllingen lavere ved slutten av simuleringsperioden, betyr det at det er produsert mer i løpet av simuleringsperioden. Da er mindre vann tilgjengelig for produksjon på et senere tidspunkt og det innebærer derfor ikke en reell økning i produksjon. Ettersom resultatene viser en reduksjon i mengden flom er det rimelig å anta at nytteverdien i større grad er reell.

Nytteverdi per delområde

Resultatene i figur 7-9 viser at kraftprodusentenes nytteverdi er positiv for alle delområder bortsett fra Finnmark. Årsaken til at Finnmark har negativ nytteverdi er ikke undersøkt. En trolig forklaring er at den regulerbare produksjonen reduseres og den uregulerbare produksjonen økes, i dette delområdet. Dette vil innebære at kraftprodusentene i Finnmark har mindre kontroll over egen produksjon, når de tilpasser seg FBMC.

Den reduserte nytteverdien stemmer ikke overens med hypotesen om at nytteverdien ved å tilpasse egen vannkraftproduksjon til en FBMC er positiv. Det er vanskelig å peke på en konkret årsak til hvorfor dette delområdet skiller seg ut. Med unntak av Finnmark er resultatene konsistente, ved at nytteverdien i alle delområder er større enn null. Dette styrker troverdigheten til at den totale nytteverdien er positiv.

Figur 7-10 viser kraftproduksjonen i hvert delområde. Ved å undersøke de fire delområdene med størst kraftproduksjon, viser resultatene at det ikke er noen klar sammenheng mellom høy kraftproduksjon og høy nytteverdi. Sammenhengen er sterkere mellom høy kraftproduksjon og høy usikkerhet. Det ser ut til at de fire delområdene med høyest kraftproduksjon, også har høyest usikkerhet, målt ved lengden på nytteverdiens 80 % konfidensintervall. For øvrig er usikkerheten relativt lik. Grunnet usikkerheten er det vanskelig å konkludere med at nytteverdien er betydelig høyere i noen delområder enn andre.

Selv om nytteverdien i de fleste delområder er positiv, indikerer ikke resultatene at nytteverdien er positiv for alle vannkraftprodusenter. Resultatene indikerer derimot at nytteverdien, samlet sett for alle vannkraftprodusenter i de fleste delområder, er positiv.

Nytteverdi per værår

Resultatene i figur 7-11 viser at det er relativt stor variasjon i den simulerte nytteverdien for ulike værår. Resultatene varierer fra 11,3 M€ i 2011 til -6,0 M€ i 2002. Værårene som ligger til grunn i Samkjøringsmodellen inkluderer informasjon om tilsig, vind og temperatur. Med tanke på at det nordiske kraftsystemet er dominert av vannkraft, vurderes årlig tilsig til å være den viktigste forklaringsvariabelen på variasjon i nytteverdi. Derfor undersøkes sammenhengen mellom resultatene i figur 7-11 og resultatene i vedlegg A4. Resultatene kan tyde på at værår med høyt tilsig gir en høyere nytteverdi. Fire av de fem årene med høyest tilsig er også blant de fem årene med høyest nytteverdi. Utover dette er det ingen andre tydelige sammenhenger mellom tilsig og nytteverdi.

Når vannkraftprodusentene skal avgjøre hvorvidt de skal tilpasse seg, vil nytteverdien over en lengere periode være mest relevant. Dermed er gjennomsnittet over alle årene mer interessant enn verdien for hvert enkelt år. Likevel kan forventninger knyttet til fremtidig tilsig gi en indikasjon på om nytteverdien er over- eller underestimert for fremtiden. Førland et al. (2015) forventer en økning i nedbør på mellom 7 % og 23 % innen 2100 i Norge. Dermed kan det også forventes mer tilsig i årene fremover. Resultatene knyttet til nytteverdien beregnet per værår kan derfor tyde på at nytteverdien av en tilpasset vannkraftproduksjon forventes å øke.

Det er en stor usikkerhet knyttet til nytteverdien i hvert enkelt værår. En mulig årsak er at det for hver eneste modellkjøring er en sammenheng mellom årene. Når like værår sammenlignes på tvers av modellkjøringer vil ikke vannkraftsystemet være i samme tilstand. Dette indikerer at det vil kunne være stor variasjon mellom værår fra ulike modellkjøringer, noe som gjenspeiles i usikkerheten knyttet til hvert av værårene i figur 7-11. Dette svekker sammenhengen mellom høyt tilsig og nytteverdi, da resultatene kan skyldes støy.

Oppsummering

Nytteverdien estimeres til å være 1,7 M€/år for basisscenarioet. Sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null er 84 %, noe som vurderes som relativt høyt. Likevel er det en betydelig usikkerhet knyttet til nytteverdien. 80 % konfidensintervallet går fra -0,6 M€/år til 3,6 M€/år.

Resultatene viser en økning i nytteverdien for alle undersøkte delområder, med unntak av Finnmark. På tross av at usikkerheten er stor, tyder dette på at vannkraftprodusentene i samtlige

delområder i Norge og Sverige, med ett unntak, totalt sett er tjent med å tilpasse sin vannkraftproduksjon til en FBMC.

Nytteverdien varierer mellom ulike værår. Den estimerte nytteverdien varierer fra over 11 M€ i 2011 til -6 M€ i 2002. Selv om usikkerheten er relativt stor, er den estimerte nytteverdien større enn null for 21 av 29 værår. Dette tyder på at det over tid er en bedre strategi å tilpasse seg FBMC, enn å ikke gjøre det.

8.2.3 Diskusjon av resultater fra sensitivitetsanalyse

I dette kapitlet diskuteres resultatene fra kapittel 7.3. Vurderingen av nytteverdiens sensitivitet for de underliggende parameterne klassifiseres på følgende måte: svært sensitiv, sensitiv, lite sensitiv og svært lite sensitiv. Klassifiseringen baseres på subjektive vurderinger, ved at resultatene fra de underliggende parameterne sammenliknes med resultatene fra basisscenarioet.

Mellomlandsforbindelser

Nytteverdien for kabel 1 og kabel 1+2 er svært like resultatene fra basisscenarioet. Se figur 7-12. Dette tyder på at den beregnede nytteverdien fra basisscenarioet er svært lite sensitiv for utbygging av de to første mellomlandsforbindelsene. Kabel 1+2+3 skiller seg fra basisscenarioet ved å ha en negativ nytteverdi. Nyttverdien fra basisscenarioet vurderes derfor som svært sensitiv for utbygging av kabel 1+2+3. Basert på resultatene fra kabel 1, kabel 1+2 og kabel 1+2+3 vurderes det dithen at nytteverdien totalt sett er *lite sensitiv* for utbygging av nye mellomlandsforbindelser.

Resultater fra Statnett et al. (2017b s. 87) viser at eksporten ut av Norge forventes å øke ved innføringen FBMC. Grunnen til det er en høyere utnyttelse av nettet. Trolig vil det ved økt eksportmulighet være en fordel for markedsaktøren å planlegge for mer eksport. Til forskjell fra overføringsnettet i et synkronområde er de undersøkte mellomlandsforbindelsene DC-kabler. Dermed kan mengden kraft som flyter i kablene styres. DC-kabler håndteres likt i både ATC og FBMC, og modelleres derfor likt i Samlast og Samnett. Det er rimelig å anta at markedsaktørene vil kunne forutse den nye eksportmuligheten like godt med en vannverdiberegning basert på ATC som ved en vannverdiberegning basert på FBMC. En forklaring på endringen i nytteverdien, spesielt ved alle tre mellomlandsforbindelser, kan derfor

være endringen i flytmønsteret i kraftsystemet (Statnett 2017b s. 44). Dette vil håndteres på ulik måte i dagens system, ATC, og med fremtidens system, FBMC.

Installert vindkraftkapasitet

Figur 7-13 viser at nytteverdien faller, relativt til basisscenarioet, når mengden vindkraft øker. Fra justeringen på + 30 % til justeringen på + 150 % faller sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null fra 59 % til 19 %, før den igjen øker til 59 % for en justering på + 200 %. Den forventede nytteverdien ligger rundt null, med unntak av justeringen på + 150 % hvor nytteverdien er klart negativ. Det konkluderes dermed med at nytteverdien fra basisscenarioet er *svært sensitiv* for mengden installert vindkraftkapasitet i kraftsystemet.

Som beskrevet i kapittel 2.2 er det forventet høyere handelsgrenser mellom delområder med FBMC enn med ATC. Dette innebærer at det kan overføres mer kraft i perioder med høy etterspørsel og flaskehals i nettet. Generelt produseres det mer vindkraft om vinteren når etterspørselen er størst. Samtidig vil vindkraftverk, med både marginalkostnad og alternativkostnad lik null, ligge først på tilbudskurven, som figur 2-2 viser. Basert på overnevnte, er det trolig at økt vindkraft i systemet fører til at vindkraften i større grad dekker etterspørselen i timer med flaskehals i nettet. Det kan bety at de økte handelsgrensene som følger av FBMC er mindre viktig å tilpasse seg til, ettersom handelsgrensen i stor grad benyttes av vindkraft. Dette vurderes som en mulig årsak til at nytteverdien faller når mengden installert vindkraft øker.

Kraftforbruk

Figur 7-14 viser at nytten faller relativt til basisscenarioet når forbruket reduseres. Når forbruket øker fra justeringen på + 4 % og oppover, øker også usikkerheten målt ved lengden på 80 % konfidensintervallet. For justeringen på + 10 % er usikkerheten mangedoblet.

Økningen i usikkerhet kan stamme fra at Samkjøringsmodellen har problemer med å finne løsninger på optimaliseringsproblemet. Dette kan tyde på at en økning i forbruk på over 23 TWh, + 10 % justeringen, er i meste laget.

Selv om nytteverdien ved to justeringer, + 4 % og + 6 %, er høyere enn i basisscenarioet er ikke sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null noe høyere. I basisscenarioet er sannsynligheten på 84 %, mens sannsynligheten for at nytteverdiene i de to justeringene er større enn null er på 83 % og 67 %. Dette, i kombinasjon med konfidensintervallene i figur 7-14, tyder på at de tilpassede sannsynlighetsfordelingene har lavere kurtose i disse to tilfellene,

relativt til basisscenarioet. Basert på diskusjonen konkluderes det med at nytteverdien er *svært sensitiv* for endring i forbruk.

Mengden fastkraft justeres med den samme prosentsats i hvert delområde. Dette innebærer at forskjellen mellom delområdene målt i GWh øker, når mengden fastkraft øker. Dette vil trolig forsterke flytmønsteret i dagens kraftnett, slik at flere flaskehals oppstår. Det motsatte vil trolig være tilfelle når forbruket reduseres. Tidligere studier, se kapittel 3.1, konkluderer med at den samfunnsøkonomiske nytten av å innføre FBMC er størst når det er flere flaskehals i nettet. Ut fra dette kan det avledes en hypotese om at kraftprodusentene har økt nytteverdi ved å tilpasse seg, relativt til basisscenarioet, når antall flaskehals øker. Resultatene støtter delvis hypotesen. Nytteverdien faller ved alle nedjusteringer av forbruket og usikkerheten er tilnærmet lik som i basisscenarioet, noe som støtter hypotesen. For økt forbruk er det liten endring i nytteverdien, og stor økning i usikkerheten. Dette støtter i liten grad hypotesen.

Kalibreringsverdiene

Usikkerheten, målt ved lengden av 80 % konfidensintervallet, øker med i underkant av 1 M€/år relativt til basisscenarioet for de fleste justeringer. Unntaket er tilbakekoblingsfaktoren hvor usikkerheten er betydelig større for justeringene på + 20 %, - 10 % og - 20 %.

Ettersom de underliggende isopriskurvene for ATC- og FBMC-kjøringen ser ut til å være svært like i vurderingen av behov for ny kalibrering, se figur 7-1 og figur 7-2, kan det forventes at endringen i nytteverdi vil være liten når kalibreringsverdiene endres. Dersom isopriskurvene ligger noe lavere/høyere, er noe flatere/brattere eller ligger mer spredd/samlet vil de variere likt og fortsatt være svært like. Se kapittel 4.1.3.

Elastisitetsfaktoren og formfaktoren oppfyller denne forventningen. Nytteverdien varierer fra 0,1 M€/år til 1,9 M€/år for alle 12 justeringer, hvor de fleste verdiene er over 1 M€/år. Sannsynligheten for at nytteverdien er høyere enn null er over 70 % for alle unntatt tre justeringer. Det ser heller ikke ut til at det er noen klar sammenheng mellom nytteverdi og justering av formfaktoren og elastisitetsfaktoren. Dette kan tyde på at variasjonen i resultatene i realiteten er støy. På tross av en økning i usikkerheten relativt til basisscenarioet, konkluderes det med at nytteverdien er *lite sensitiv* for endringer i verdiene til elastisitetsfaktoren og formfaktoren.

Flere av justeringene for verdiene til tilbakekoblingsfaktoren oppfyller ikke forventningene skissert ovenfor, slik både figur 7-15 og tabell 7-8 viser. Lavere verdier for

tilbakekoblingsfaktoren gir en høyere nytteverdi, mens høyere verdier reduserer nytteverdien. Når verdiene til tilbakekoblingsfaktoren justeres med - 20 % stiger nytteverdien til 8,5 M€/år, mens sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null er lavere enn i basisscenarioet. Dette kan forklares ved at lengden på 80 % konfidensintervallet er på 26,1 M€/år, i overkant av seks ganger større enn for basisscenarioet. Dette kan skyldes at Samkjøringsmodellen har vansker med å løse optimaliseringsproblemet. For justeringen på + 20 % er sannsynligheten for at nytteverdien er større enn null lik 10 %. Den estimerte nytteverdien er på - 3,6 M€/år. Basert på overnevnte, konkluderes det med at nytteverdien er *svært sensitiv* for justeringen av tilbakekoblingsfaktoren.

Oppsummering

Diskusjonen av resultater fra sensitivitetsanalysen konkluderer med at den estimerte nytteverdien fra basisscenarioet er:

- lite sensitiv for utbygging av flere mellomlandsforbindelser, og justering av elastisitetsfaktoren og formfaktoren.
- svært sensitiv for økt installert vindkraftkapasitet, endring i forbruk og justering av tilbakekoblingsfaktoren.

Den estimerte nytteverdien vurderes til å være svært sensitiv for tre av seks underliggende parametere som er undersøkes. Dette kan tyde på at den estimerte nytteverdien fra basisscenarioet generelt er sensitiv for endringer i underliggende parametere. Det kan derfor konkluderes med at det er betydelig usikkerhet når produsentene skal avgjøre hvorvidt de skal tilpasse seg en FBMC.

Forklaringsvariablene til de estimerte nytteverdiene i sensitivitetsanalysen er gjengitt i vedlegg D. Med utgangspunkt i dette vedlegget kan det undersøkes hvorvidt det er noen fellestrekk mellom de 1 400 modellkjøringene som er gjennomført i oppgaven. Totalt er 35 ulike justeringer av datasettet undersøkt, med 40 modellkjøring for hver justering. For 34 av 35 justeringer er det en økning i regulerbar produksjon. Dette viser en klar tendens til at vannkraftprodusentene får mer kontroll over egen produksjon, når de tilpasser seg FBMC. For 2 av 35 justeringer er det funnet en økning i uregulerbar produksjon. Den totale produksjonen øker i 34 av 35 justeringer. Basert på overnevnte vurderes det dithen at vannkraftprodusenter som tilpasser seg FBMC kan forvente en økning i regulerbar og total produksjon, og en reduksjon i uregulerbar produksjon.

9 Videre arbeid

Hensikten med dette kapittelet er å presentere videre arbeid som kan gjennomføres i forbindelse med den valgte problemstillingen. De mest sentrale temaene for videre arbeid vurderes til å være følgende: 1) Tilpasse sannsynlighetsfordelingen i Monte Carlo-simuleringen på mer enn 20 modellkjøringer. 2) Gjennomføre en utvidet sensitivitetsanalyse. 3) Undersøke hvorfor den estimerte nytteverdien i Finnmark er negativ. 4) Gjennomføre modellkjøringer og analyser av datasett hvor antagelser om fremtidens kraftsystem er inkludert. 5) Gjennomføre modellkjøringer uten antagelsen om at enten alle eller ingen tilpasser seg FBMC.

Ved gjennomføringen av Monte Carlo-simuleringen benyttes det rekker med 20 produsentoverskudd for å tilpasse sannsynlighetsfordelinger, som benyttes videre i estimeringen av nytteverdien. Som diskutert i kapittel 8.1 er det knyttet relativt stor usikkerhet til en sannsynlighetsfordeling som baseres på 20 verdier. Usikkerheten knyttet til sannsynlighetsfordelingen kan reduseres dersom det gjennomføres ytterligere modellkjøringer.

I oppgavens sensitivitetsanalyse undersøkes nytteverdiens sensitivitet for fire underleggende parametere. Samkjøringsmodellen er en relativt komplisert modell med en rekke variabler og antagelser som påvirker resultatene fra modellen. Det vil være hensiktsmessig å gjennomføre en utvidet sensitivitetsanalyse hvor flere underliggende parametere undersøkes. To forslag til underliggende parametere er grad av forbrukerfleksibilitet og endret kjernekraftproduksjon. Installasjonen av AMS-måler og innføringen av effekttariffer kan bidra til økt forbrukerfleksibilitet i årene fremover. Se kapittel 2.2. Bøhnsdalen et al. (2016 s. 39) antar at kjernekraftproduksjonen i Finland øker fram mot 2030, samtidig som kjernekraftproduksjonen i Sverige gradvis fases ut.

Ved å undersøke resultater fra ATC-kjøringer og FBMC-kjøringer i detalj kan trolig årsaken til den negative nytteverdien i Finnmark bestemmes. I Sentral-Vest- Europa ble FBMC innført i 2015. CREG (2017) presenterer eksempler på at handelsgrensene mellom budområder i dette området har blitt redusert etter innføringen av FBMC. Dermed kan det undersøkes om dette kan være tilfelle også for Finnmark.

Modellkjøringene i oppgaven gjennomføres ved bruk av basisdatasettet 2017. Nytteverdien ved å tilpasse vannkraftproduksjonen til FBMC er ikke undersøkt for ytterligere basisdatasett. Kraftsystemet er stadig i endring. For å kunne estimere nytteverdien for fremtidige markedssituasjon bør det gjennomføres tilsvarende analyser ved bruk av andre basisdatasett.

Statnett har utarbeidet slike datasett for blant annet 2020, 2025 og 2030. Den samme metoden som benyttes i denne oppgaven vurderes til å være godt egnet til å kunne analysere andre basisdatasett.

Ved hjelp av metoden som benyttes i denne oppgaven vil det være mulig å undersøke de samme underliggende parametere for andre basisdatasett. På den ene siden er det rimelig å anta at nytteverdien estimert med andre basisdatasett, vil ha samme grad av sensitivitet. Dette skyldes at systemet som undersøkes i stor grad vil være det samme, på tross av at kraftsystemet er i kontinuerlig utvikling. På den andre siden er det knyttet relativt stor usikkerhet til den estimerte nytteverdien. Derfor vurderes det som hensiktsmessig at de samme underliggende parametere undersøkes for andre basisdatasett, for å kunne bekrefte eller avkreft hvorvidt samme grad av sensitivitet gjelder. Det vurderes at samme metode som i denne oppgaven, vil være hensiktsmessig for en slik undersøkelse.

Ved bruk modellgrunnlaget definert i kapittel 5.2.1 vil en antagelse være at enten alle eller ingen vannkraftprodusenter tilpasser vannkraftproduksjonen til FBMC. Som en del av videre arbeid kan det være hensiktsmessig å gjennomføre modellkjøringer hvor vannverdiberegningen i ett og ett delområde baseres på ATC, mens vannverdiberegningen for de resterende delområdene baseres på FBMC. Disse modellkjøringene sammenliknes så med FBMC-kjøringer tilsvarende de fra tabell 6-2. Dermed undersøkes konsekvensene av at alle vannkraftprodusenter bortsett fra én, tilpasser seg FBMC.

10 Konklusjon

Med utgangspunkt i problemstillingen «*Hva er nytteverdien for vannkraftprodusenter ved å tilpasse vannkraftproduksjon til en flytbasert markedskobling?*» undersøkes to forskningsspørsmål:

- 1) Hva er endringen i vannkraftprodusenters produsentoverskudd ved å tilpasse vannverdiberegning til en flytbasert markedskobling?
- 2) Hvor sensitiv er endringen i produsentoverskudd for endring i underliggende parametere?

Nytteverdien defineres som endringen i produsentoverskuddet til vannkraftprodusentene, gitt en marginalkostnad lik null, dersom de tilpasser seg den flytbaserte markedskoblingen.

Resultatene viser en nytteverdi på totalt 1,7 M€/år for norske og svenske vannkraftprodusenter som tilpasser sin vannkraftproduksjon en flytbasert markedskobling. Sannsynligheten for at nytteverdien er høyere enn null estimeres til å være 84 %. Videre viser resultatene at nytteverdien med 80 % sikkerhet ligger i intervallet mellom - 0,5 M€/år og 3,6 M€/år.

Basert på resultatene fra og diskusjonen av sensitivitetsanalysen konkluderes det med at den estimerte nytteverdien er:

- lite sensitiv for utbygging av flere mellomlandsforbindelser, og for justering av elastisitetsfaktoren og formfaktoren.
- svært sensitiv for økt installert vindkraftkapasitet, endring i forbruk og justering av tilbakekoblingsfaktoren.

Referanser

- Andersen, B. (2007). En verktøykasse for analyse i prosjektets tidligfase. I: Sunnevåg, K. J. (red.). *Beslutning på svakt informasjonsgrunnlag: Tilnærminger og utfordringer i tidligfase*. Bergen.
- Austeng, K., Midtbø, J. T., Jordanger, I., Magnussen, O. M. & Torp, O. (2005a). Usikkerhetsanalyse - Kontekst og grunnlag. *Concept-programmet 2005*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Austeng, K., Torp, O., Midtbø, J. T., Helland, V. & Jordanger, I. (2005b). Usikkerhetsanalyse - Metoder. *Concept-programmet 2005*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Bye, T. & Hope, E. (2007). Deregulering av elektrisitetsmarkedet : norske erfaringer. *Økonomisk forum*, Årg. 61 (Nr. 1): 17-25.
- Bye, T., Bjørndal, M., Doorman, G., G., K. & Riis, C. (2010). *Flere og riktige priser - Et mer effektivt kraftsystem*: Olje- og energidepartementet. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/ekspertutvalget-for-driften-av-kraftsyst/id626571/> (lest 30.04.2018).
- Bøhnsdalen, E. T., Døskeland, I. H., Västermark, K. L., Holmefjord, V. & Aarstad, J. (2016). *Langsiktig markedsanalyse: Norden og Europa 2016–2040*: Statnett. Tilgjengelig fra: <http://www.statnett.no/Global/Dokumenter/Nyheter%20-%20vedlegg/Nyheter%202016/Langsiktig%20markedsanalyse%20Norden%20og%20Europa%202016%E2%80%932040.pdf> (lest 06.05.2018).
- CREG. (2017). *Review of CWE day-ahead market results during May 1 2017*. Tilgjengelig fra: <http://www.creg.be/sites/default/files/assets/Publications/Notes/Z1655EN.pdf>.
- Danish Ministry of Climate, E. a. B. (2012). *DK Energy Agreement*. Danish Ministry of Climate, E. a. B. stateofgreen.com.
- Drevland, F., Austeng, K. & Torp, O. (2005). Usikkerhetsanalyse - Modellering, estimering og beregning. *Concept-programmet 2005*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Døskeland, I. H., Ræder, N. M. & Kringstad, A. (2013). *Flytbasert Markedskobling: Analyse av flytbasert markedskobling i Norden med eksempler fra kraftsystemet*: Statnett. Upublisert manuskript.

- Døskeland, I. H. (2018a). *Inkludering av Samnett og Samlast i Strategidelen til samkjøringsmodellen* (E-post til Ivar Døskaland 12.02.2018).
- Døskeland, I. H. (2018b). *Intervju med senioranalytiker Ivar Døskeland ved Statnett*. Oslo (15.02.2018).
- Døskeland, I. H. (2018c). *Spørsmål angående Samkjøringsmodellen* (E-post til Ivar Døskaland 19.04.2018).
- Energi Norge. (2017). *Effekttariffer på høring*. Tilgjengelig fra: <https://www.energinorge.no/fagomrader/stromnett/nyheter/2017/effekttariffer-pa-horing/> (lest 16.03.2018).
- ENTSO-E. (2018). *Principles for determining the transfer capacities in the nordic power market*. Tilgjengelig fra: <https://www.nordpoolspot.com/globalassets/download-center/tso/principles-for-determining-the-transfer-capacities.pdf> (lest 30.04.2018).
- EPEX SPOT, GME, Nord Pool, OMIE, OPCOM, OTE & TGE. (2016). *EUPHEMIA Public Description - PCR Market Coupling Algorithm*. Tilgjengelig fra: <https://www.nordpoolspot.com/globalassets/download-center/pcr/euphemia-public-documentation.pdf> (lest 02.02.2018).
- Eurostat. (2016). *Electricity consumption by industry, transport activities and households/services (GWH), 11. august 2016*. Tilgjengelig fra: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=ten00094&plugin=1> (lest 07.05.2018).
- Eurostat. (2017). *Supply, transformation and consumption of electricity, 7. april 2017*. Tilgjengelig fra: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_105a&lang=en (lest 07.05.2018).
- Forskrift om systemansvaret i kraftsystemet. (2002). *Forskrift om systemansvaret i kraftsystemet 07. mai 2002 nr. 448*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2002-05-07-448> (lest 28.02.2018).
- Førland, E. J., Haddeland, I., Hanssen-Bauer, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J. E. Ø., Sandven, S., Sandø, A. B., Sorteberg, A., et al. (2015). *Klima i Norge 2100: Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015*: Miljødirektoratet. Tilgjengelig fra: https://cms.met.no/site/2/klimaservicesenteret/klima-i-norge-2100/_attachment/10990?_ts=159d5ffcfd (lest 07.05.2018).
- Førsund, F. R., Mo, B., Singh, B. & Wolfgang, O. (2005). *Samkjøringsmodellen : En oversikt med vekt på økonomisk tolkning. Grensesnitt for Samkjøringsmodellen*. Bergen.

- Førsund, F. R. (2007). *Hydropower economics*. 2. utg. New York: Springer.
- Helseth, A., Warland, G., Mo, B. & Fosso, O. (2011). *Samnett – The EMPS Model with Power Flow Constraints*: SINTEF Energiforskning.
- Helseth, A. & Mo, B. (2012). *Sammenlikning av flyt- og ATC-basert markedsklarering*: SINTEF Energiforskning. Upublisert manuskript.
- Hovland, K. M. (2018, 18.04.2018). Hydro frykter ny gigantkabel vil gi høyere strømpris. *e24*.
- Hydro Energi. (2018). *Kraftverkene våre*. Tilgjengelig fra: <https://www.hydro.com/no/hydro-i-norge/var-virksomhet/Vannkraft/kraftverkene-vare/> (lest 08.05.2018).
- Industri Energi. (2017). *Utenlandskabler: Vi samler oss til kamp mot NorthConnect på landsmøtet*. Tilgjengelig fra: <https://www.industrienergi.no/nyheter/industri-energi-samler-kamp-northconnect-pa-landsmotet/> (lest 28.04.2018).
- Jegleim, B. (2015). *Flow Based Market Coupling* [Masteroppgave]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology. Tilgjengelig fra: <https://daim.idi.ntnu.no/masteroppgaver/013/13523/masteroppgave.pdf> (lest 01.02.2018).
- Johannessen, A., Christoffersen, L. & Tufte, P. A. (2011). *Forskningsmetode for økonomisk-administrative fag*. Oslo: Abstrakt forlag AS.
- Kringstad, A. (2009). *Håndbok for Samlast: Statnett*. Upublisert manuskript.
- Mollestad, G. O. (2018, 22.03.2018). North Connect vil ikke bli bygget på mange år. *Montel*.
- Nord Pool. (2018a). *Day-ahead market*. Tilgjengelig fra: <https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/Day-ahead-market/> (lest 19.03.2018).
- Nord Pool. (2018b). *History*. Tilgjengelig fra: <https://www.nordpoolgroup.com/About-us/History/> (lest 08.01.2018).
- Nord Pool. (2018c). *Integrated Europe*. Tilgjengelig fra: <https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/Integrated-Europe/> (lest 10.01.2018).
- Nordeng, R. A. (2016). *Flow based market clearing: estimation of net positions* [Masteroppgave]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology. Tilgjengelig fra: https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/id/454359/15178_FULLTEXT.pdf.

- NordREG. (2014). *An overview of the Nordic Electricity Market*. Tilgjengelig fra:
<https://www.nordicenergyregulators.org/about-nordreg/an-overview-of-the-nordic-electricity-market/> (lest 30.04.2018).
- NorthConnect AS. (2017). *Project Overview*. Tilgjengelig fra:
<http://www.northconnect.no/project> (lest 03.04.2018).
- NTB. (2018, 18.04.2018). Rødt vil stanse omstridt kabel mellom Norge og Skottland. *TU*.
- NVE. (2015). *Smarte strømmålere (AMS)*. Tilgjengelig fra:
<https://www.nve.no/stromkunde/smarte-strommalere-ams/> (lest 03.04.2018).
- Olje- og energidepartementet. (2017). *Enighet om svensk utvidelse av elsertifikatsystemet*.
Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/enighet-om-svensk-utvidelse-av-elsertifikatsystemet/id2549653/> (lest 07.05.2018).
- SINTEF Energiforskning. (u.å.-a). *Brukerveiledning Samkjøringsmodellen*. Upublisert manuskript.
- SINTEF Energiforskning. (u.å.-b). *Brukerveiledning Vansimtap*. Upublisert manuskript.
- Spilde, D. & Skotland, C. (2016). *Hvordan vil en omfattende elektrifisering av transportsektoren påvirke kraftsystemet?:* NVE. Tilgjengelig fra:
<https://www.nve.no/Media/4117/nve-notat-om-transport-og-kraftsystemet.pdf> (lest 06.05.2018).
- Spilde, D., Lien, S. K., Ericson, T. B. & Magnussen, I. H. (2018). *Strømforbruk i Norge mot 2035: Fremskrivning av strømforbruk i Fastlands-Norge*: NVE. Tilgjengelig fra:
http://publikasjoner.nve.no/rapport/2018/rapport2018_43.pdf (lest 06.05.2018).
- Statnett. (2012). *Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2012*. Tilgjengelig fra:
http://www.statnett.no/Global/Dokumenter/Kraftsystemet/Systemansvar/Statnett_SM_UP_24.05_Ink_Low.pdf (lest 01.03.2018).
- Statnett. (2013). *NordLink - Nettutvikling - Statnett*. Tilgjengelig fra:
<http://statnett.no/Nettutvikling/NORDLINK/> (lest 30.04.2018).
- Statnett. (2017a). *Mellomlandsforbindelser*. Tilgjengelig fra:
<http://www.statnett.no/Nettutvikling/Mellomlandsforbindelser/> (lest 30.04.2018).
- Statnett. (2017b). *Systemdrifts- og markedsutviklingsplan 2017-2021*. Oslo: Statnett.
Tilgjengelig fra:
http://www.statnett.no/Global/Dokumenter/Kraftsystemet/Systemansvar/Hoved_Systemdrift_N_lores_enkelt sider.pdf (lest 11.05.2018).

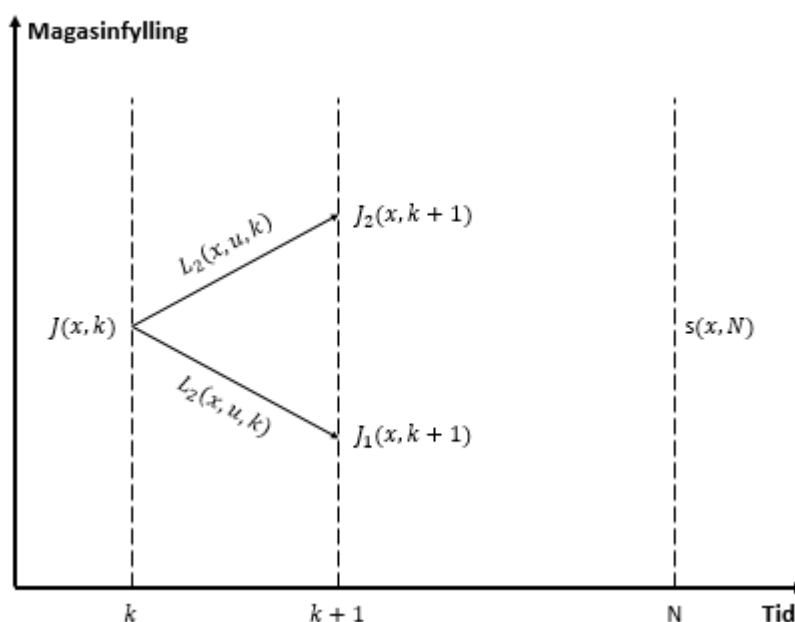
- Statnett, Fingrid, Svenska Kräftenett & Energinet (red.). (2017a). *The Nordic Capacity Calculation Methodology (CCM) project Stakeholder Forum, Copenhagen, Denmark, 11 December 2017.*
- Statnett, Fingrid, Svenska Kräftenett & Energinet. (2017b). *Stakeholder consultation document and Impact Assessment for the Capacity Calculation Methodology Proposal for the Nordic CCR.* Tilgjengelig fra: http://d34718316.u65.surf-town.net/CCM-documents/SH_archive/20170912/supp.pdf (lest 04.01.2018).
- Svarstad, V. B. (2016). *Flow based market clearing: GSK strategies.* Trondheim: Norwegian University of Science and Technology. Tilgjengelig fra: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2413290> (lest 01.02.2018).
- Van den Bergh, K. B., J. & Delarue, E. (2016). The Flow-Based Market Coupling in Central Western Europe: Concepts and definitions. *The Electricity Journal*, 29 (1): 24-29.
- von Meier, A. (2006). *Electric power systems: a conceptual introduction.* New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Wangensteen, I. (2007). *Power system economics: the Nordic electricity market.* Trondheim: Tapir.
- Weir, D. E. & Aksnes, N. (2018). *Vindkraft - produksjon i 2017:* NVE. Tilgjengelig fra: http://publikasjoner.nve.no/rapport/2018/rapport2018_10.pdf (lest 06.05.2018).
- Wolfgang, O. & Skjelbred, H. I. (2012). *Automatisk kalibrering av Samkjøringsmodellen: basert på samfunnsøkonomi eller magasindisponering.* Trondheim: SINTEF energi AS.

Vedlegg

A. Samkjøringsmodellen

A1. Vannverdimetoden i Samkjøringsmodellen

Vannverdimetoden som blir beskrevet i dette kapitlet baseres i hovedsak på seksjon 8 i brukermanualen til Vansimtap, et program i Samkjøringsmodellen. Vannverdimetoden kan forklares ut i fra figur A-1, hvor planleggingsperioden deles opp i N uker og k er den første uken. Problemet i starten av hver uke er å fastsette produksjonen for kommende uker, slik at de totale driftsavhengige kostnadene minimeres.



Figur A-1: Planleggingsperioden i vannverdiberegningen (Helseth & Mo 2012).

$J(x, k)$ er den forventede totale driftsavhengige kostnaden ved starten av uke k . Kostnaden kan uttrykkes ved formel A-1, som en funksjon av magasinfyllingen, x , og uke nummer k .

$$J(x, k) = S(x, N) + \sum_{i=k}^N L(x, u, i) = L(x, u, k) + J(x, k + 1) \quad \text{A-1}$$

Her er $S(x, N)$ kostnaden knyttet til endret magasinfylling. Dette vil si differansen mellom forventet verdi på vannet ved uke k og uke N . $L(x, u, i)$ er de driftsavhengige kostnadene og inntekten knyttet til salg av kraft når en går fra en periode til en annen. For å produsere mengden

kraft, q , blir det tappet energi, $u(q)$, fra magasinet. De driftsavhengige kostnadene ved hvert produksjonsutfall vil avhenge av $u(q)$. Problemstillingen vil være å finne den verdien av $u(q)$ som minimerer de totale driftsavhengige kostnadene. Derfor minimeres $J(x, k)$ med hensyn på u , for alle uker i planleggingsperioden.

$$\begin{aligned} \min_u J &= \min_u [L(x, u, k) + J(x, k + 1)] \\ &\rightarrow \frac{dJ}{du} = 0 \end{aligned} \tag{A-2}$$

Derivasjon av likning A-2 gir likning A-3, hvor endringen i magasinfyllingen med hensyn på endringen i mengde energi tappet ut er lik -1 . Dette gir betingelsen for optimal vann disponering i planleggingsperioden.

$$\frac{dJ}{du} = \frac{\partial L}{\partial x_k} + \frac{\partial J}{\partial x_{k+1}} * \frac{\partial x_{k+1}}{\partial u_k} = \frac{\partial L}{\partial u_k} + \frac{\partial J}{\partial x_{k+1}} * (-1) = 0 \tag{A-3}$$

Videre er den optimale strategien i uke k gitt av likning A-4. Likningen uttrykker at den marginale driftsavhengige kostnaden i uke k er lik vannverdien i kommende uke. Vannverdien vil her være endringen i de totale fremtidige driftsavhengige kostnad med hensyn på endring i magasinfylling.

$$\frac{\partial L}{\partial u_k} = \frac{\partial J}{\partial x_{k+1}} \tag{A-4}$$

En antagelse i denne matematiske beskrivelsen er at tilsiget er kjent. I virkeligheten er tilsiget en stokastisk størrelse. Samkjøringsmodellen tar hensyn til dette ved å beskrive tilsiget i kommende uke som n diskrete verdier, hvor hver verdi har en tilhørende sannsynlighet, p_i . Den optimale vannverdien i uke k ved hver magasinfylling blir beregnet ved formel A-5, hvor K_i er den optimale vannverdien i kommende uke ved ulike tilsigsalternativer. Dermed vil vannverdimatrisen inneholde forventede vannverdier.

$$K_{opt} = \sum_{i=1}^n p_i K_i \tag{A-5}$$

A2. Kalibreringsfaktorer

Tilbakekoblingsfaktoren tar utgangspunkt i delområdets gjennomsnittlige vannkraftproduksjon og fastsetter hvor stor andel av denne produksjonen som er fastkraft. En verdi på 1 tilsvarer at fastkraften er like stor som områdets gjennomsnittlige kraftproduksjon. Tilsvarende vil en verdi på 0,7 tilsvare at mengden fastkraft utgjør 70 % av gjennomsnittlig kraftproduksjon. En økning av tilbakekoblingsfaktoren vil løfte isopriskurvene i området, mens en reduksjon vil senke isopriskurvene. Tilbakekoblingsfaktoren styrer altså nivået på isopriskurvene for et område (Wolfgang & Skjelbred 2012).

Formfaktoren justerer sesongvariasjon i etterspørselen etter fastkraft relativt til resten av landet. En formfaktor lik 1 vil gi samme fordeling av etterspørselen i et område som i resten av systemet. En formfaktor større enn 1 betyr mer etterspørsel om vinteren, altså mer sesongvariasjon enn resten av systemet. På samme måte vil en formfaktor mindre enn 1 bety at mer etterspørsel flyttes fra vinter til sommeren slik at lastprofilen blir flatere enn i resten av systemet. Formfaktor lik 1 tilsvare helt flat årsprofil. Justering av formfaktoren endrer isopriskurvene ved at gradienten blir høyere ved en høyere formfaktor (mer sesongvariasjon), mens gradienten blir lavere ved en lavere formfaktor (mindre sesongvariasjon) (Wolfgang & Skjelbred 2012).

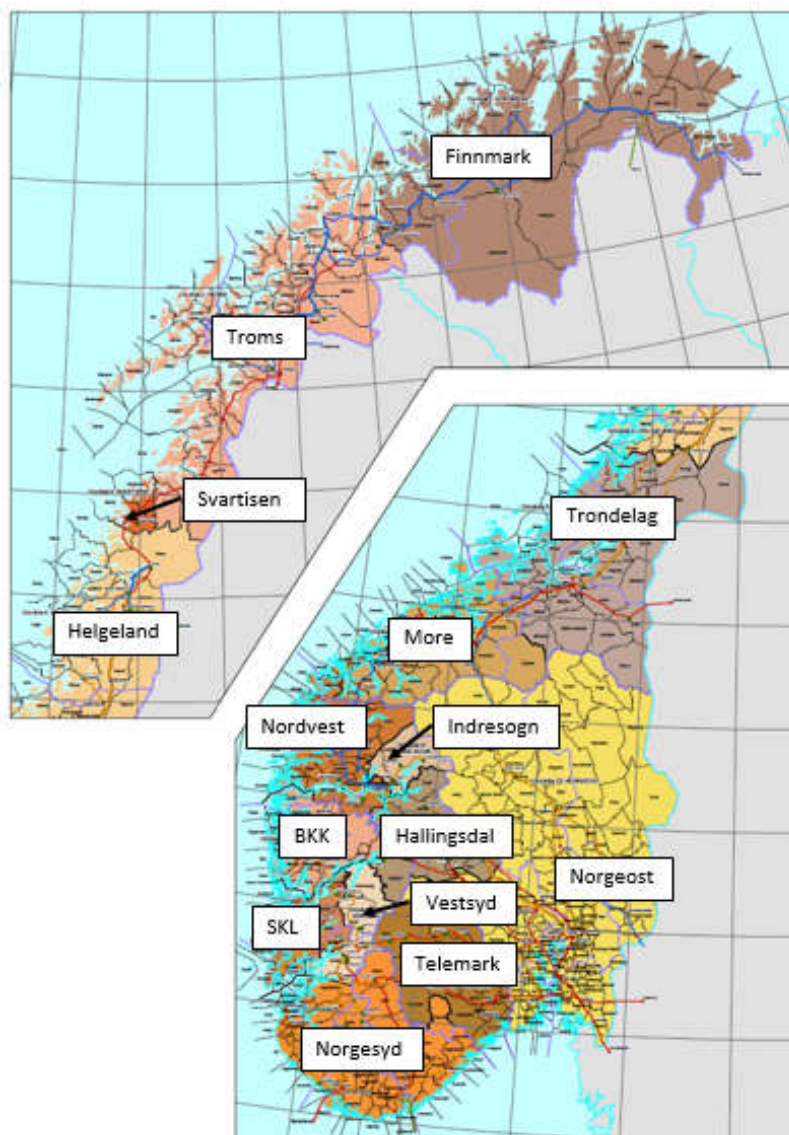
Elastisitetsfaktoren styrer mengden priselastisk marked, tilbud og etterspørsel, som delområdet skal simuleres med i vannverdiberegningen. Med en elastisitetsfaktor lik 1 vil delområdet få en like stor andel av det priselastiske markedet som forholdet mellom områdets vannkraftproduksjon og vannkraftproduksjon i systemet. En elastisitetsfaktor høyere enn 1 vil gi mer priselastisk marked. Dette vil gjøre at avstanden mellom isopriskurvene øker. En lavere elastisitetsfaktor gir mindre priselastisk marked, noe som fører til at avstanden mellom isopriskurvene blir mindre. Utfallsrommet for simulert magasinutvikling blir mindre (Wolfgang & Skjelbred 2012).

A3. Delområder i Samkjøringsmodellen

Tabell A-1 viser områdeinndelingen i Samkjøringsmodellen. Figur A-2 viser et kart med oversikt over de norske delområdene. De svenske delområdene (nummer 16-19) har samme inndeling som de svenske budområdene. Se figur 2-1. Det samme gjelder de finske og fanske delområdene. Delområde 24-30 og delområde 32 har samme inndeling som landegrensene. De resterende delområdene er hjelpeområder.

Tabell A-1: Oversikt over delområder i Samkjøringsmodellen.

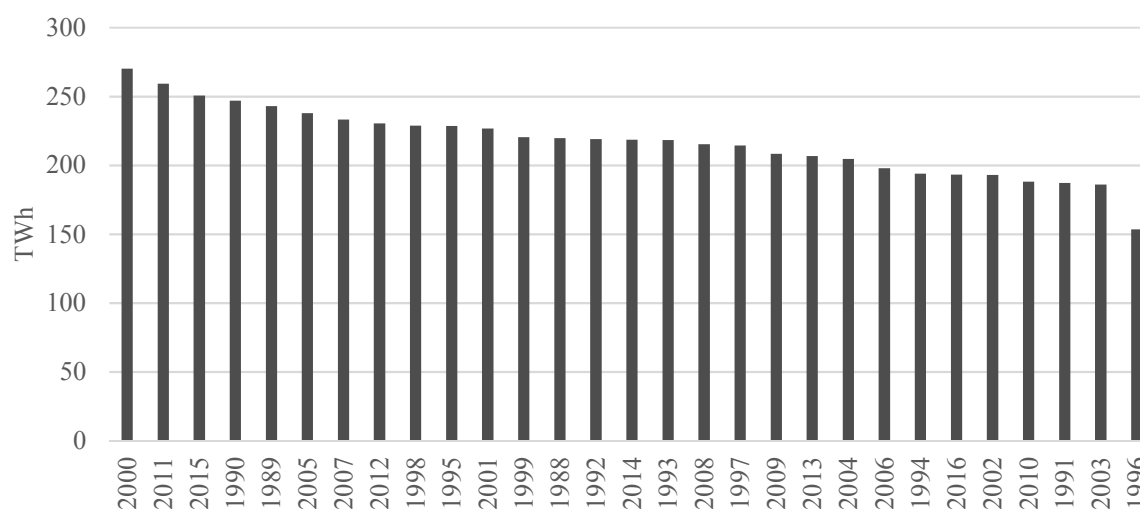
Nummer	Område	Nummer	Område
1	Finnmark	18	Sver-SNO3
2	Troms	19	Sver-SNO4
3	Svartisen	20	Fin-Nord
4	Helgeland	21	Fin-Syd
5	Trondelag	22	Danm-Ost
6	More	23	Danm-Vest
7	Nordvest	24	Tyskland
8	Indresogn	25	Nederland
9	BKK	26	Polen
10	SKL	27	Estland
11	Vest Syd	28	Latvia
12	Norgesyd	29	Litauen
13	Hallingsdal	30	Storbritannia
14	Telemark	31	Sydlenken
15	Norgeost	32	Russland
16	Sver-SNO1	33	Kriegers_flak
17	Sver-SNO2	34	Baltic12



Figur A-2: Kart over delområdene i Samkjøringsmodellen for Norge (Intern figur fra Statnett).

A4. Tilsig per værår

Figur A-3 viser tilsiget i Norge og Sverige for hvert værår i Samkjøringsmodellen



Figur A-3: Regulerbart og uregulerbart tilsig i Norge og Sverige (1988-2016).

A5. Brukerinnstillinger for manuell endring av kalibreringsverdier

For å endre de ulike kalibreringsverdiene i datasettet benyttes samme innstillinger som beskrevet i tabell 6-1, med unntak av at punkt 17 og 18 byttes ut med modellinnstillingene beskrevet i tabell A-2. Valg av «Kopl» under punkt 17 indikerer at en kalibrering skal gjennomføres. Deretter justeres verdiene for de tre kalibreringsfaktorene for alle delområdene under punkt 17d. Videre i punkt 18 velges det «Manu» slik at de nylig definerte kalibreringsverdiene blir benyttet i modellkjøringen.

Tabell A-2: Oversikt over brukerinntstillinger i Samkjøringsmodellen. Benyttes for manuell endring av kalibreringsverdier.

Nr.	Beskrivelse av brukerinntstilling	Valgt innstilling
17	Tast utførselskode for kalibrering	Kopl
17a	Er data (kalibrering) ok?	Nei
17b	Velg starttuke for endring	1
17c	Velg sluttuke for endring	52
17d	Endring av kalibrering for alle områder	Justerte verdier
18	Start vannverdiberegning	Manu

B. Python-funksjoner benyttet i resultatbehandling

Det vil variere fra bruker til bruker hvordan man velger å lagre resultatene fra Samkjøringsmodellen. Dette vil være avgjørende for hvordan Python-scriptet bygges opp. I denne oppgaven lagres resultatene som csv-filer. Disse filene sorteres så i mapper, hvor hver mappe består av 20 like modellkjøringer. Ved hjelp av linken til en slik mappe, henter Python ut navnet på alle filer i mappen. Når filnavnet og linken settes sammen utgjør dette linken til hver csv-fil. Denne listen med 20 linker kalles *folder_path* i funksjonen.

For å beregne produsentoverskuddet per år hentes det ut resultater for KRV og EGPR, se kapittel 4.3. Resultatfilen fra Samkjøringsmodellen vil ha 68 kolonner, ettersom det er 34 delområder totalt og det hentes ut to resultater samtidig, og 7540 rader.

I funksjonen, gjengitt i figur B-1, leses kun delområdene i Norge og Sverige inn i modellen.

```
#funksjonen tar inn en liste med linker til mappene hvor dataen man ønsker å undersøke ligger.
def po_per_aar(folder_path):

    #plukker ut områder for Norge og Sverige
    cols = list(np.arange(0,19))+list(np.arange(0+34,19+34)) #0-18, 34-52

    #looper over alle csv-filene som ligger i mappa
    for i in range(len(folder_path)):

        #leser inn data fra csv-fil. tar hensyn til cols definert ovenfor.
        indata = pd.DataFrame(data=pd.read_csv(folder_path[i], sep=';', header=None, decimal=',', usecols=cols))
        indata.iloc[:, :19] *= 10 # gjør om priser fra €cent/KWh til €/MWh
        indata.iloc[:, 19:] *= 1000 # gjør om volumer fra GWh til MWh

        #lager en dataframe hvor dataen skal lagres: simuleringer nedover (20) og områder bortover (19)
        if i == 0:
            utdata = pd.DataFrame(data=[], columns=[indata.columns[:19]], index=[np.arange(len(folder_path))])

        #fyller kolonnen med gjennomsnittlig produsentoverskudd for hvert område
        for j in range(len(utdata.columns)):
            #- sum([alle priser i kolonne j]*[alle volum i kolonne j+19])/antall år simulert = snitt PO/år
            utdata.iloc[i, j] = sum(indata.iloc[:, j]*indata.iloc[:, 19+j])/29

        #når alle PO er regnet ut for hvert område summeres de slik at man får én PO per simulering
        utdata = pd.DataFrame(data=utdata.sum(axis=1))

    return utdata
```

Figur B-1: Eksempel på Python-kode som benyttes til å beregne produsentoverskuddet.

C. Kraftsystemet i Norden

Verdiene i tabell C-1 og tabell C-2 er hentet fra Eurostat (2017).

Tabell C-1: Etterspørsel og produksjon av kraft i Norden i 2016 målt i TWh.

	Danmark	Finland	Norge	Sverige
Total etterspørsel	34,7	85	133,2	139,8
Total produksjon	28,9	66	148,8	151,5
Ikke-fornybare kilder	10,5	14,3	3,1	3,3
Atomkraft	-	22,3	-	60,5
Vind offshore	4,7	-	-	-
Vind onshore	8,1	3,1	2,1	15,4
Sol (PV)	0,7	-	-	-
Vannkraft	-	15,6	143,4	61,2
Andre fornybare kilder	4,9	10,8	0,2	11,2

Tabell C-2: Installert kapasitet i Norden 2016 målt i MW.

	Danmark	Finland	Norge	Sverige
Total kapasitet	15 525	17 011	32 083	39 406
Ikke-fornybare kilder	7 864	7 842	445	4 501
Atomkraft	-	2 782	-	9 714
Vind offshore	1 271			
Vind onshore	3 978	1 432	869	6 029
Sol (PV)	851	-	-	-
Vannkraft	8	3 207	30 767	16 184
Andre fornybare kilder	1 554	1 748	2	2 978

D. Resultater fra sensitivitetsanalysen

Tabell D-1: Utbygging av mellomlandsforbindelser: Differansen mellom ATC- og FBMC-kjøringene for ulike forklaringsvariabler.

Forklaringsvariabel	Kabel 1	Kabel 1+2	Kabel 1+2+3
Volumvektet pris [€/GWh]	5,3	9,1	-0,8
Regulerbar produksjon [GWh/år]	47,6	63,1	-33,7
Uregulerbar produksjon [GWh/år]	-42,4	-58,0	22,5
Total produksjon [GWh/år]	5,2	5,1	-11,2

Tabell D-2: Installert vindkraftkapasitet: Differansen mellom ATC- og FBMC-kjøringene for ulike forklaringsvariabler.

Forklaringsvariabel	+ 30 %	+ 50 %	+ 100 %	+ 150 %	+ 200 %
Volumvektet pris [€/GWh]	0,2	-0,9	-5,2	-9,2	0,4
Regulerbar produksjon [GWh/år]	87,1	70,0	78,5	7,5	8,6
Uregulerbar produksjon [GWh/år]	-71,6	-65,2	-64,2	-5,5	2,8
Total produksjon [GWh/år]	15,4	4,8	14,4	2,0	11,4

Tabell D-3: Kraftforbruk justert ned: Differansen mellom ATC- og FBMC-kjøringene for ulike forklaringsvariabler.

Forklaringsvariabel	-10 %	-6 %	-4 %	-2 %
Volumvektet pris [€/GWh]	-5,8	0,7	-2,2	3,3
Regulerbar produksjon [GWh/år]	112,7	110,5	85,3	84,2
Uregulerbar produksjon [GWh/år]	-89,0	-93,1	-66,8	-70,6
Total produksjon [GWh/år]	23,7	17,5	18,5	13,6

Tabell D-4: Kraftforbruk justert opp: Differansen mellom ATC- og FBMC-kjøringene for ulike forklaringsvariabler.

Forklaringsvariabel	+ 2 %	+ 4 %	+ 6 %	+ 10 %
Volumvektet pris [€/GWh]	0,7	10,1	9,9	4,7
Regulerbar produksjon [GWh/år]	34,7	105,5	87,8	78,6
Uregulerbar produksjon [GWh/år]	-23,2	-90,1	-76,7	-69,7
Total produksjon [GWh/år]	11,5	15,4	11,1	8,9

Tabell D-5: Tilbakekoblingsfaktoren: Differansen mellom ATC- og FBMC-kjøringene for ulike forklaringsvariabler.

Forklaringsvariabel	-20 %	-10 %	-5 %	+5 %	+10 %	+20 %
Volumvektet pris [€/GWh]	39,5	22,7	7,3	3,2	2,5	-20,9
Regulerbar produksjon [GWh/år]	10,6	54,5	74,1	118,2	209,9	134,7
Uregulerbar produksjon [GWh/år]	-9,3	-48,5	-64,4	-94,5	-174,7	-105,0
Total produksjon [GWh/år]	1,3	5,9	9,8	23,7	35,2	29,7

Tabell D-6: Formfaktoren: Differansen mellom ATC- og FBMC-kjøringene for ulike forklaringsvariabler.

Forklaringsvariabel	- 20 %	- 10 %	- 5 %	+ 5 %	+ 10 %	+ 20 %
Volumvektet pris [€/GWh]	5,2	5,8	0,2	4,3	-1,8	8,7
Regulerbar produksjon [GWh/år]	77,2	88,9	78,4	82,1	101,8	70,4
Uregulerbar produksjon [GWh/år]	-63,9	-80,1	-65,2	-73,1	-79,7	-63,5
Total produksjon [GWh/år]	13,3	8,9	13,2	9,0	22,2	6,9

Tabell D-7: Elastisitetsfaktoren: Differansen mellom ATC- og FBMC-kjøringene for ulike forklaringsvariabler.

Forklaringsvariabel	- 20 %	- 10 %	- 5 %	+ 5 %	+ 10 %	+ 20 %
Volumvektet pris [€/GWh]	-0,9	6,8	4,5	3,8	6,8	6,6
Regulerbar produksjon [GWh/år]	56,9	98,4	84,8	82,0	80,6	113,6
Uregulerbar produksjon [GWh/år]	-48,2	-84,4	-74,4	-67,8	-67,2	-95,5
Total produksjon [GWh/år]	8,7	14,0	10,4	14,3	13,4	18,1



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway