

Utjevningskraft, en skjult subsidie for vindkraft?

En teoretisk tilnærming med dynamisk analyse av vann- og vindkraftproduksjon.

Hedvig Signy Monsen Kristoffersen



Oppgave for graden
Master i Samfunnsøkonomisk analyse
30 studiepoeng

Økonomisk institutt
Det samfunnsvitenskapelige fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

November 2023

Utjevningskraft, en skjult subsidie for vindkraft?

En teoretisk tilnærming med dynamisk analyse av vann- og vindkraftproduksjon.

Hedvig Signy Monsen Kristoffersen

© 2023 Hedvig Signy Monsen Kristoffersen

Utjevningskraft, en skjult subsidie for vindkraft?

En teoretisk tilnærming med dynamisk analyse av vann- og vindkraftproduksjon.

<http://www.duo.uio.no/>

Trykk: Reprosentralen, Universitetet i Oslo

Sammendrag

I min masteroppgave har jeg utforsket en problemstilling basert på påstander fremmet i videoen "Økonomibløffen" laget av Motvind og Naturfilmkanalen. Denne problemstillingen dreier seg om følgende spørsmål: Fungerer utjevningskraft som en skjult subsidie for vindkraft?

For å svare på dette spørsmålet, har jeg utviklet en to-periodemodell som tar for seg både vann- og vindkraft. Modellen i oppgaven bygger på Finn R. Førsund sin bok "Hydropower Economics" (Førsund, 2015), og den tar hensyn til etterspørselsetastisitet. Spesielt har jeg undersøkt hvordan ulike produksjonsnivåer i to perioder, sammenlignet med lik produksjon i begge periodene, kan påvirke verdien av et magasin. Dette er gjort innenfor rammen av et scenario med uelastisk etterspørsel. Konklusjonen av analysen gir et argument mot påstanden om at utjevningskraft fungerer som en skjult subsidie for vindkraft. Snarere viser resultatene at utjevningskraft primært tjener til å opprettholde påliteligheten i elektrisitetssystemet, spesielt når etterspørselen er uelastisk. Dermed er det ingen grunn til å anse utjevningskraft som en ubetinget fordel for vindkraftprodusentene.

Forord

Jeg ønsker først og fremst å takke min veileder Kjell Arne Brekke for gode råd, innspill og uvurderlig hjelp.

Jeg ønsker også å uttrykke min takknemlighet overfor arbeidsgiveren min, NVE, for å ha gitt meg muligheten til å oppdage hvor spennende energimarkedet kan være.

Jeg vil også gjerne benytte anledningen til å takke mine kjære venninner og medstudenter, Ellen, Juni, Ingvild og Sigrid. Studietiden ville ikke vært den samme uten dere. Takk for all oppmuntring, berikende diskusjoner og den gode hjelpen dere har bidratt med gjennom alle disse årene.

Til slutt vil jeg takke familien min som alltid stiller opp for meg og spesielt tvillingsøsteren min, Agnes.

Oslo, november 2023

Hedvig Signy Monsen Kristoffersen

Innholdsfortegnelse

1 Innledning	9
2 Bakgrunn	12
2.1 Kontrovers rundt vindkraft	12
3 Kraftmarkedet.....	15
3.1 Det norske og nordiske kraftmarkedet	15
3.2 Handel i kraftmarkedet	15
3.3 Markedskryss - Kraftsystemet må være i balanse	17
3.4 Utjevningskraft og vannverdi	18
3.2 Kraftproduksjon	19
3.2.1 Vannkraft.....	19
3.2.2 Vindkraft	20
4 Teori	25
4. 1 Vannkraftmodellen	25
4.2 Den grunnleggende vannkraftmodellen	25
4.2.1 Maksimeringsproblemet for det enkleste tilfellet, grunnleggende modell	28
4.2.2 Løsning.....	29
4.2.3 Badekardiagram for det enkleste tilfellet	30
4.3 Magasinbegrensning.....	31
4.3.1 Maksimeringsproblemet med magasinbegrensning i t-perioder	32
4.3.2 Løsning med magasinbegrensning	33
4.4 Vannkraft i en to-periodemodell	35
4.4.1 Ingen begrensning på reservoar-kapasitet.....	35
4.4.2 Badekardiagram med ikke-bindende reservoarbegrensning.....	36
4.4.3 Begrenset reservoar-kapasitet i en to-periodemodell	36
4.4.4 Maksimeringsproblemet med magasinbegrensning	37
4.4.5 Lagrangefunksjonen med magasinbegrensning.....	37
4.4.6 Badekardiagram med begrenset reservoarkapasitet	39
5 Vindkraftmodell	41
5.1 Badekardiagram med vindkraft	42
6 Vann- og vindkraftmodellen	45
6.1 Modellens forutsetninger	45
6.2 Maksimeringsproblemet med både vann-og vindkraft	46
6.3 Løsning med både vann-og vindkraft	46
6.4 Badekardiagram med vann- og vindkraft	47
6.5 Vann- og vindkraft i en to-periodemodell med magasin	50

6.6 Maksimeringsproblem	50
6.7 Løsning	50
6.8 Badekardiagram med vindkraft og begrenset reservoarkapasitet	52
6.9 Oppsummering av kapittel 6	54
7 Etterspørselastisitet og magasinverdi	55
7.1 Uelastisk etterspørsel og sammenligning av to scenarioer	55
7.2 Markedsmakt som følge av uforutsigbare vindforhold	59
8 Mulige modellutvidelser	60
8.1 Usikkerhet	60
8.2 Handel	60
8.3 Inkludere flere kilder til elektrisitetsproduksjon	61
8.4 Start og stoppkostnader	61
8.5 Andre begrensninger	62
9 Konklusjon.....	63
Litteraturliste.....	65

1 Innledning

I den norske energidebatten har spørsmålet om vindkraftens økonomiske bærekraft blitt en betydelig kilde til interesse og debatt. Denne masteroppgaven tar utgangspunkt i utsagn fra filmen [Økonomibløffen](#) som er en del av serien *Møller og Avmakt*. Filmen ble publisert av organisasjonen Motvind og Naturfilmkanalen i 2020. I filmen hevdes det at utjevningskraft fungerer som en skjult subsidie for vindkraftanlegg. Filmskaperne formulerer blant annet følgende synspunkt:

- *«Alle vindkraftverk må ha hjelp fra andre stabile kraftkilder, ettersom vindkraftproduksjonen varierer betydelig avhengig av vindforholdene. Samtlige ustabile energiproduksjonskilder, inkludert vind- og solenergi, er avhengige av balansekraft for å kunne levere en konstant strømtilførsel til forbrukerne. I henhold til filmens perspektiv blir denne balansekraften betraktet som en skjult form for subsidie til vindkraftanleggene.»*

Motvind hevder at vindkraft i realiteten er avhengig av vannkraft som en form for økonomisk støtte. Dette bringer frem spørsmål om kostnadseffektivitet, økonomisk levedyktighet og energipolitikk. Vindkraft har også blitt anerkjent som en viktig ressurs for å øke andelen fornybar energi og bekjempe klimaendringer. Likevel, har debatten om kraftproduksjon i Norge satt spørsmålsteget ved om vindkraft faktisk dekker sine egne produksjonskostnader.

Torvald Sande, sivilingeniør innen kraftforsyning, uttaler følgende i filmen:

- *«Utjevningskraft er en forutsetning for at vindkraftselskapene skal kunne selge sin kraft. Fordi i utgangspunktet så produserer de bare en tredjepart av tida og da må de ha hjelp fra andre. Og i Norge er disse andre vannkraftverkene. Og det er derfor de utenlandske eierne står i kø for å kjøpe norsk vindkraft for de får det levert som om det var vannkraft. Den ferdige reguleringen har en fantastisk verdi som vannkraften yter i dag gratis, men den burde vindkraftprodusentene betale for.»*

Videre i filmen blir det argumentert for at dette er en av årsakene til at utenlandske finansinstitusjoner ønsker å investere i vindkraft i Norge:

- *«De får balansekraften, som vindkraftverkene er helt avhengig av, gratis.»*

Med en stadig økende andel fornybar energiproduksjon i kraftsystemet, oppstår utfordringer knyttet til å opprettholde balansen i systemet og håndtere uforutsette svingninger i produksjonen. Vindkraft er en variabel energikilde som kan svinge betydelig. *Motvind ønsker å slå hull på myten om at vindkraft er lønnsomt.*

Grunnet det som blir fremstilt i filmen, blir det nødvendig å utforske en spesifikk problemstilling i denne masteroppgaven. Problemstillingen i denne oppgaven blir dermed følgende:

- **Fungerer utjevningskraft som en skjult subsidie for vindkraft?**

Denne problemstillingen er av betydelig interesse og relevans av flere grunner. For det første har vindkraft blitt stadig mer utbredt som en ren energikilde, og dens bærekraftige fordeler er anerkjent. Imidlertid, er det et økende behov for å forstå de økonomiske og politiske aspektene ved vindkraftproduksjon for å kunne evaluere dens langsiktige bærekraft.

For det andre, i dagens komplekse energilandskap er det en viktig utfordring å balansere produksjonen av fornybar energi, som vindkraft, med pålitelig forsyning og stabilitet i strømmettet. Utjevningskraft, som i utgangspunktet er en mekanisme for å kompensere for den variabiliteten som er knyttet til kraftproduksjon, spiller en avgjørende rolle i å opprettholde denne balansen.

Utjevningskraft er et nøkkelbegrep i denne sammenhengen. En viktig del av utjevningskraften er muligheten til å lagre overskuddsenergi og frigjøre den når det er nødvendig, noe som kan være avgjørende for å opprettholde en stabil kraftforsyning. Dette er spesielt viktig fordi uforutsigbarheten i vindkraftproduksjonen kan føre til behov for ekstra investeringer i kraftnettinfrastruktur eller andre tiltak for å opprettholde en stabil forsyning

Dersom utjevningskraft i realiteten fungerer som en skjult subsidie for vindkraft, kan dette ha store implikasjoner for energimarkedet og politikken knyttet til fornybar energi. Det kan påvirke konkurransen med andre energikilder, kostnadseffektiviteten av vindkraftprosjekter, og reguleringer som styrer energisektoren. Derfor er det nødvendig å utforske denne problemstillingen i dybden for å oppnå en bedre forståelse av vindkraftens økonomiske og politiske aspekter.

Denne masteroppgaven tar sikte på å gi innsikt i denne problemstillingen ved hjelp av teoretisk analyse med en dynamisk tilnærming.

2 Bakgrunn

Målet med denne oppgaven er å presentere en to-periodemodell for vann- og vindkraft for å se nærmere på om utjevnskraft fungerer som en skjult subsidie for vindkraft. For å kunne gjøre dette vil jeg i følgende kapittel gjøre rede for kontroversen rundt vindkraft. Videre vil jeg se på eksisterende litteratur som omhandler økonomiske modeller for vannkraft. Deretter følger en innføring i hvordan vindkraft og vannkraft fungerer rent generelt i det norske markedet.

2.1 Kontrovers rundt vindkraft

Debatten om utbyggingen av vindkraft i Norge har i løpet av de siste årene vokst i omfang og har engasjert flere mennesker. Vindkraftutbygging har blitt anerkjent som en effektiv måte å produsere fornybar energi på, og bidra til å bekjempe klimaendringene. Dette fremgår i Energikommisjonens rapport fra 2023. Med ulike synspunkter og interesser rundt temaet vindkraft, har det oppstått motstand og uenighet. I Norge har vindkraftmotstanden utviklet seg fra å være knyttet til enkelte prosjekter til å bli en nasjonal diskusjon. Vindkraft har blitt en kilde til debatt.

For å oppnå klimamålene er fornybar energi avgjørende. Selv om Norge i stor grad er forsynt med vannkraft som tilfredsstillende vårt strømbehov, anser myndighetene det som nødvendig å øke produksjonen av andre former for fornybar energi. Utbyggingen av vindkraft har møtt betydelig motstand i lokalsamfunn over hele landet. Argumentene varierer, men et sentralt argument er at de lokale problemene som oppstår ved utbygging veier tyngre enn samfunnets generelle nytte av vindkraft. Vindkraftutbygging som et klimatiltak har flere utfordrende aspekter. Blant annet balansen mellom utbygging lokalt og Norges globale forpliktelser til å bekjempe klimaendringer. Det er også en konflikt mellom hensynet til natur og klima, hvor nedbygging av natur og påvirkningen på dyrelivet i utbyggingsområdene er blant hovedargumentene mot utbyggingen. Vindkraftverk tar opp mye plass og turbinene er synlige fra lange avstander. Bygging av et vindkraftverk påvirker en rekke ulike miljø- og samfunnsinteresser. Det er mange eksterne virkninger som oppstår ved opprettelse av vindkraft, og som følge av dette har vindkraft blitt et klimatiltak som møter betydelig motstand.

Debatten rundt vindkraft illustrerer de komplekse avveiningene mellom behovet for ren energi, bevaring av miljøet og kulturarv, samt hensyn til lokalsamfunn og økonomiske interesser. Diskusjonen rundt vindkraft i Norge er en viktig del av den globale dialogen om overgangen til bærekraftig energiproduksjon.

I 2019 ble Motvind Norge stiftet som et resultat av vindkraftmotstanden. Ifølge Motvind har konsesjoner for vindkraft- og småkraftprosjekter blitt gitt uten tilstrekkelig beslutningsgrunnlag, og uten dokumentert klimaeffekt. Motvind hevder at Vannkraft, som i stor grad dekker Norges energibehov, fungerer som en skjult subsidie for vindkraft. De hevder at den eksisterende vannkraftproduksjonen skaper en situasjon der vindkraftutbyggingen tilsynelatende fremstår som en mer nødvendig og bærekraftig løsning enn den faktisk er. Dette perspektivet går ut på at tilgjengeligheten av vannkraft, som en allerede etablert og pålitelig energikilde, kan føre til en feilaktig oppfatning av behovet for ytterligere fornybar energi. Spesielt vindkraft. Motvind hevder dermed at vannkraft i praksis fungerer som en indirekte økonomisk støtte for vindkraftutbyggingen, selv om det ikke nødvendigvis er den mest kostnadseffektive eller miljømessig gunstige løsningen. Organisasjonen har en kritisk holdning til hvordan energipolitikken og støtteordninger for fornybar energi fungerer i praksis.

I mai 2020 produserte Naturfilmkanalen filmen «Økonomibløffen», som er en del av serien «Møller og avmakt». Motvind har vært med å lage og publisere filmen. Filmene fikk stor oppmerksomhet i sosiale medier da den ble produsert, da det presenteres en rekke bemerkelsesverdige påstander som berører temaet norsk vindkraft og elektrisitetsproduksjon i Norge. En av hovedpåstandene i filmen er at vindkraftproduksjon er avhengig av økonomisk støtte for å sikre lønnsomhet. Videre hevder de i filmen at vindkraftutbygging i Norge fører til økonomisk tap for norske forbrukere (Dahlback & Skille, 2020).

- [Møller og Avmakt: ØKONOMIBLØFFEN - YouTube.](#)

I filmen produsert av Naturfilmkanalen og Motvind, hevdes det at norske forbrukere vil stå ovenfor kostnader som spenner fra 60 til 100 milliarder kroner i forbindelse med utbyggingen av vindkraft. Naturfilmkanalen har levert dokumentasjon til Faktisk.no hvor de presenterer estimater som antyder at nordmenn vil bidra med 11 milliarder kroner gjennom bruk av elsertifikater i perioden mellom 2015 og 2035.

Organisasjonen Motvind hevder at vannkraft fungerer som en skjult subsidie for vindkraft av flere grunner. De peker på at myndighetene gir vindkraftprosjekter økonomiske fordeler og prioriterer dem, noe som gir vindkraften en kunstig konkurransefordel. Videre hevder de at vindkraftutbyggere nyter godt av lavere produksjons- og installasjonskostnader takket være økonomiske insitamenter. Dette gir vindkraften en urettferdig fordel sammenlignet med andre energikilder som vannkraft. I tillegg påpeker Motvind at vindkraftprosjekter ofte er lokalisert i områder med gode vindforhold, noe som kan medføre høye kostnader for overføring av strøm til befolkede områder. Vannkraftanlegg derimot, er ofte nærmere forbruksområdene og har dermed lavere overføringskostnader. Motvind mener at dette indirekte gir vindkraften en form for subsidie gjennom reduserte overføringskostnader for vannkraften. Disse argumentene representerer organisasjonens synspunkter og bekymringer knyttet til utbyggingen av vindkraft i Norge. Diskusjonen om subsidier og fordeler knyttet til ulike energikilder er kompleks og avhenger av mange faktorer.

Denne analysen baserer seg på en tidligere modell introdusert av Førsum i 2007. Det er verdt å merke seg at Førsum (2015) vil tjene som grunnlaget og inspirasjonen for min egen modell, som vil bli presentert videre i oppgaven. Førsum bruker en dynamisk mikroøkonomisk tilnærming for å undersøke hvordan man optimalt skal allokere energikilder. Spesielt vektlegges den tradisjonelle vannkraften i modellen.

Vi ser nærmere på teorien til Førsum for å se om utsagnet til Motvind stemmer. Videre bruker vi modellen til Førsum for å integrere vind i modellen. Vi benytter oss av badekardiagram for å forklare sammenhengen mellom vann- og vindkraftproduksjon i to perioder.

På bakgrunn av dette skal vi i denne oppgaven se nærmere på en dynamisk optimaliseringsmodell som kan hjelpe oss å besvare spørsmålet om utjevningskraft fungerer som en skjult subsidie for vindkraft.

3 Kraftmarkedet

3.1 Det norske og nordiske kraftmarkedet

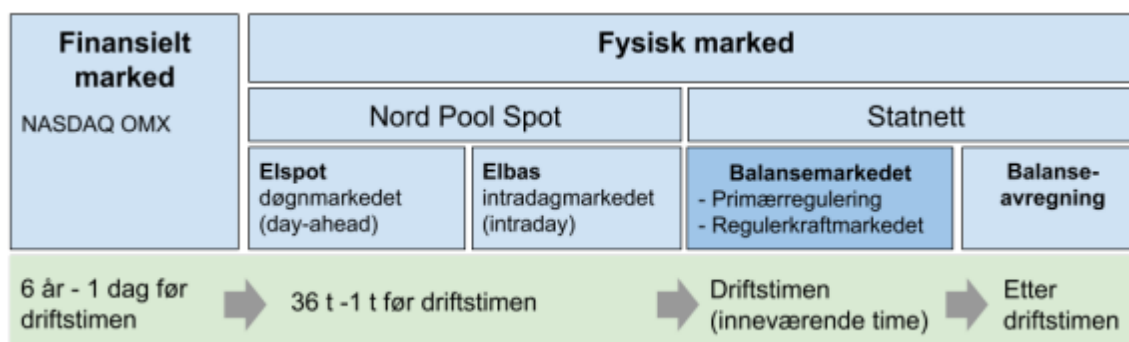
Tradisjonelt har det norske kraftsystemet vært vannkraft, som er en viktig og pålitelig kilde til fornybar energi. Norge er i særstilling med den høyeste andelen fornybar strøm i Europa, og vannkraft står fortsatt for mesteparten av kraftproduksjonen. Imidlertid er det en økende andel av vindkraftproduksjon. Som en del av det europeiske kraftsystemet, er strømmen som brukes i Norge hentet fra ulike energikilder, og noe av strømmen som brukes her i landet kan være produsert andre steder og med andre produksjonsteknologier. Norge er heldig med rikelig tilgang på vindressurser, og er blant de europeiske landene med best vindressurser. (NVE, 2020)

Norge har gode vindforhold som gir gode forutsetninger for vindkraftproduksjon.

Vannkraften i Norge har stor reguleringskapasitet og som følge av at Norge også har mye sterk vind, kan vann- og vindkraft fungere som samskjøringspartnere. Mellom vann- og vindkraft er det en synergieffekt som følge av at det blåser mye om vinteren, samtidig som at det på dette tidspunktet er lavt tilsig til reguleringsmagasinene.

3.2 Handel i kraftmarkedet

For å kunne handle kraft i form av elektrisk energi benyttes kraftmarkedet. Elektrisk strøm skiller seg fra andre varer ved sin begrensede lagringskapasitet, og det kreves kontinuerlig opprettholdelse av en nøyaktig balanse mellom produksjon og forbruk. Det eksisterer flere markeder for elektrisitet som følge av at elektriske energien ikke lar seg lagre. Dette gjelder ved ulike tidspunkt for driftstimen. I driftstimen skal markedet sørge for at systembalanse handles. I figuren nedenfor kan vi se en oversikt over hvordan oppdelingen av kraftmarkedet fungerer og tidspunkt for handel.



Figur 1. Oversikt over oppdelingen av kraftmarkedet. (Olje- og Energidepartementet, 2015)

Kraftmarkedet kan inndeles i to hovedsegmenter: engrosmarkedet og sluttbrukermarkedet. Engrosmarkedet involverer kjøp og salg av store mengder kraft, og det inkluderer aktører som kraftprodusenter, meglere, kraftleverandører og større industrikunder. Kraftleverandører er ansvarlige for å handle med elektrisk kraft på vegne av små og mellomstore sluttbrukere samt mindre næringsvirksomheter og industrielle kunder.

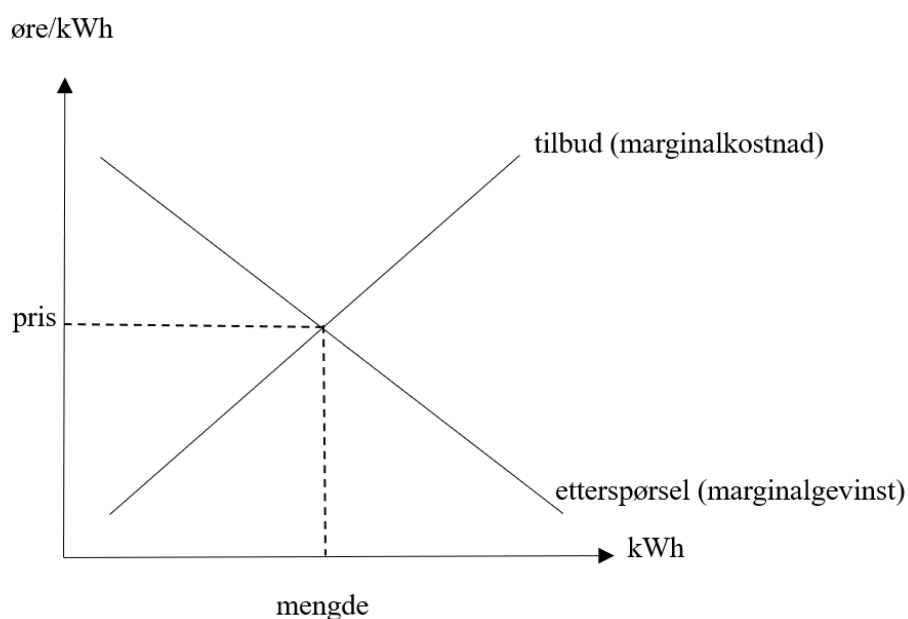
Den tidligste handelen foregår i det finansielle markedet NASDAQ OMX. Handelen i dette markedet kan foregå uker eller dager i forkant, men også opptil flere år før driftstimen. Neste skritt involverer døgemarkedet, Elspot, og intradagmarkedet, Elbas, som begge driftes av Nord Pool. Elbas fungerer som et marked som opererer i Norden, Baltikum, Storbritannia og Tyskland, og spiller en avgjørende rolle i å opprettholde balansen mellom tilbud og etterspørsel. Spesielt er Elbas effektivt i å håndtere endringer i produksjonen, som for eksempel når det er prognoser for sterk vind i Danmark. Dette sikrer at kraftsystemet kan tilpasse seg raskt til variasjoner i kraftproduksjonen for å opprettholde stabilitet og pålitelig strømforsyning

Balanseringsmarkedet administreres av Statnett, som fungerer som systemoperatør i Norge, og har som formål å opprettholde balansen i kraftsystemet i driftstimen. Antallet ressurser som skal være tilgjengelige for balansemarkedet blir fastsatt på forhånd, basert på prognoser for forventet ubalanse. Den norske systemoperatøren (TSO) inngår avtaler med kraftselskaper basert på laveste tilbud, og i driftsøyeblikket blir disse ressursene aktivert i henhold til systemets balansetilstand. Det er viktig å merke seg at kraftselskapene ikke skal holde tilbake produksjon for å tilby den i balansemarkedet, da døgemarkedet skal gjenspeile de faktiske fysiske forholdene i kraftsystemet. Derfor bør hovedfokuset i kortsiktig planlegging være på døgemarkedet. Hvis det allerede er inngått en avtale om volum, tas dette hensyn til i planleggingen av produksjonen for døgemarkedet. (Statnett, 2022)

3.3 Markedskryss - Kraftsystemet må være i balanse

For å ivareta driften av forsyningssikkerhet er kraftbalansen grunnleggende. Kontinuerlig balanse mellom kraftproduksjon og kraftforbruk er en av de mest grunnleggende kravene i ethvert kraftsystem. I teorien består et velfungerende marked av to kurver - en for etterspørsel og en for tilbud. Når disse to kurvene krysser hverandre, får vi en markedslikevekt som gir en pris og mengde som klarer markedet. Dette betyr at tilbud og etterspørsel balanseres, og det ikke er noen overskudd eller mangel på varer i markedet. Figuren nedenfor gir en enkel illustrasjon av dette prinsippet.

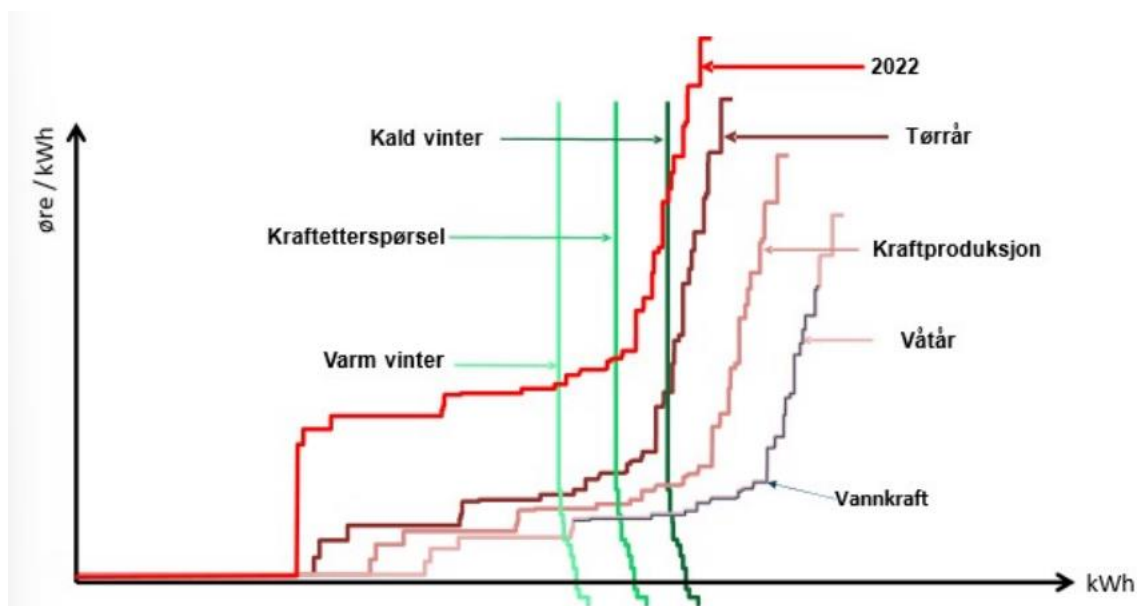
Når prisene er over likevektsprisen, er det vanligvis overskudd av det gode, og produsenter kan ha lagre eller redusere produksjonen. Når prisene er under likevektsprisen, kan det være mangel på det gode, og produsenter kan øke produksjonen for å møte etterspørselen.



Figur 2. For at kraftmarkedet skal være i balanse må tilbudet av elektrisitet imøtekomme etterspørselen til enhver tid i energimarkedet. Figuren illustrerer tilfellet med standard likevektsteori i et perfekt marked.

Når man analyserer det nordiske kraftmarkedet, ser man at tilbuds- og etterspørselskurvene er litt annerledes enn vist ovenfor (kraftetterspørselen er mer uelastisk). Grønne linjer i figuren nedenfor viser etterspørselskurvene som er veldig bratte og kan variere betydelig fra år til år, avhengig av om vinteren er kald eller varm. På den andre siden viser røde linjer tilbudskurvene som inkluderer forskjellige kilder som vannkraft,

vindkraft, solkraft, kjernekraft (Sverige og Finland), gasskraft (Danmark) og andre kilder. Tilbudskurvene har en flat del på venstre side, men blir bratte på høyre side. Tilbudet varierer også fra år til år, avhengig av om det er et tørt eller vått år. Når man kommer inn i den bratte delen av tilbudskurven, kombinert med etterspørselssiden, kan det føre til betydelige økninger i kraftprisene. I tillegg viser figuren en tilbudskurve for 2022 som ligger langt utenfor det vanlige, noe som resulterte i høyere strømpriser enn det som har vært vanlig tidligere.



Figur 2. Tilbuds- og etterspørselskurvene i det nordiske kraftmarkedet. Kilde: (Jaehnert, 2023).

3.4 Utjevningskraft og vannverdi

En viktig ting å forstå i denne sammenhengen er utjevningskraft. Utjevningskraft er den kraften vi flytter fra en periode til en annen og som krever magasin. Med muligheten til å lagre vann får vi utjevningskraft. Utjevningskraft refererer til evnen til å flytte elektrisk kraft fra perioder med overflod til perioder med høy etterspørsel.

Når det kommer til produsentenes optimering innen kraftproduksjon er verdisettingen av vannet i magasinene, vannverdiberegning viktig. I utgangspunktet har ikke vann en direkte pris og kan betraktes som et gratis gode. Dette betyr derimot ikke at vann ikke har en verdi. Vann har i utgangspunktet en høy grad av verdi. Vannverdien er den forventede marginale verdien av lagret vann. Verdien av vann avhenger av tidspunktet i året og hvor fullt magasinene er. Siden vann i seg selv ikke har en direkte kostnad, bestemmes den langsiktige

verdien ved å sammenligne den med alternative kostnader for kraftproduksjon, for eksempel bruk av gasskraft eller forbruksfleksibilitet. (Jaehnert, 2023)

Vannmagasiner gjør det mulig å lagre vann. For å kunne generere høyest mulige inntekter gir magasinene mulighet til å optimalt utnytte vannressursene. Å kunne fordele kraftproduksjonen over tid på en måte som er effektiv er viktig for samfunnet som en helhet for kunne å utnytte tilsiget av vann i løpet av året og forskjellige år på en optimal måte. (Energifaktanorge, 2022)

3.2 Kraftproduksjon

Kraftforbruket i Norge er omtrent 134 TWh per år, og temperaturen er den viktigste faktoren for svingningene i forbruket. Mellom det kaldeste og varmeste året varierer forbruket med 9 TWh eller 3-4% (ifølge Tabell 1). Dette er relativt lavt sammenlignet med variasjonen i fornybare energikilder, som kan variere mellom 12-30%. Dermed har været en større innvirkning på tilgjengeligheten av fornybar kraftproduksjon fra år til år. (NVE, 2020)



Norge	Snitt per år [TWh]	Laveste år [TWh]	Høyeste år [TWh]
Kraftforbruk	134,3	130,3 (-3%)	139,6 (+4%)
Vannkrafttilsig	152,1	106,1 (-30%)	187,0 (+23%)
Vindkraft på land	12,9	11,4 (-12%)	14,7 (+13%)

Tabell 1. Tabellen viser kraftproduksjon og kraftforbruk i Norge i perioden 1979-2019, angitt i terawatt-timer (TWh). Avviket fra gjennomsnittet er oppgitt i parentes. (NVE, 2019)

3.2.1 Vannkraft

Vannkraften dominerer kraftproduksjonen i Norge med en andel på omtrent 90 prosent. Tilsiget til norske vannkraftverk er mer ustabil fra år til år sammenlignet med vind- og solkraft. I løpet av de siste 41 årene har tilsiget variert fra 106 TWh til 187 TWh, og det er umulig å forutsi om året vil være vått eller tørt. Imidlertid har Norge en magasinkapasitet på 87 TWh, som gjør at vi kan takle de store variasjonene i tilsiget. (NVE, 2020)

3.2.2 Vindkraft

På land er gjennomsnittlig kraftproduksjon fra vindkraft ca. 13 TWh. Selv om vindkraftproduksjonen vil forbli mindre enn vannkraften i Norge, er den ikke ubetydelig. NVE informerer om at når alle vindkraftprosjekter som er under utbygging er satt i drift, vil vindkraft utgjøre omtrent 18 TWh eller 13 prosent av den totale kraftproduksjonen i Norge. Hovedsakelig er vindkraftverkene i Norge bygget i kystnære områder. De to hovedgrupperingene befinner seg i Sørvest-Norge (NO2) og i Midt-Norge (NO3). (NVE, 2019)

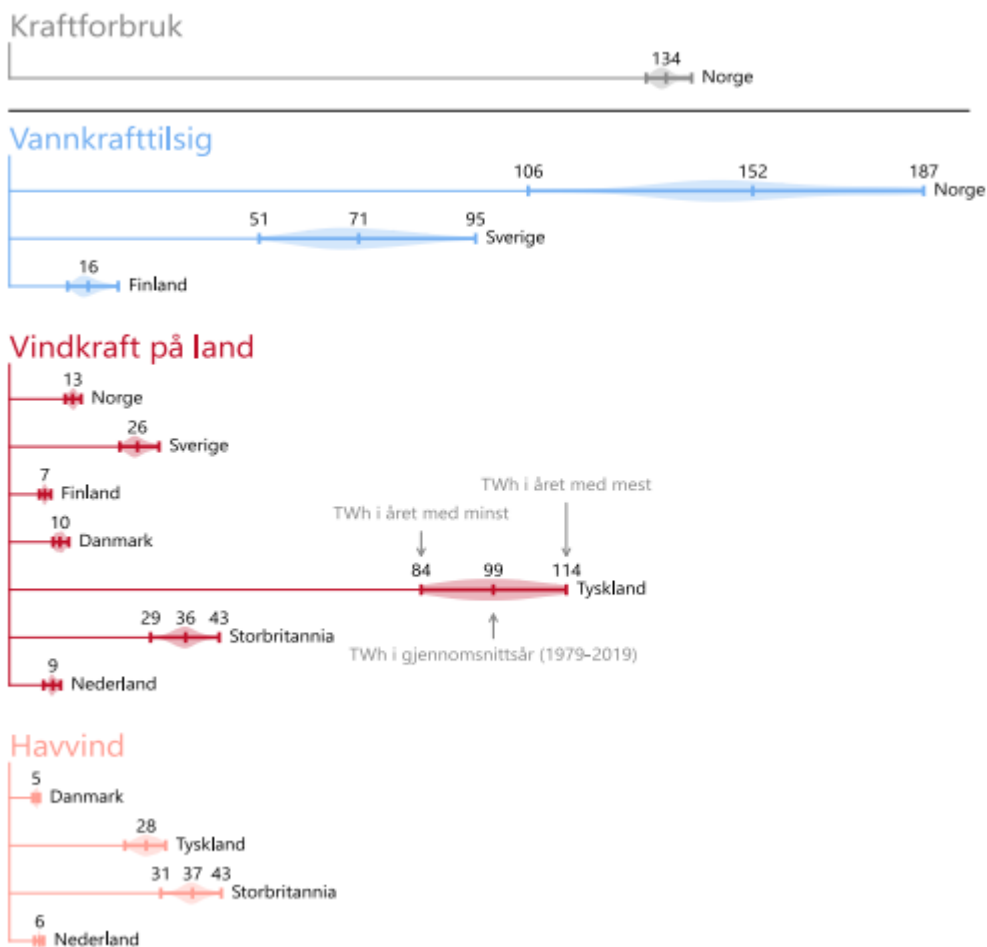
En vindturbin produserer elektrisitet ved å konvertere bevegelsesenergien i vinden til elektrisk energi. Vindens kraft får rotorbladene på turbinen til å rotere, og rotoren er tilkoblet en generator som skaper strøm når den dreies rundt.

Ved starten av 2022 var det installert nesten 4700 MW vindkraft i Norge. Dette gir en gjennomsnittlig produksjon på rundt 15 500 GWh. Hvis vi antar at en vanlig husholdning bruker omtrent 20 000 kWh i året, kan denne elektrisitetsproduksjonen dekke strømbehovet til cirka 773 000 husstander. (NVE, 2020)

3.3 Faktasammenligning av vind- og vannkraft

Når kraftforbruket er høyt om vinteren, produseres det mer vindkraft, men de dagene med høyest forbruk har vanligvis lite vind. Sesongvariasjonene i vindkraft og kraftforbruk sammenfaller godt, som figur 2 illustrerer. Selv om det er mye vind om vinteren når forbruket er høyt, kan man ikke være sikker på at det vil være vind på dagene med høyest forbruk. I slike perioder vil det regulerte vannkraftverket fortsatt spille en viktig rolle. (NVE, 2020)

Vindkrafttilsaget varierer mer fra år til år enn vindkraft. Været påvirker både kraftforbruk og kraftproduksjon. Fra år til år er nedbør, vind og temperatur forskjellig og dette resulterer i variasjoner både i kraftproduksjon og kraftforbruk.



Figur 3. Energi per teknologi i TWh årlig for Norden og land i Norge som enten har eller bygger ut mellomlandsforbindelser, med kun teknologier som har et gjennomsnitt på mer enn 2 TWh/år er inkludert. Kun kraftforbruket for Norge er tatt med i betraktningen, og beregningene er basert på perioden 1979-2019. (NVE, 2020)

På vinteren er kraftforbruket og vindkraftproduksjonen størst. I Norge går omtrent en femtedel av kraftforbruket i året til oppvarming. Kraftforbruket øker om vinteren når det er kaldt, som vi også kan se illustrert i figuren nedenfor. En betydelig andel av forbruket vil være oppvarming i topplasttiden en kald vinterdag.

Sesongvariasjon i Norge



Figur 4. Sesongprofil av hvordan kraftforbruk, vannkrafttilgang og landbasert vindkraft varierer gjennom året i forhold til gjennomsnittet i Norge. (NVE, 2020)

I en analyse fra NVE ser de at vind og vannkrafttilsig har ingen regelmessig variasjon gjennom døgnet. De har brukt døgnoppløsning på tilsiget i deres analyse og antar dermed at døgnprofilen er flat. For enkelte vannføringsserier, for eksempel fra nedbørfelt med stor andel bre, argumenterer de for at det kan være at man ser en døgnvariasjon.

Døgnvariasjon i Norge

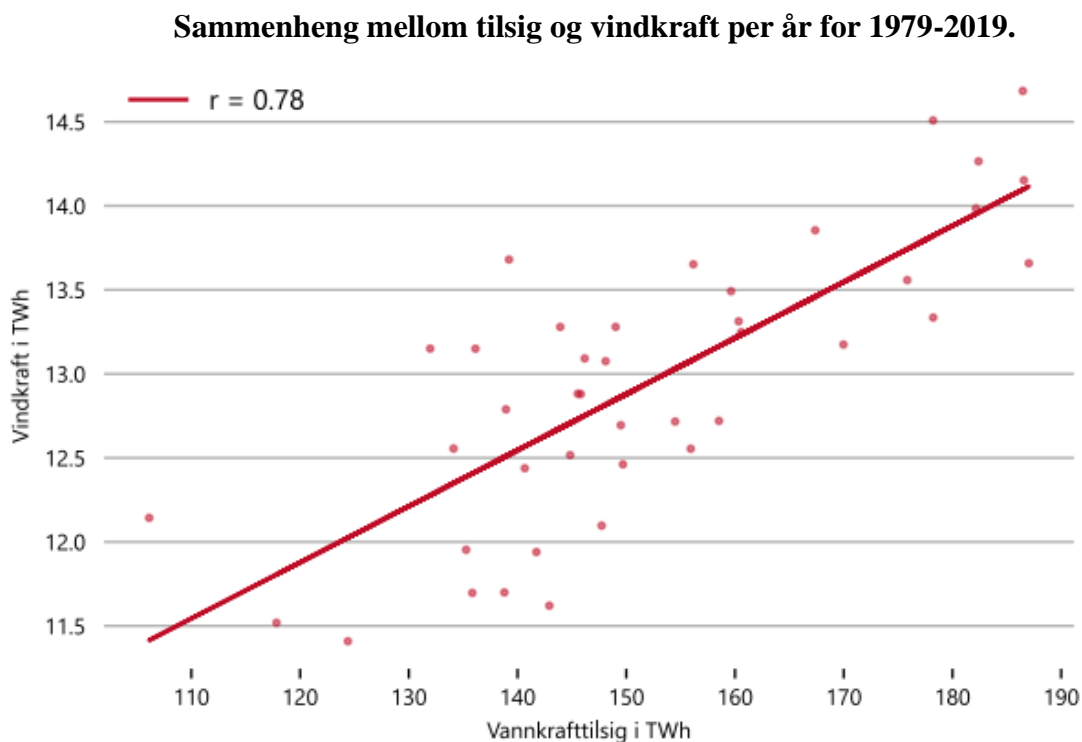


Figur 5. Døgnvariasjon for kraftforbruk, vannkrafttilsig, vindkraft på land og solkraft i Norge i prosent av gjennomsnittet. (NVE, 2020)

Kraftforbruket varierer gjennom døgnet. Adferd har den største påvirkningen på døgnprofilen. På natten når folk sover er kraftforbruket lavt. Mens når folk står opp på morgenen øker kraftforbruket som følge av at folk skal dusje, boligene blir oppvarmet og oppvarming og ventilasjon slås på i yrkes- og næringsbygg. Den andre toppen i døgnet oppstår når folk

kommer hjem på ettermiddagen. Varmen blir slått på igjen, det blir satt på en klesvask, middag blir laget og liknende. Om vinteren er døgnvariasjonen i kraftforbruket større enn om sommeren, og på ukedagene er den større enn i helgene. En stor andel av kraftforbruket ligger jevnt gjennom døgnet som en grunnlast, selv om kraftforbruket varierer gjennom døgnet. Et eksempel på dette er kraftforbruket til industrielle prosesser.

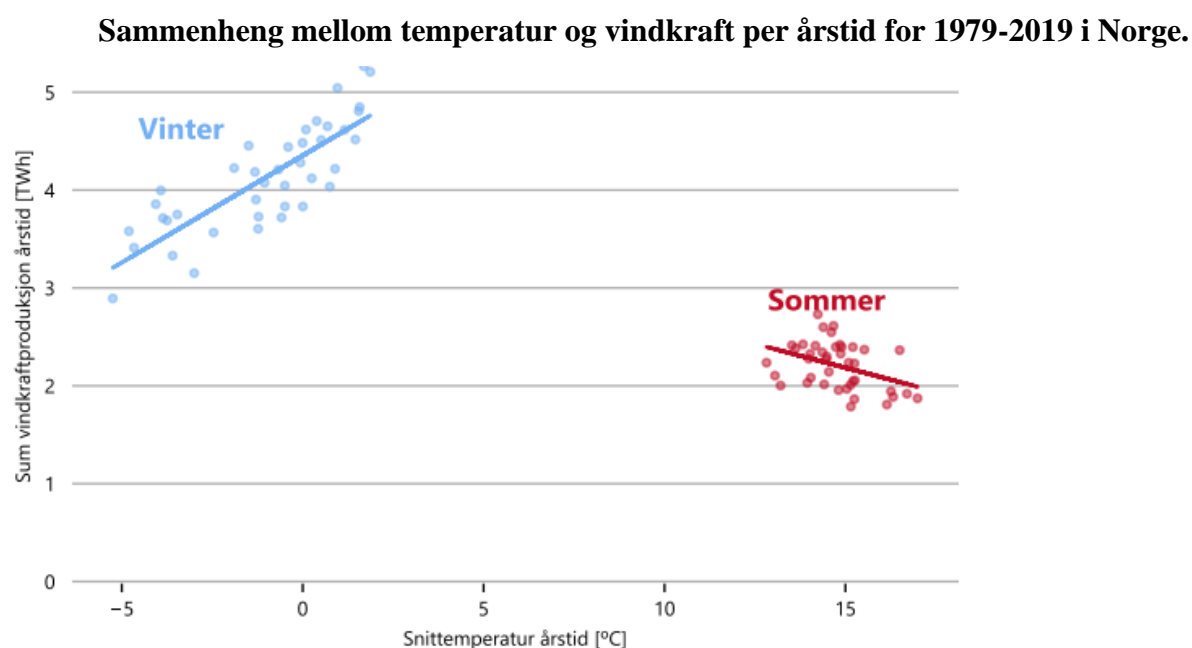
År som er kalde og har lite vind i Nord-Europa sammenfaller med år som har lite vannkrafttilsig i Norden. Den største delen av kraftproduksjonen i Norge kommer fra vannkraft. Tilsiget til vannkraftverkene varierer betydelig fra år til år, og variasjonene kan utgjøre en utfordring for kraftsystemet, selv om vi har store vannmagasiner tilgjengelig. Sammenlignet fra år til år varierer vindkraftproduksjonen mye mindre enn vannkrafttilsaget fra år til år. Som figuren viser nedenfor, er det en tydelig sammenheng mellom årlig tilsig og vindkraftproduksjon i Norge. Lavtrykkssystemer er en kilde til nedbør, og samtidig fører de med seg vind. I motsatt tilfelle oppstår høytrykk, som kjennetegnes av minimal eller ingen vind og nedbør. År med lavt tilsig kan føre til lavere vindkraftproduksjon, mens år med høyt tilsig ofte har høyere vindkraftproduksjon. Dermed spiller vindkraft en mindre rolle i tilgangen av ressurser i år med lite tilsig sammenlignet med år med mye tilsig.



Figur 6. Norsk vindkraftproduksjon og vannkrafttilsig per år. (NVE, 2020)

Perioder med redusert tilsig i Norge er vanligvis forbundet med lavere temperaturer enn gjennomsnittet, noe som øker kraftforbruket. Dette er ikke unikt for Norge, men gjelder hele Nord-Europa. For solkraften finnes det ingen klar sammenheng mellom perioder med redusert tilsig og vind. Når det er både lite tilsig og lite vind samtidig med høyt kraftforbruk, kan dette føre til svekket energibalanse, noe som kan være utfordrende for kraftsystemet. Vannmagasinene vil fortsatt spille en viktig rolle i å håndtere tørrår.

Innad i året er det også værsammenhenger som vi ser i figur 7.



Figur 7. Sammenheng mellom temperatur og vindkraft per årstid for 1979-2019 i Norge. (NVE, 2020)

4 Teori

I denne delen av masteroppgaven vil jeg se nærmere på modelleringen av vannkraft før vi senere implementerer vindkraft i modellen for å se hvordan vann- og vindkraft fungerer sammen. Først vil jeg se nærmere på vannkraftmodellen utarbeidet av Førstund (2015). Det er denne modellen vi tar utgangspunkt videre i oppgaven.

4.1 Vannkraftmodellen

Teorien i denne delen er basert på Finn R. Førstund sin bok «Hydropower Economics» (Førstund, 2015). I boken “Hydropower Economics” tar Førstund for seg å beskrive samspillet av vannkraft i t ($t=1, \dots, T$) perioder. Fra en samfunnsplanleggers ståsted studerer Førstund hvordan man optimalt kan allokere vannkraft over flere perioder. Ved bruk av et badekardiagram prøver Førstund å fange opp forståelsen av et dynamisk vannkraftproblem.

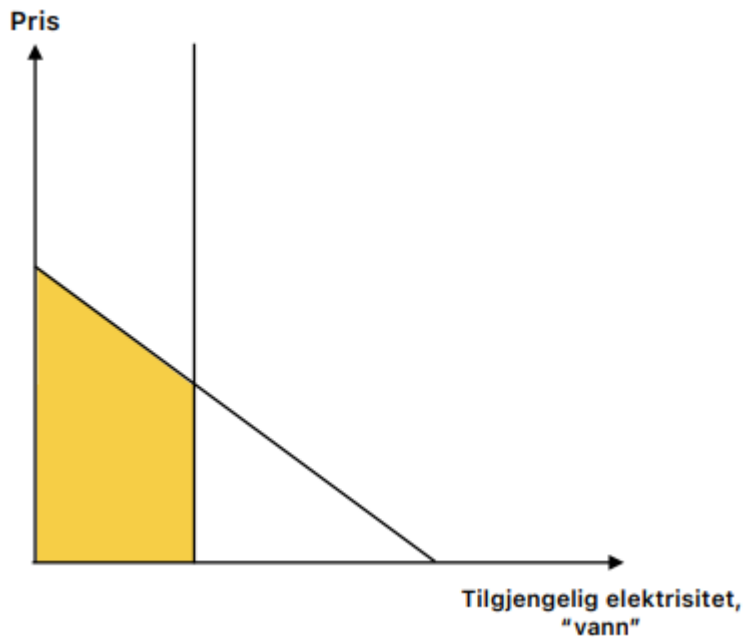
4.2 Den grunnleggende vannkraftmodellen

Vannkraftprodusenter har en annerledes produksjonsstruktur enn de fleste andre produsenter. Vi får et problem uten tilbudsfunksjon siden vann er gitt. For hver tidsperiode, som kan variere fra timer til uker eller til og med halvår, avtegner vi en etterspørselskurve som oppfører seg i tråd med de vanlige kjennetegnene: etterspørselen avtar når prisen øker. Siden vannkraft er svært fleksibel kreves det minimalt med tilsyn. Vi inkluderer dette som en del av de faste kostnadene og forutsetter derfor at de variable kostnadene er null. Da kostnadene knyttet til vannkraft er knyttet til den initielle investeringen, klassifiserer vi de som sunk costs¹. Dette innebærer at det ikke foreligger en marginalkostnadskurve, og derfor vil produsentenes fortjeneste være identisk med forbrukernes betaling (Førstund, 2015).

Den skraverte delen under etterspørselskurven i figur 8 utgjør både produsent- og konsumentoverskuddet i hver tidsenhet. Det vi ønsker å optimalisere, er totalen av disse overskuddene i løpet av den gjeldende tidsperioden. Periodens varighet er avhengig av hva som skal analyseres. Siden mengden vann som tas ut gjennom produksjon innebærer en alternativkostnad som tilsvarer verdien av den samme vannmengden hvis den blir tatt ut i

¹ Sunk costs: «Pådratte kostnader som ikke kan gjenopprettes. Det sentrale poenget er at når visse kostnader har påløpt, og når de ikke kan reverseres, så er de irrelevante i videre økonomiske analyser, vurderinger og/eller beslutninger.» (Gårseth-Nesbakken, 2022)

morgen, blir problemet dynamisk. Over tid må vi kontinuerlig vurdere hvordan vi best kan utnytte denne ressursen på en måte som er samfunnsøkonomisk optimal.



Figur 8. Produksjon og etterspørsel i en periode. Gult skravert område utgjør produsent- og konsumentoverskuddet.

I sammenligning med andre energikilder som produserer elektrisitet, som vindkraft, er ikke dette i utgangspunktet et dynamisk problem. Mengden vind som blir benyttet til kraftproduksjon er en periode til periode-problem og avhenger av vindforholdene i de forskjellige periodene. **Dette ser vi nærmere på i kapittel 5.**

Vannfordelingshorisonten strekker seg sjelden lenger enn ett år, men kan også være i dager, uker, måneder eller år. Når det gjelder kraftproduksjon og forbruk, er det vanligvis høyt forbruk i vintermånedene og på dagtid, mens det ofte er lavt forbruk om sommeren og om natten. Dette gjenspeiler en årlig og daglig syklus. Summen av kraftproduksjon for alle perioder avhenger av både vannet som er lagret i magasinene og tilsig:

$$\sum_{t \in T} e_t^H = R_0 + \sum_{t \in T} w_t = W \quad (4.1)$$

Totalt tilgjengelig tilsig blir her beskrevet som W og gjenværende vann fra perioden før som R_0 .

Vannkraftproduksjonen er avhengig av tilgangen på vann som er en begrenset ressurs. I vannkraftproduksjonen er det viktig å ta hensyn til fremtidig bruk av lagret vann ved å ta

løpende driftsbeslutninger. Tilgangen på vann er en usikker størrelse som følge av at det kommer fra nedbør. Verdien av det lagrede vannet beregnes ved skyggeprisberegninger, som tar hensyn til den fremtidige verdibruken av vannet. Som vi også definerte som vannverdien i kapittel 3.

Reservoar (vannmagasin) i modellen blir angitt som R_t . Tilsig av vann er w_t og elektrisitetsproduksjonen ved bruk av vannkraft er angitt som e_t^H . Bruk av små bokstaver indikerer en endring som skjer i løpet av perioden, mens stor bokstav indikerer situasjonen som gjelder på slutten av perioden. Dette betyr at tilsig av vann skjer i løpet av perioden, mens R_t refererer til mengden vann som er igjen i magasinene ved periodens slutt. Vann som slippes ut i løpet av perioden t , blir omgjort til elektrisitet e_t^H og måles i kilowattimer (kWh) ved bruk av en fast transformasjonskoeffisient som påvirkes av tekniske faktorer som fallhøyde, turbin størrelse, magasin størrelse og konsesjonsbestemmelser som regulerer vanddisponeringen. Selv om lagret og produsert vann kan oppgis i kWh, blir det i modellen oppgitt i elektrisitetsenheter, e_t^H .

Førsund anvender en diskret tidsmodell, som tillater bruk av matematikk for ikke-lineær programmering. Denne modellen inneholder to variabler, nemlig "flow" og "stock," som representerer beholdningsvariabler. «Stock»-variablene må tidsmerkes enten ved begynnelsen eller slutten av hver periode. "Flow"-variablene beskriver mengden som tilføres reservoaret gjennom nedbør, snøsmelting osv., samt mengden som tas ut gjennom produksjonen, som igjen tilsvarer forbruket i modellen.

Dynamikken i vanddisponeringen er basert på vannmagasinfylling og tømming:

$$R_t \leq R_{t-1} + w_t - e_t^H, \quad t = 1, \dots, T \quad (4.2)$$

Ved likhet er vannstanden i periode t , R_t , summen av det som var igjen fra forrige periode, R_{t-1} , pluss tilsig av vann som har kommet til i løpet av periode t , w_t , minus det som har blitt brukt til produksjon, e_t^H . Ethvert avvik, altså ulikhet, fra denne betingelsen vil indikere en ineffektivitet, der begrenset kapasitet i reservoaret fører til at vann som kunne ha blitt brukt til produksjon, ikke utnyttes fullt ut. Dette kan resultere i en situasjon der magasinet er fullt, og tilsiget er større enn produksjonskapasiteten. Strengt ulikheter betyr at det skjer overløp, altså at det er for mye vann i magasinene. Vi antar også "full manøverbarhet", som innebærer at innenfor hver tidsperiode har man muligheten til å tømme hele reservoaret.

I utgangspunktet er dette er en partiell likevektsmodell som ikke samhandler med resten av økonomien. Vi studerer et standard samfunnsplanleggingsproblem for en representativ forbruker, der elektrisitetsforbruket er beskrevet ved hjelp av nyttefunksjoner. For å forenkle problemet utelater vi diskontering.² Diskontering antas å være irrelevant fordi perioden er for kort til å påvirke resultatene I tillegg antar vi at det ikke er usikkerhet knyttet til etterspørsel og tilsig. Selv om dette avviker fra den virkelige verden, kan modellen likevel gi nyttige resultater. For eksempel når vi, som vist nedenfor, ser på to perioder, sommer og vinter, er det sannsynlig at tilsiget er relativt høyt og etterspørselen er lav om sommeren, og omvendt om vinteren, noe som gir en grad av forutsigbarhet selv i den virkelige verden. Nyttefunksjonen er konkav, og for hver periode t :

$$U_t(e_t^H), \text{ der } U_t'(e_t^H) \geq 0, U_t''(e_t^H) < 0, t = 1, \dots, T \quad (4.3)$$

Marginalnyttens blir betegnet som U' . Marginal betalingsvilje, p_t , er den monetære størrelsen vi måler marginalnyttens i. Som følge av at marginalnyttens $U_t'(e_t^H)$ måles i kroner kan den defineres som den marginale betalingsvilligheten for elektrisitet, p_t , og dermed tolkes som etterspørselsfunksjonen på prisform, for elektrisitet:

$$U_t'(e_t^H) = p_t(e_t^H) \quad (4.4)$$

4.2.1 Maksimeringsproblemet for det enkleste tilfellet, grunnleggende modell

Problemet med sosial optimalisering, som går ut på å maksimere nytten av elektrisitetsproduksjonen, kan da uttrykkes som:

$$\begin{aligned} & \text{Maks}\{e_t^H\} \sum_{t=1}^T U_t(e_t^H) \\ \text{slik at} & \sum_{t=1}^T e_t^H \leq W, e_t^H \geq 0, t = 1, \dots, T \\ & W, T \text{ gitt} \end{aligned} \quad (4.5)$$

² Diskontering: Gitt den relativt korte driftshorisonten for et vannkraftverk med magasin, er det ikke nødvendig å inkludere diskontering for å beskrive de kvalitative aspektene ved den optimale tilpasningen. Det er likevel verdt å merke seg at det finnes flere flerårsmagasiner i Norge, med en driftshorisont på tre til fem år. (Førsund, 2015).

4.2.2 Løsning

Lagrangefunksjonen for optimaliseringsproblemet blir da:

$$L = \sum_{t=1}^T U_t(e_t^H) - \lambda \left(\sum_{t=1}^T e_t^H - W \right), \quad (4.6)$$

λ er Lagrange parameteren.

Førsteordensbetingelsene for problemet, der alle variablene er ikke-negative, blir:

$$\begin{aligned} \text{(Y)} \quad \frac{\partial L}{\partial e_t^H} = U_t'(e_t^H) - \lambda \leq 0 \quad (&= 0 \text{ for } e_t^H > 0), t = 1, \dots, T \\ \lambda \geq 0 \quad (&= 0 \text{ for } \sum_{t=1}^T e_t^H < W) \end{aligned} \quad (4.7)$$

De endogene variablene er e_t^H , λ ($t = 1, \dots, T$), $T + 1$, og de eksogene variablene er W og T . Antallet ligninger er T førsteordensbetingelsene i (4.7) og ressursbegrensningen fra (4.5), som gir like mange endogene variabler som ligninger. Vi gjennomfører en kvalitativ analyse med forutsetning om at det eksisterer en unik løsning på problemet (4.5).

En tilstrekkelig betingelse for en løsning på maksimeringsproblemet (4.5) er at Lagrangefunksjonen (4.6) er konkav, noe som er oppfylt under våre forutsetninger. Derfor retter vi oppmerksomheten mot tolkningen av førsteordensbetingelsene (4.7).

Fra Kuhn-Tucker-betingelsene (4.7) vet vi at den marginale nytten av strømforbruket er lik skyggeprisen på ressursbegrensningen hvis vi har en innvendig løsning (*interior solution*) på energiforbruket i periode t , dvs. $e_t^H > 0$. Skyggeprisen på ressursbetingelsen er null dersom den ikke er bindende. Den generelle tolkningen av en skyggepris på en begrensning er at den viser endringen i målfunksjonen som følge av en marginal endring i begrensningen. I vårt tilfelle viser skyggeprisen økningen i summen av nytteverdiene i alle periodene som følge av en marginal økning i lagret vann, W .

I en så sterkt stilisert modell som den beskrevet ovenfor, er det rimelig å anta at det er positivt forbruk av elektrisitet i hver periode, og at forbruket ikke mettes, dvs. at den marginale nytten er positiv i alle perioder. Det følger derfor at skyggeprisen på ressursbegrensningen må være

positiv. Den typiske konklusjonen i denne grunnleggende modellen med en gitt mengde ressurser er at den marginale nytten av elektrisitet er konstant og lik for alle perioder:

$$U'_t(e_t^H) = \lambda \text{ for } t = 1, \dots, T \quad (4.8)$$

Gitt at den marginale nytten er lik elektrisitetsprisen (som vist ovenfor, likn), vil prisen i periode t være lik skyggeprisen:

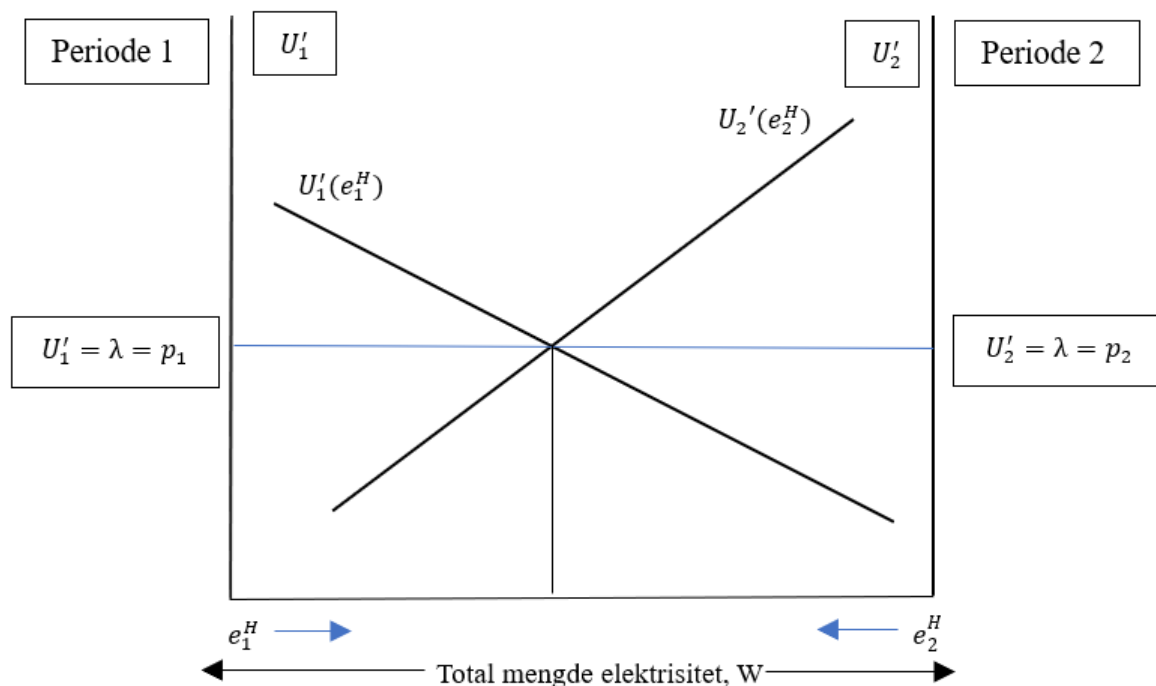
$$U'_t(e_t^H) = p_t(e_t^H) = \lambda \quad (4.9)$$

Prisene vil bli satt lik i alle periodene og løsningen til denne grunnleggende modellen ligner på likevekt under perfekt konkurranse. Dersom prisene varierer, vil alle produsentene ønske å selge sine produkter i perioden med den høyeste prisen, noe som fører til en ubalanse mellom tilbud og etterspørsel. Derfor vil den optimale løsningen være at prisene er like i alle perioder.

4.2.3 Badekardiagram for det enkleste tilfellet

For å forklare den dynamiske vannkraftmodellen illustrerer Førsund dette ved bruk av badekardiagram for to perioder. Bredden i diagrammet viser den totale mengden energi for de to periodene, dvs. totalt tilsig ($e_1^H + e_2^H = W$). På hver sin side av de vertikale aksene i diagrammet er de marginale betalingsvillighetsfunksjonene for periodene målt.

Marginalnyttens eller konsumentenes betalingsvilje i hver av periodene representeres på de to vertikale aksene. Energi skal fordeles mellom periodene og skyggeprisen på energi er lik marginal nytte av energi i hver periode. Man kan tolke allokeringproblemet som å finne den optimale tidsfordelingen av energiproduksjonen over flere perioder. Dette innebærer å bestemme når energien skal produseres slik at samfunnets velferd maksimeres.



Figur 9. Badekardiamgram som illustrer optimal allokering av vannkraft over to perioder.

De to kurvene illustrerer etterspørselsfunksjonene/marginalnyttefunksjonene i hver periode. Skyggeprisen på energi er lik den marginale nytten av energi for alle perioder, noe som betyr at den marginale nytten er den samme i begge periodene. I de to periodene blir optimal allokering av elektrisitet der marginalnyttefunksjonene krysser hverandre, og vi får:

$$U'_t(e_t^H) = \lambda = p_t(e_t^H) \text{ for } t = 1, 2 \quad (4.9)$$

Dette er også forenelig med løsningen for perfekt konkurranse da dette betyr at all tilgjengelig energi blir produsert og konsumert.

4.3 Magasinbegrensning

I et vannkraftsystem kan det være mange begrensninger. Et eksempel på en begrensning i vannkraftsystemet er at mengden vann som kan lagres ikke kan overstige kapasiteten \bar{R} , dvs. $R_t \leq \bar{R}$. Miljøhensyn kan også kreve at magasinene har en viss minstefylling, $R_t \geq \underline{R}_t$.

Videre kan regulering av øvre og nedre vannføring i elver være begrenset til vannmengder mellom \underline{e}_t^H og \bar{e}_t^H . Kraftstasjonenes evne til å produsere elektrisk kraft varierer basert på en rekke faktorer, inkludert størrelsen på turbinene, tykkelsen på vannrørene som fører til turbinene og fallhøyde. Den elektriske kraften må ikke overskride den maksimale effekten

som er tilgjengelig, $e_t^H \leq \overline{e_t^H}$. Effektkapasiteten må altså være mindre eller like den maksimale effektkapasiteten.

I et system med begrensninger på magasinkapasitet, må man fordele vannet som er lagret i magasinene mellom ulike perioder. Magasinene vil ha en bestemt økonomisk verdi basert på prisen produsentene kan oppnå ved å bruke dette vannet i neste periode. Med andre ord, det lagrede vannet vil ha en vannverdi som representerer den potensielle inntjeningen for produsentene når de bruker vannet til produksjon i fremtiden. Det er derfor viktig å effektivt fordele vannet for å maksimere denne verdien og oppnå optimal økonomisk ytelse for vannsystemet.

T er når tidsperioden ender. Skyggeprisen etter periode T, T+1, må derfor være lik 0. I periode T er vannmagasinet enten tomt, $R_t = 0$, eller så vil det være gjenværende vann i magasinet i slutten av perioden, $R_t > 0$. I dette tilfellet er $R_t = 0$, altså at vannverdien er positiv til siste dråpe. I den siste perioden vil vi ha knapphet noe som gir vannet en økonomisk verdi. Skyggeprisen ved øvre grense er fastsatt til null, da det ikke kan oppstå knapphet mens magasinene er fullstendig fylt. Dersom øvre grense ikke nås i noen av periodene vil alle periodene opp til T dermed ha en positiv vannverdi. Hvis magasinet kun tømmes i siste periode og øvre magasingrense aldri nås vil prisen på elektrisitet være positiv og konstant i samtlige perioder, inkludert den siste perioden T (Førsund, 2015). Dersom det er to perioder med lagringsknapphet, vil det være høyere priser mellom disse to periodene. Prisene på strøm vil variere mellom periodene når det er begrensninger i lagringskapasiteten, selv om det ikke er oversvømmelse av magasinene. Når beskrankningene er bindende oppstår det prisforskjeller i dette modelloppsettet. Muligheten for å realisere den sosialt optimale løsningen oppstår ikke, som følge av at reservoaret er for lite til å overføre tilstrekkelig mye vann. Optimaliseringsproblemet nedenfor illustrer dette.

4.3.1 Maksimeringsproblemet med magasinbegrensning i t-perioder

Målet for vannkraftprodusenter er å flytte vann til perioder med høy etterspørsel for å maksimere profitten, men de kan støtte på begrensninger i reservoarkapasiteten, produksjonskapasiteten, overføringskapasiteten, og så videre. Det vi skal fokusere på i denne oppgaven er begrensninger i reservoarkapasitet og produksjonskapasitet. Dersom det oppstår

prisforskjeller mellom de ulike tidsperiodene, er hensikten å optimalt flytte vannressurser til den tidsperioden der prisene er høyest.

Maksimeringsproblemet med magasinbegrensning kan bli satt opp som følgende likningsett:

$$\text{Maks } \{e_t^H, R_t\} \sum_{t=1}^T \int_0^{e_t^H} p_t(z) dz$$

slik at (4.10)

$$R_t \leq R_{t-1} + w_t - e_t^H$$

$$R_t \leq \bar{R}$$

$$R_t, e_t^H \geq 0,$$

$$t = 1, \dots, T$$

W, \bar{R} gitt, R_t fri

\bar{R} er maksimal kapasitet som kan overføres mellom to periode og betingelsene i (4.10) beskriver reservoar-kapasiteten. Vi maksimerer med hensyn på variablene e_t^H , produksjon, og R_t , vannstand etter endt periode t . Resultatet av denne prosessen gir oss et standard ikke-lineært optimeringsproblem som inneholder ulikheter i bi-betingelsene. Førsteordensbetingelsene som vi deretter utleder ved å løse dette problemet, er kjent som Kuhn-Tucker-betingelsene.

4.3.2 Løsning med magasinbegrensning

Lagrangefunksjonen for optimaliseringsproblemet blir da:

$$L = \sum_{t=1}^T \int_0^{e_t^H} p_t(z) dz - \sum_{t=1}^T \lambda_t (R_t - R_{t-1} - w_t + e_t^H) - \sum_{t=1}^T \gamma_t (R_t - \bar{R}) \quad (4.11)$$

Deriverer med hensyn på de endogene variablene og får følgende førsteordensbetingelser:

$$\frac{\partial L}{\partial e_t^H} = p_t(e_t^H) - \lambda_t \leq 0 \quad (= 0 \text{ når } e_t^H > 0) \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial R_t} = -\lambda_t + \lambda_{t+1} - \gamma_t \leq 0 \quad (= 0 \text{ når } R_t > 0) \quad (4.13)$$

Videre har vi følgende betingelse for komplementære slakkhetsbetingelser:

$$\lambda_t \geq (= 0 \text{ når } R_t < R_{t-1} + w_t - e_t^H) \quad (4.14)$$

$$\gamma_t \geq 0 (= 0 \text{ når } R_t < \bar{R}) \quad (4.15)$$

(4.12) I optimum er prisen lik skyggeprisen på vann når vannkraftproduksjonen er positiv.

(4.13) Skyggeprisen på vann vil være lik i begge perioder, dette antyder at prisen er konstant.

(4.14) Skyggeprisen på vann er større eller lik null.

(4.15) Skyggeprisen på magasinkapasiteten er større eller lik null.

Antar ved at Lagrangefunksjonen er konkav at problemet har en unik løsning og at vi i hver periode har positiv produksjon, $e_t^H > 0$, og får følgende:

$$(4.16) \quad p_t(e_t^H) = \lambda_t, \quad t = 1, \dots, T$$

Parameterne vi tildeler betingelsene i Lagrange-funksjonen, tolker vi som vanlig som skyggepriser. En skyggepris representerer den endringen i verdien av en målfunksjon, under optimale forhold, for en marginal endring i den tilhørende begrensningen. λ_t beskriver derfor endringen i brutto konsumentoverskudd som følge av en marginal økning enten i overføringen av vann fra forrige periode, $\Delta R_{t-1} > 0$, eller økt tilsig, $\Delta w_T > 0$. λ_t representerer dermed en alternativkostnad og er lik den sosiale prisen i en optimal løsning. Dette betyr imidlertid ikke nødvendigvis at λ_t ikke kan være null, da λ_t kan være null i situasjoner med oversvømmelse, som følger fra ligning (4.14). λ_t kalles vannverdien for tidspunkt t , og beskriver verdien av å bruke vann i den påfølgende perioden, $t + 1$. Som følge av at vannet kan lagres og benyttes i en senere periode oppstår alternativkostnaden på vannverdien. Vannverdien er lik den samfunnsøkonomiske optimale prisen i den optimale løsningen med positiv produksjon.

4.4 Vannkraft i en to-periodemodell

4.4.1 Ingen begrensning på reservoar-kapasitet

I videre modellering velger vi å illustrere problemet noe forenklet, ved å fokusere på kun to perioder, $T=2$.

Vi forenkler problemet ved å se på kun to perioder og ingen begrensning på reservoar-kapasiteten. Periode 1 representerer sommeren med relativt lav etterspørsel og høyt tilsig, mens periode 2 representerer vinteren med høy etterspørsel og lavt tilsig. En antagelse vi tar er at det ikke kan være optimalt å la magasinet renne over som følge av at etterspørselen etter elektrisitet aldri mettes. Dette gir likhet i (4.2) og vi får:

$$R_1 = R_0 + w_1 - e_1^H \quad (4.17)$$

$$R_2 = R_1 + w_2 - e_2^H \quad (4.18)$$

Det optimale scenarioet vil innebære at maksimal produksjon tilsvarer summen av tilsig i periode 1 og 2, samt vannstanden som ble bevart fra periode 0.

$$e_1^H + e_2^H = R_0 + w_1 + w_2 \quad (4.19)$$

Dersom vi antar at magasinbeholdningen er positiv og at lagringskapasiteten ikke blir utnyttet maksimalt $0 < R_t < \bar{R}$, vil skyggeprisen på magasinkapasiteten, γ_t være null. Dette ser vi fra betingelse (4.15). Som følge av dette vil vi fra (4.13) få at vannverdien er lik i begge de to periodene:

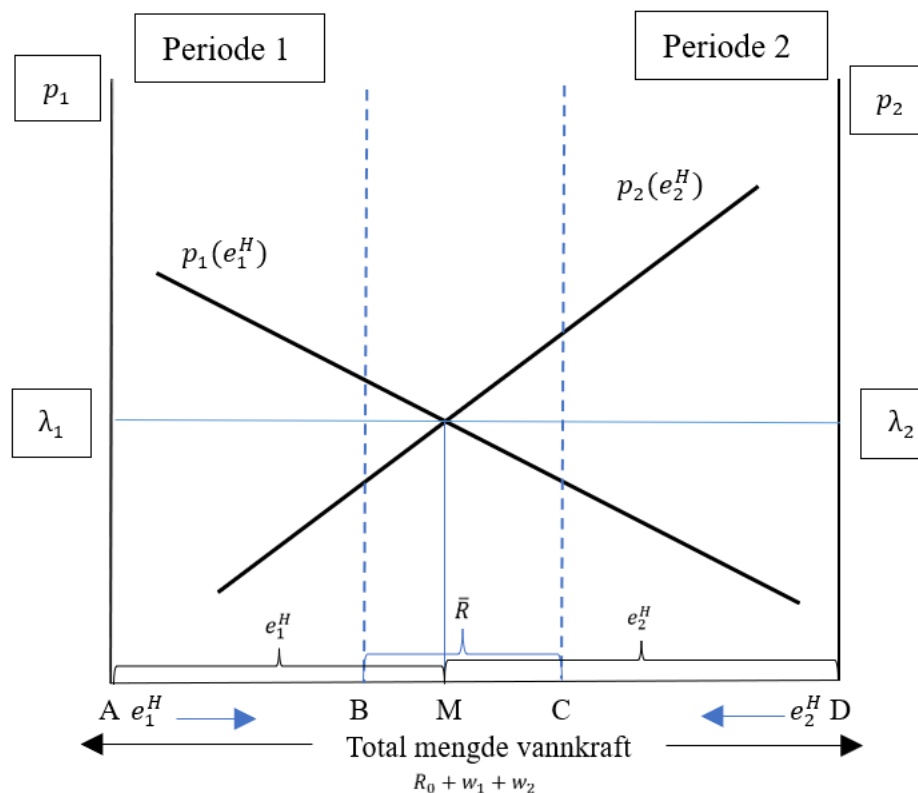
$$\lambda_1 = \lambda_2 \quad (4.20)$$

Fra (11) ser vi at den optimale tilpasningen fører til like priser i begge periodene og det er ikke mulig å oppnå økonomisk gevinst ved en annen allokering av vann mellom de to periodene:

$$p_1(e_1^H) = p_2(e_2^H) \quad (4.21)$$

4.4.2 Badekardiagram med ikke-bindende reservoarbegrensning

Dette prinsippet blir best illustrert gjennom bruk av et badekar-diagram, der (4.19) fungerer som en representasjon av "gulvet" og viser den samlede mengden tilgjengelig vann i begge periodene. Etterspørselskurvene for henholdsvis periode 1 og periode 2 er knyttet til hver sin sidevegg. I figur 11 kan vi se at lengden AC representerer den tilgjengelige vannmengden i periode 1 ($R_0 + w_1$). BC viser magasinkapasiteten, mens CD svarer til tilsiget i periode 2 (w_2). I optimal situasjon blir MC overført til produksjon i periode 2.



Figur 10. Badekardiagram med en ikke-bindende reservoarbegrensning. Optimal tilpasning i en to-periodemodell uten magasinknappet.

4.4.3 Begrenset reservoar-kapasitet i en to-periodemodell

Sammenlignet med tilfellet uten begrensning på reservoar-kapasiteten vil en begrensning på reservoar-kapasiteten føre til to ulike priser i de to gitte periodene. Produsentene vil typisk tømme sine magasiner om vinteren og fylle de igjen om våren og sommeren for å maksimere vannverdien mellom sesongene.

I vår videre analyse har vi valgt å forenkle modellen for å tydeliggjøre problemet. Dette er karakteristisk for å gjøre modellene mer håndterbare og lettere å analysere. I den opprinnelige modellen hadde vi en situasjon der vi vurderte energiproduksjon og forbruk over flere tidspunkter (T), og vi inkluderte en integralform for å representere kostnadene knyttet til denne produksjonen og forbruket. Modellen hadde også en magasinbegrensning.

4.4.4 Maksimeringsproblemet med magasinbegrensning

I vår forenklede modell velger vi å fokusere på kun to perioder, $T = 2$, for å gjøre analysen mer overkommelig. Dette gjør at vi kan uttrykke maksimeringsproblemet på en mer forståelig måte. Maksimeringsproblemet i forbindelse med magasinbegrensning blir følgende:

$$\begin{aligned} & \text{Maks}\{e_1^H, e_2^H\} \sum_{t=1}^2 U_t(e_t^H) \\ \text{slik at} & \qquad \qquad \qquad (4.22) \\ & e_1^H + e_2^H \leq W \\ & e_2^H \leq \bar{R} \\ & R_t, e_t^H \geq 0, t = 1, 2 \\ & W, \bar{R} \text{ gitt} \end{aligned}$$

e_1^H og e_2^H representerer mengden energi som produseres i henholdsvis periode 1 og periode 2. W er en total produksjonsbegrensning som sier at den totale produksjonen i de to periodene må være mindre enn eller lik W . \bar{R} representerer en begrensning på hvor mye energi som kan lagres mellom periodene, mengden energi lagret i periode 2, e_2^H , må være mindre enn eller lik \bar{R} . R_t , og e_t^H må være ikke-negativ for alle $t=1,2$.

Sammenlignet med Førsund sin modell velger vi i denne forenklede modellen å erstatte den

integrerte kostnadsfunksjonen $\sum_{t=1}^T \int_0^{e_t^H} p_t(z) dz$ med $\sum_{t=1}^2 U_t(e_t^H)$ for å representere nytten knyttet til produksjonen i hver periode. Dette er mulig fordi $U_t'(e_t^H) = p_t(e_t^H)$, noe som gir oss en ekvivalens mellom nytte og pris, $\int_0^{e_t^H} p_t(z) dz = \int U_t'(e_t^H) = U_t(e_t^H)$.

4.4.5 Lagrangefunksjonen med magasinbegrensning

Lagrangefunksjonen for problemet er da gitt ved:

$$L = U_1(e_1^H) + U_2(e_2^H) - \lambda(e_1^H + e_2^H - W) - \mu(e_2^H - \bar{R}) \quad (4.23)$$

Deretter blir førsteordensbetingelsene for løsningen:

$$\frac{\partial L}{\partial e_1^H} = U_1'(e_1^H) - \lambda = 0 \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial e_2^H} = U_2'(e_2^H) - \lambda - \mu = 0 \quad (4.25)$$

Sammenfattende betyr likningen $\frac{\partial L}{\partial e_1^H} = U_1'(e_1^H) - \lambda = 0$ at i den optimale løsningen for problemet, er endringen i nytten, $U_1'(e_1^H)$, forårsaket av en økning i mengden energi produsert i periode 1, e_1^H , akkurat tilstrekkelig til å oppveie skyggeprisen, λ , for begrensningen på total produksjon, $e_1^H + e_2^H \leq W$. Med andre ord, dette er en likevektsbetingelse som sier at den økonomiske fordelen ved å produsere mer i periode 1 (målt ved $U_1'(e_1^H)$) akkurat kompenseres for kostnaden ved å overskride produksjonsbegrensningen (målt ved λ).

(4.25) er en likevektsbetingelse som sier at den økonomiske fordelen ved å produsere mer i periode 2 (målt ved $U_2'(e_2^H)$) akkurat kompenseres for kostnadene ved å overskride både produksjonsbegrensningen og lagringsbegrensningen.

Disse betingelsene gir oss følgende:

$$U_1'(e_1^H) = \lambda = p_1(e_1^H) \quad (4.26)$$

$$U_2'(e_2^H) = \lambda + \mu = p_2(e_2^H) \quad (4.27)$$

Deretter kan vi uttrykke μ som:

$$\mu = p_2(e_2^H) - \lambda \quad (4.28)$$

og vi får:

$$\mu = p_2(e_2^H) - p_1(e_1^H) \quad (4.29)$$

μ er skyggeprisen på magasinet og forteller hva som er verdien på marginen av et større magasin. Når $\mu = p_2(e_2^H) - p_1(e_1^H)$ betyr det at verdien av ekstra energi lagret i magasinet er lik differansen mellom prisen på energi i periode 2, p_2 , og prisen i periode 1, p_1 . μ representerer vannverdien i denne sammenhengen og vannverdien er lik prisdifferansen i

løpet av de to periodene. Dette uttrykket gir en indikasjon på hvor mye ekstra nytte (eller kostnad) som er knyttet til å øke lagringskapasiteten.

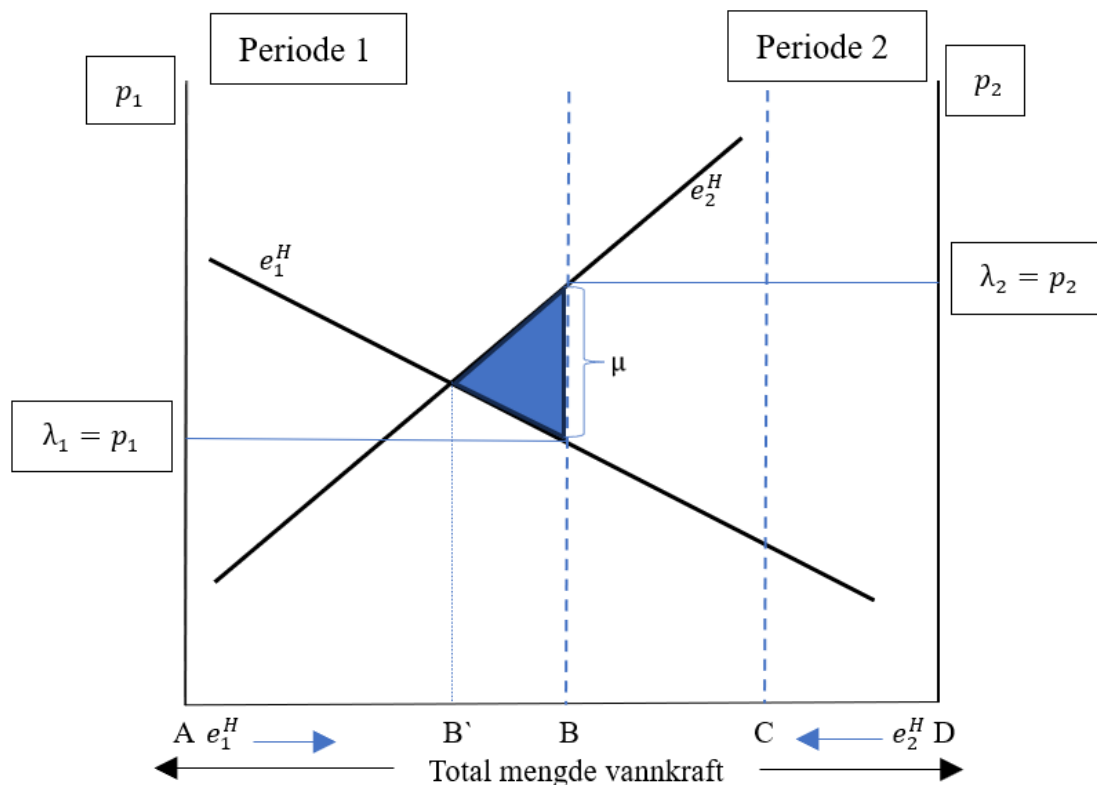
Med andre ord, hvis μ er positiv, betyr det at det er økonomisk lønnsomt å øke mengden energi lagret i magasinet. Hvis μ er negativ, kan det være mer kostbart å lagre mer energi enn det er verdt på det aktuelle tidspunktet. Høyere pris i periode 2 sammenlignet med prisen i periode 1 gjør at magasinet får en høyere verdi, sammenlignet dersom det var høyere pris i periode 1 enn periode 2. Behovet for å lagre vannmengde til neste periode blir da lavere som følge av at vannkraftprodusent vil ønske å produsere strøm i perioden med høyere strømpris.

Når μ er høy, kan det være mer lønnsomt for energiprodusenten å øke energilagringen for å dra nytte av den økte prisdifferansen. Dette kan inkludere å lagre mer energi i perioden med lav pris og selge den i perioden med høy pris.

Dette begrepet er viktig for å ta beslutninger om hvordan man skal administrere energilagring i vannkraftsystemer og forstå den økonomiske betydningen av magasinbegrensninger som vi skal se videre på i oppgaven. Senere i oppgaven skal vi implementere vindkraft i modellen for å se om vi får et annerledes utfall.

4.4.6 Badekardiagram med begrenset reservoarkapasitet

Avstanden AC er tilsig i første periode og CD er tilsig i andre periode. AD er dermed det totale tilsiget. BC er lagringskapasiteten. Den beste måten å fordele ressursene på vil være å lagre maksimalt det som representeres av BC, i løpet av periode 1, og forbruke AB i samme periode siden dette ikke kan lagres. I den andre perioden blir all vannmengden som ble lagret fra periode 1, det vil si BC, konsumert, i tillegg til den vannmengden som kommer inn i denne perioden, som er CD. Dette fører til at det ikke er noe vann igjen i magasinet etter denne perioden. Prisene i de to periodene blir forskjellige og μ er prisdifferansen mellom periodene.



Figur 11. Situasjonen med vannkraft før vind med full kapasitetsutnyttelse av vannmagasin

I løpet av den første perioden ville det vært ideelt å overføre en større andel vannmengde til den andre perioden. Imidlertid, på grunn av kapasitetsbegrensning, ender man opp i en situasjon der det er risiko for ressursmangel. Prisen vil bli presset nedover som følge av at «spill» aldri er optimalt. I den andre perioden er det ikke tilstrekkelig nok tilgjengelig vannmengde for å kunne oppnå den samfunnsøkonomiske optimale prisen. Prisen i periode 2 vil da bli presset oppover som følge av det oppstår en situasjon med ressursknapphet. μ representerer skyggeprisen for reservoarkapasitetsøkningen. Denne forskjellen indikerer endringen i verdifunksjonen som oppstår som følge av en marginal endring (økning?) i reservoarkapasiteten. Maksimal mengde vann som burde bli overført mellom periodene er $B'C = \bar{R}$. Hadde dette vært tilfellet ville vi fått lik pris i begge periodene som vist ovenfor. Det skraverte området representerer samfunnsøkonomisk tap, også kjent som dødvektstap, som oppstår som en følge av kapasitetsbegrensningene.

5 Vindkraftmodell

For å forstå hvordan vann- og vindkraft fungerer sammen vil vi først se på vindkraft som eneste kilde til elektrisitetsproduksjon. Gjennomgående i de følgende scenarioene vil vi bygge på etterspørsel som kjennetegnes av økt behov for elektrisitet i periode 2 sammenlignet med periode 1.

Vindkraftmodellen tar hensyn til tilstedeværelsen av vindkraftproduksjonen i en økonomi. Imidlertid introduserer vindens natur en rekke utfordringer når vi anvender tradisjonelle økonomiske analyser. Det kan være utfordrende å anvende Førsunds badekardiagram i denne sammenhengen fordi vind er noe som er eksogent gitt og kan ikke fordeles og lagres til neste periode på samme måte som vann kan. Dette krever en alternativ tilnærming for å forstå hvordan vind påvirker prisingen og etterspørselen etter elektrisitet i økonomien.

I et teoretisk scenario der hele energiproduksjonen er basert på vindkraft, ville vi stå overfor betydelige begrensninger. Vind er en uforutsigbar og uregulerbar energikilde, og produksjonen av elektrisitet fra vindkraft avhenger direkte av vindforholdene. For å opprettholde en stabil elektrisitetsforsyning, må vi være avhengige av gunstige vindforhold i alle perioder, noe som er urealistisk. Følgelig ville et energimarked som utelukkende er avhengig av vindkraftproduksjon føre til betydelige utfordringer, inkludert etterspørselsoverskudd og manglende likevekt i markedet. Dette blir illustrert nedenfor.

For å forstå begrensningene i vindkraftmodellen, må vi se på hvordan produksjonsmengden er knyttet til vindforholdene. Vindkraftproduksjon er begrenset av naturkreftene. Når vindhastigheten overskrider 25–28 meter per sekund, må de fleste vindturbiner stoppes for å unngå skade på komponentene. (Wold, 2023).

Ved å omdanne bevegelsesenergien i vinden til elektrisk energi produserer vindturbinen strøm. Matematisk kan vi formulere produksjonen av vindkraft på følgende måte:

$$0 \leq e_t^W \leq \eta_t \bar{e}^W \quad (5.1)$$

I denne sammenhengen representerer symbolet " \bar{e}^W " den tilgjengelige produksjonskapasiteten. " η_t " er en vindkoeffisient som beskriver de gjeldende vindforholdene. For andre former for uregulerbar kraftproduksjon kan denne koeffisienten for

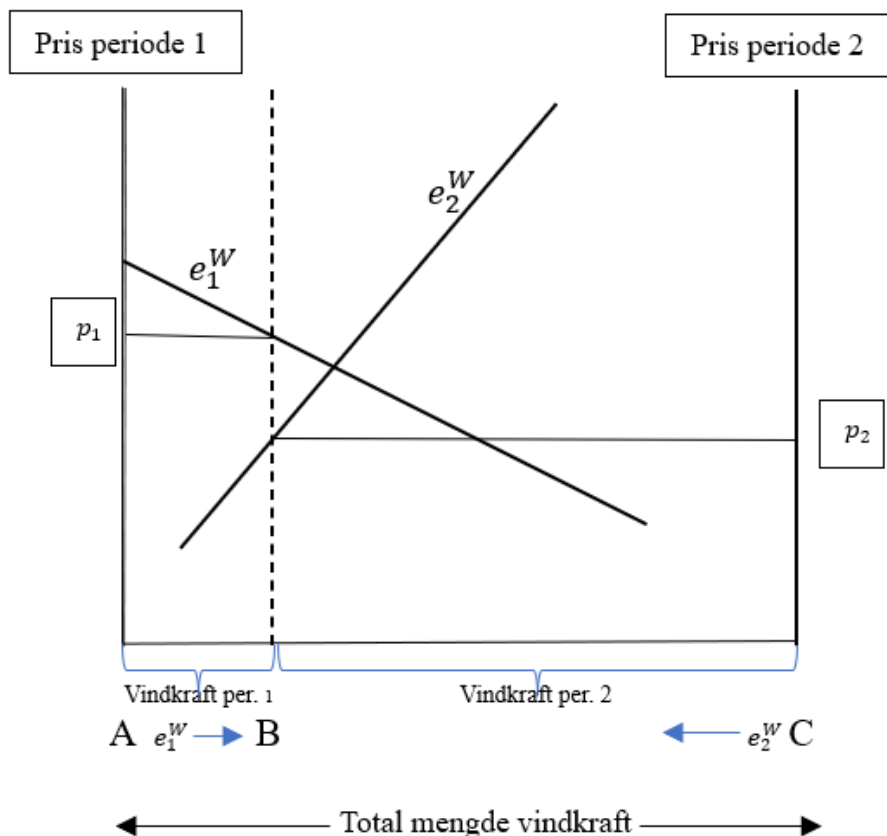
eksempel representere mengden vann som strømmer i en elv. Når " $\eta_t = 0$," indikerer det at det er helt vindstille, og derfor vil produksjonen være null for vindkraft. Hvis " $\eta_t = 1$," betyr det at vindmøllene opererer ved maksimal kapasitet.

Denne situasjonen gir begrenset fleksibilitet i produksjonen av vindkraft, da produksjonen er sterkt avhengig av værforholdene. I kontrast til vannkraft, som har lagringskapasitet og derfor gir muligheten til å tilpasse kraftproduksjonen til etterspørselen, er produksjonen av vindkraft i stor grad determinert av uforutsigbare faktorer.

5.1 Badekardiagram med vindkraft

I figuren nedenfor er produksjonsmengden eksogent gitt i begge periodene noe som betyr at det ikke er mulig å justere produksjonsmengden for å maksimere nytten i de to periodene. Som i Førsund sin modell benytter vi oss av $\sum_{t=1}^2 U_t(e_t^w)$ som representerer den totale nytten av elektrisitetsproduksjonen over to perioder. $U_t(e_t^w)$ er nyttefunksjonen for elektrisitetsproduksjonen i tidspunktet t , avhengig av mengden elektrisitet produsert av vind i tidspunktet t , e_t^w . Den optimale produksjonsmengden i begge periodene vil være gitt den eksogene verdien av vindkraftproduksjonen.

Som følge av at det blåser mer om vinteren, sammenlignet med sommeren, illustrer vi en figur der det blåser mer i periode 2 sammenlignet med periode 1. Vi illustrere denne situasjonen ved å se på en vilkårlig vindmengde som representeres på den horisontale akse. Dette punktet på den horisontale akse indikerer den bestemte mengden vindkraft tilgjengelig. Resultatet av denne variabelen er at vi observerer to forskjellige priser, for to separate perioder. I løpet av den første perioden får vi prisen p_1 , mens i den andre perioden mottar vi prisen p_2 . Prisen er bemerkelsesverdig høyere i den første perioden i sammenligning med den andre perioden. Årsaken til denne prisforskjellen kan tilskrives det faktum at det er en høyere vindhastighet i den andre perioden sammenlignet med den første perioden. I periode 2 blåser vinden mer kraftig, noe som resulterer i høyere produksjon av vindkraft.



Figur 12. I periode 1 er det strømmangel og høye priser på grunn av lav vindkraftproduksjon. I periode 2 blåser det mer, og prisene lavere.. Uten muligheten til å overføre vindkraft mellom periodene påvirkes markedssituasjonen.

Siden e_t^W er eksogent gitt for begge periodene, kan vi ikke endre verdien av e_t^W for å maksimere nytten. Dermed vil den optimale verdien av e_t^W i begge periodene være lik den eksogene verdien av e_t^W . Så, den optimale produksjonsmengden i begge periodene vil være gitt av $e_t^W = e_t$ for $t = 1, 2$. Der e_t er den eksogene verdien av produksjonsmengden i tidsperiode t .

I perioder med gode vindforhold kan man produsere store mengder med elektrisitet, mens i andre perioder kan det forekomme ingen elektrisitetsproduksjon i det hele tatt som følge av dårlige vindforhold. Det er naturen og været som bestemmer produksjonsmengden. I denne konteksten er det en begrensning der man ikke har noen valgmulighet, med ulik marginalnytte i de to periodene. Dette er fordi de eksogene variablene e_1^W og e_2^W allerede er fastsatt og utenfor vår kontroll. Derfor er det en relativt lav sannsynlighet for at de vil være like.

Sammenlignet med vannkraftfiguren er de helt like med tilfelle med vind og vann i tilfeller der det ikke er mulig å lagre vann i neste periode, som for eksempel elvekraft. Det som gjør at figuren som viser vannkraft skiller seg ut sammenlignet med vindkraft er at det er mulig å lagre vann til neste periode slik at det er mulig å produsere elektrisitet i perioder der etterspørselen er høy selv om tilbudet i utgangspunktet er lavt hadde det ikke vært mulig å lagre vann.

Det er viktig å merke seg at vindkraft fungerer best i sammenheng med andre energikilder, da det muliggjør en mer stabil elektrisitetsforsyning. Videre i oppgaven skal vi analysere samspillet mellom vind- og vannkraft.

6 Vann- og vindkraftmodellen

I denne delen ser vi videre på Førsund sin vannkraftmodell, men også med vindkraft.

6.1 Modellens forutsetninger

Det er utfordrende å skape en eksakt modell som gjenspeiler virkeligheten på en nøyaktig måte. Derfor forsøker vi å utvikle en samfunnsøkonomisk modell for å analysere dynamikken rundt vannkraft og vindkraft. Vi tar en realistisk antakelse om at det ikke eksisterer variable kostnader, det vil si kostnader som endres i takt med produksjonen, for verken vannkraft eller vindkraft. Eventuelle kostnader som faktisk varierer, anses likevel som så små at de ikke vil ha noen betydelig innvirkning på analysen nedenfor.

I oppgaven fokuserer vi mer på sammenhengen mellom vann- og vindkraft enn på den totale kraftmengden. Vi har en forhåndsbestemt mengde elektrisk kraft til rådighet, og vårt formål er å analysere hvordan vi best skal fordele denne kraften mellom vind- og vannkraft.

Spørsmålet er hvilken betydning sammensetningen av disse to kraftkildene har på resultatene, gitt den fastsatte kraftmengden. Vi ser på dynamikken mellom vind- og vannkraft og hvordan denne fordelingen påvirker systemets ytelse og økonomiske resultater.

Vi antar også, med høy grad av realisme, at vindkraftproduksjonen varierer mellom null og maksimal kapasitet på grunn av variasjoner i værforhold og vind. For å opprettholde en balanse mellom forbruk og produksjon, må naturlige svingninger i vindkraftproduksjonen håndteres av andre teknologier. Vannkraft er spesiell fordi den har svært rask responskapasitet for endringer i produksjonen når magasinkapasiteten er tilstrekkelig, det vil si når den ligger mellom null og maksimal kapasitet.

For å håndtere dette komplekse samspillet har ser vi på en dynamisk modell som tar hensyn til ulike perioder, for eksempel sesonger som sommer og vinter, eller perioder som følger etter hverandre innenfor en helhetlig analyse. Vi bruker en to-periodemodell for å undersøke hvordan utjevningskraft påvirker vindkraft og gir en ramme for å analysere elektrisitetsmarkedets dynamikk.

En interessant sammenligning kan trekkes med Førsunds modell for optimal allokering av vannkraftressurser over to perioder. I tilfelle med vindkraft er det ikke like enkelt å allokere produksjonsfaktoren for å maksimere nytten, siden vindkraft ikke kan lagres på samme måte

som vannkraft. Produksjonsmengden i periodene kan variere betydelig basert på vindforholdene, noe som begrenser muligheten for optimal ressursallokering. Vi legger inn vind i modellen så nytteverdien er summen av e_t^H og e_t^W .

6.2 Maksimeringsproblemet med både vann-og vindkraft

Vi bruker Lagrange-multiplikatoren, som i teorien til Førsund, for å finne den optimale løsningen. I kraftsystemet har vi muligheten til å bestemme tidspunktet for elektrisitetsproduksjon, men vi er begrenset av tilgjengeligheten av nedbørressurser, også kjent som tilsig, i kraftverket. Vi kan derfor ikke produsere mer elektrisitet enn hva tilsiget tillater. Med vindkraftproduksjonen e_t^W som eksogent gitt blir maksimeringsproblemet følgende:

$$\text{Maks}\{e_t^H\} \sum_{t=1}^T U_t(e_t^H + e_t^W)$$

slik at

(6.1)

$$\sum_{t=1}^T e_t^H \leq W$$

W, e_t^W gitt,

Som i Førsund sin modell er e_t^H produksjonen av elektrisitet fra vannkraft i tidsperiode t , e_t^W er produksjonen av elektrisitet fra vindkraft i samme tidsperiode, U_t er nyttefunksjonen for elektrisitetsproduksjon i tidsperiode t , T er totalt antall tidsperioder, og W er den totale tilgjengelige mengden elektrisitet som kan produseres fra vannkraft.

6.3 Løsning med både vann-og vindkraft

La oss introdusere en Lagrange-multiplikator, λ , for betingelsen, slik at målet er å maksimere:

$$L = \sum_{t=1}^T U_t(e_t^H + e_t^W) + \lambda \left(W - \sum_{t=1}^T e_t^H \right) \quad (6.2)$$

For å finne den optimale løsningen, må vi ta de partielle deriverte av Lagrange-funksjonen med hensyn til e_t^H og λ , og deretter sette de lik null for å finne førsteordensbetingelsen:

$$\frac{\partial L}{\partial e_t^H} = U_t' + \lambda(-1) = 0 \quad (6.3)$$

Dette gir oss:

$$U'_t = \lambda \quad (6.4)$$

Som er den ekstra nytten eller verdien av å produsere mer elektrisitet fra vannkraft som nøyaktig balanserer begrensningen på hvor mye elektrisitet vi kan produsere.

Vi får samme resultatet som i kap. 4.2.2 for vannkraft alene. Og vi får dermed samme konklusjon som tidligere. Prisen i de to periodene blir det samme:

$$p_1 = p_2 \quad (6.5)$$

Når vi sier at vindkraftproduksjonen, e_t^W er eksogent gitt, betyr det at vi ikke kan kontrollere eller optimalisere denne verdien. Den er fast for hver tidsperiode og vi får samme resultat som tidligere optimaliseringsprosess med bare vannkraft. Når det ikke er reservoarbegrensning kan vi dra samme konklusjon som tidligere og prisene blir den samme i begge periodene og er lik skyggeprisen som vist i likning (4.9).

Optimaliseringsproblemet viser at markedet oppnår den samme løsningen som med vannkraft. Dette indikerer at det ikke er nødvendig å regulere markedet. Vi har en markedslikevekt uten effektivitetstap, og påstanden om en skjult subsidie blir svekket. Dette samsvarer med funnene i Førsum sin vannkraftmodell og støtter opp under ideen om at markedet kan fungere effektivt uten inngrep.

6.4 Badekardiagram med vann- og vindkraft

I denne figuren prøver vi å illustrere situasjonen når vannkraft bli inkludert i modellen som i utgangspunktet bare var vindkraft, som ble representert ovenfor i kap. 5. Det blåser mer i periode 2 enn i periode 1 og vannkraftproduksjonen oppstår i periode 1. Dette sammenfaller også bra realistisk sett. Da det er høyere tilsig om sommeren enn hva det er om vinteren. I dette tilfellet der vi implementerer vannkraft i vindmodellen blir etterspørselen i markedet imøtekommet i større grad. Effektivitetstapet som oppstår når det bare er vindkraft i modellen, blir redusert når vi får vannkraft i modellen. Figuren viser at den gitte mengde vannkraftproduksjon som blir inkludert i modellen fører til at vi oppnår likevekt og perfekt allokering av ressursene gitt etterspørselen i de to periodene.

Vannkraft komplementerer vindkraft ved å tilby en mer pålitelig strømtilførsel i perioder med varierende vindforhold. Denne komplementariteten muliggjør bedre forutsigbarhet og stabilitet i kraftproduksjonen. Resultatet er et mer effektivt marked for elektrisitet, hvor energiforsyningen er bedre tilpasset samfunnets behov og preferanser. Samtidig gir vannkraft muligheten til å optimalisere utnyttelsen av fornybare ressurser.

En av de fremtredende konklusjonene som kan trekkes fra denne analysen er at det ikke synes å eksistere en påvisbar grunn for regulatorisk inngrep i markedet for elektrisitetsproduksjon. Resultatene fører til en tilstand av markedslikevekt, hvor etterspørsel og tilbud av elektrisitet balanseres på en måte som maksimerer nytten, samtidig som ressursene utnyttes effektivt.

Det er ingen indikasjon på effektivitetstap i markedet som følge av produksjonsvalg. Produksjonen av elektrisitet fra vannkraft og den eksogene naturen til vindkraftproduksjonen, tillater markedet å tilpasse seg naturlige variasjoner uten vesentlig inngrep. Det er ingen grunn til å tro at markedet ikke oppnår det økonomisk mest effektive resultatet.

Påstanden om en eventuell "skjult subsidie" for vindkraftproduksjonen blir svekket av analysens funn. Skulle det være en skjult subsidie til stede, ville det vanligvis signalisere en uønsket skjevhet eller feil i markedet som krever korrigerende tiltak. I denne løsningen er det lite som tyder på at det eksisterer en systemisk skjevhet som rettferdiggjør regulatoriske tiltak. Resultatene støtter derfor opp under ideen om at markedet kan fungere effektivt innenfor de gitte rammebetingelsene og at regulering ikke er nødvendig for å oppnå en effektiv ressursallokering innenfor elektrisitetssektoren.

Denne analysen peker på viktigheten av en balansert energimiks som inkluderer ulike fornybare kraftkilder. Tilgjengeligheten av vannkraftressurser kan bidra til å jevne ut svingningene i kraftproduksjonen og sikre en mer stabil og pålitelig strømforsyning. Denne tilnærmingen bidrar til å minimere både strømmangelsituasjoner og prisvolatilitet³, og den understreker viktigheten av en mangfoldig og integrert energiproduksjonsportefølje for å imøtekomme samfunnets behov på en effektiv måte.

6.5 Vann- og vindkraft i en to-periodemodell med magasin

For å kunne svare på om utjevnskraft fungerer som en skjult subsidie for vindkraft velger vi se et maksimeringsproblem over to perioder med magasinbegrensning.

6.6 Maksimeringsproblem

Problemet som samfunnsplanleggeren ønsker å løse i tilfellet med både vann- og vindkraft med magasinbegrensning, kan beskrives på følgende måte:

$$\text{Maks}\{e_1^H, e_2^H\} \sum_{t=1}^2 U_t(e_t^H + e_t^W)$$

slik at

(6.6)

$$\sum_{t \in \{1,2\}} e_t^H \leq W, \quad e_2^H \leq \overline{e^H}$$

$W, \overline{e^H}$ gitt

Som tidligere er e_t^H er elektrisitet produsert av vannkraft, mens e_t^W er elektrisitet produsert av vindkraft. Det er en effektbegrensning på vann, men ingen effektbegrensning på vind da dette er en betingelse satt av værforholdene. $\overline{e^H}$ representerer en øvre begrensning på den totale vannkraften som kan produseres, det vil si en effektbegrensning på vannkraften. Det betyr at summen av vannkraftproduksjonen i alle tidsperioder ikke kan overstige denne øvre grensen. Som tidligere er vannkraft begrenset av W .

6.7 Løsning

For å finne den samfunnsoptimale løsningen for kombinasjonen av vann- og vindkraft, kan vi sette opp Lagrange-funksjonen:

$$L = U_1(e_1^H + e_2^W) + U_2(e_2^H + e_2^W) - \lambda(e_1^H + e_2^H - W) - \mu(e_2^H - \overline{e^H}) \quad (6.7)$$

λ og μ er Lagrange-multiplikatorer for betingelsene.

Deretter kan vi finne førsteordensbetingelsene ved å ta partiell deriverte av Lagrange-funksjonen med hensyn på e_1^H og e_2^H :

$$\frac{\partial L}{\partial e_1^H} = U_1'(e_1^H) + \lambda(-1) = 0 \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial e_2^H} = U_2'(e_2^H) + \lambda(-1) - \mu = 0 \quad (6.9)$$

Ved å løse for λ og μ får vi:

$$U_1'(e_1^H) = \lambda = p_1 \quad (6.10)$$

$$U_2'(e_2^H) = \lambda + \mu = p_2 \quad (6.11)$$

Vi vet fra kapittel 4 at $U_t'(e_t^H) = p_t$ og får derfor (6.10) og (6.11).

Som gir:

$$\mu = p_2 - \lambda \rightarrow \mu = p_2 - p_1 \quad (6.12)$$

Dette er det samme resultatet som (4.29).

Vindkraft påvirker ikke utfallet og vi får samme resultat som tidligere.

Som tidligere beskrevet, representerer μ vannverdien av magasinet i periode 2. Dersom tilsiget til et vannkraftsystem begrenses til en bestemt periode, vil størrelsen på magasinet ha en avgjørende betydning. Når prisforskjellene i kraftmarkedet øker, øker også verdien av vannkraften som kan lagres i magasinreservoarene. Dette skyldes at magasinreservoarene kan utnytte prisforskjellene ved å lagre kraft når prisene er lave og frigjøre den når prisene stiger. I tilfeller med betydelig store prisforskjeller blir det mer økonomisk lønnsomt for en kraftprodusent å ha magasinreservoarer. Generelt øker verdien av et magasinreservoar med økende prisvariasjon i kraftmarkedet. Dette innebærer at evnen til å lagre og frigjøre kraft fra magasinreservoaret blir mer verdifull jo mer prisene svinger mellom perioder med høy og lav etterspørsel.

Sammenhengen mellom μ (skyggeprisen på magasinbegrensningen eller vannverdien) og økning i prisdifferansen mellom de to periodene er viktig å forstå når vi vurderer beslutninger knyttet til energilagring i vannkraftsystemer. Dersom prisdifferansen mellom de to periodene øker, betyr det at prisen på elektrisitet i den ene perioden (for eksempel sommeren) er mye høyere enn i den andre perioden (for eksempel vinteren). Dette kan skyldes sesongmessige endringer i etterspørselen eller tilgjengeligheten av energikilder som vind eller sol.

Hvis prisdifferansen øker betydelig, vil μ også øke. Dette skjer fordi vannverdien er knyttet til differansen mellom prisen på energi i de to periodene. Høyere prisdifferanse betyr at det er mer å tjene på å lagre energi i perioden med lav pris og deretter selge den i perioden med høy

pris. Dette gir et sterkt økonomisk insitament for å øke lagringskapasiteten og utnytte prisdifferansen.

Når μ er høy, kan det være mer lønnsomt for energiprodusenten å øke energilagringen for å dra nytte av den økte prisdifferansen. Dette kan inkludere å lagre mer energi i perioden med lav pris selge den i perioden med høy pris.

Økningen i μ som følger av økt prisdifferanse, kan påvirke beslutningstakingen knyttet til energilagring. Dette kan inkludere investeringer i større magasinkapasitet eller endringer i driftsstrategien for eksisterende magasiner. For eksempel kan operatører av vannkraftsystemer øke vannverdien ved å ta hensyn til økte prisdifferanser og deretter justere produksjons- og lagringsstrategiene deretter.

Sammenfattende kan en økning i prisdifferansen mellom de to periodene føre til en økning i μ (vannverdien), noe som kan gi økte insitamenter for å optimalisere energilagringsbeslutninger og dra nytte av de gunstige prisendringene mellom periodene. Dette illustrerer betydningen av å forstå sammenhengen mellom μ og prisdifferansen for effektiv forvaltning av vannkraftsystemer.

Utjevningskraft er som nevnt den kraften vi flytter fra en periode til en annen og som krever magasin. De kraftverkene som kan levere utjevningskraft blir mer verdifulle jo større prisforskjellen mellom periodene er.

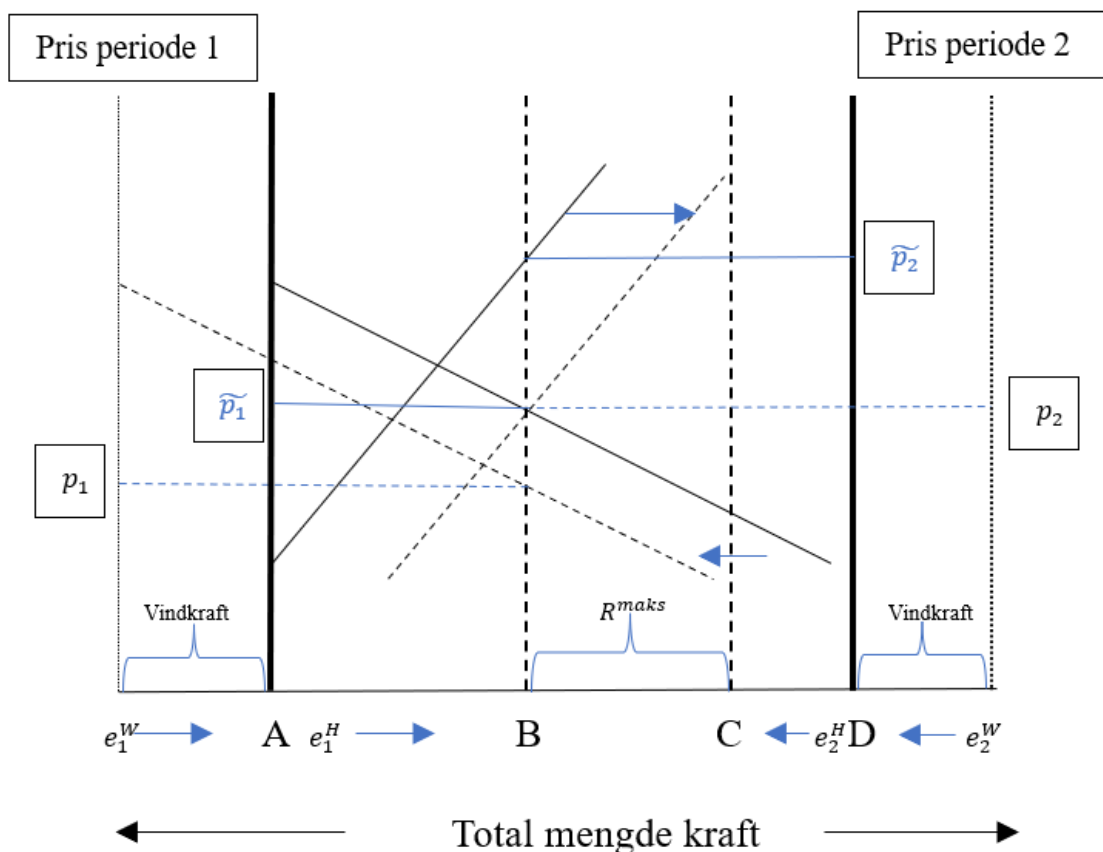
6.8 Badekardiagram med vindkraft og begrenset reservoarkapasitet

I badekardiagrammet nedenfor kan vi illustrere introduksjonen av vindkraft i systemet ved å utvide diagrammets grenser, sammen med tilhørende endringer i etterspørselskurven. Vi vil med dette se hvordan prisene blir påvirket når produksjonsmengden ikke lenger er en gitt mengde og øker. Med andre ord, tilbudet av kraft øker.

For å illustrere dette problemet har vi et badekardiagram der det er vindkraft i begge periodene og begrenset reservoarkapasitet. Etterspørselen er fortsatt karakterisert ved at det er større behov for strøm i periode 2 sammenlignet med periode 1. For å representere vindkraft i modellen utvider vi de vertikale prisaksene på hver side. Utvidelsen tilsvarer den mengden vind som kommer i hver periode. Fullstendig justerbar vannkraftproduksjon og forbruk blir

representert i linjestykket AD. Linjestykket AC viser tilsiget i periode 1. CD representerer tilsiget i periode 2, og BC angir reservoarkapasiteten.

De stiplede linjene gjelder situasjonen når vindkraft inkluderes i kraftmarkedet som i utgangspunktet kun var regulerbar vannkraft. Begrunnelsen for å inkludere begge scenarioene er å vise det horisontale skiftet i etterspørselskurvene som oppstår som en konsekvens av innføringen av vindkraft.



Figur 14 . Badekardiagram med både vann- og vindkraft og begrenset magasinkapasitet.

I figuren krysser de to etterspørselskurvene til venstre for punktet B, som indikerer at reservoarkapasiteten ikke er tilstrekkelig for å kunne flytte den ønskede mengden kraft til periode 2. Prisen i periode 1 må derfor reduseres til p_1 for å stimulere til økt forbruk av regulerbar vannkraft, slik at vannkraftforbruket i denne perioden samsvarer med linjestykket AB. I periode 2 økes prisen for å redusere vannforbruket i denne perioden, slik at det samsvarer med linjestykket BD. Selv om prisene beveget seg i motsatt retning i de to periodene, observerer vi at prisene i begge periodene med vindkraft (p_1 og p_2) er lavere enn prisene uten vindkraft (\tilde{p}_1 og \tilde{p}_2). Dette er i samsvar med virkeligheten, da økt

tilgjengelighet av kraft fører til en prisnedgang, noe som ofte skjer når det er et overskudd av elektrisitet på markedet.

Jo større tilbudet er, desto større er sannsynligheten for å møte etterspørselen. Prisfallet avhenger av hvor mye vindkraft som blir innført og elastisiteten til etterspørselskurvene. Hvis kontrollerbar vannkraft brukes i begge perioder, og etterspørselen ikke blir møtt, vil prisen tilsvare vannverdien.

6.9 Oppsummering av kapittel 6

Vindkraftverk mangler lagringskapasitet, i motsetning til magasin kraftverk. Imidlertid, i et kraftsystem der både vind- og vannkraft fungerer sammen, kan vindkraft dra nytte av vannkraftens lagringsmuligheter. I perioder med høy vind kan vannkraftprodusenter akkumulere overskuddsvann for senere bruk. I perioder med lav vind kan man kompensere ved å utnytte vannkraftreservene. Dette gjør en kombinasjon av vind- og vannkraftproduksjon mer fleksibel enn kun vindkraftproduksjon. Muligheten til lagring tillater markedet å regulere seg uten betydelige kostnader, noe som er en fordel med en variabel krafttilførsel som vindkraft. Vannkraftproduksjonen må tilpasse seg på en ny og optimal måte gitt de nye forholdene. Som følge av at vindkraft er eksogent gitt i modellen, vil vi få samme resultat i maksimeringsproblemet med både vann- og vindkraft som med tilfellet med bare vannkraft.

7 Etterspørselastisitet og magasinverdi

La oss nå undersøke hvordan ulik produksjonsnivåer i to perioder, sammenlignet med lik produksjonsnivåer i to perioder, kan påvirke verdien av et magasin. Vi ser på et tilfelle med uelastisk etterspørsel.

7.1 Uelastisk etterspørsel og sammenligning av to scenarioer

Deler av energiforbruket kan betraktes som nødvendig som følge av det brukes til å dekke grunnleggende behov som oppvarming, kjøling og matlaging. Uavhengig av prisen på elektrisitet, er forbrukerne avhengige av disse tjenestene, og de vil derfor opprettholde et visst nivå av energiforbruk. Når etterspørselen etter elektrisitet er uelastisk, betyr det at forbrukerne reagerer lite på prisendringer. I slike situasjoner har forbrukerne en relativt konstant etterspørsel etter elektrisitet, uavhengig av prisfluktuasjoner. Dette kan være relevant i kortsiktige markedsanalyser eller beslutningstaking.

Uelastisk etterspørsel kan forekomme i markeder der det er monopol eller oligopol (et marked dominert av et lite antall store aktører). I slike markeder har enkelte aktører ofte mer kontroll over prisen, og etterspørselen kan være mindre følsom for prisendringer. I dette tilfellet har vi ikke monopol, men på bakgrunn av uforutsigbarhet i vindkraft kan vindkraftprodusenten få en form for markedsrett som vi ser på videre i denne delen.

Uelastisk etterspørsel forenkler ofte matematiske modeller og beregninger. Elastisitet, som måler hvor følsom etterspørselen er for prisendringer, kan føre til mer komplekse matematiske formler. Uelastisk etterspørsel kan være enklere å arbeide med, spesielt i analyser der det er behov for rask beregning eller en enklere representasjon.

Når den relative endringen i mengde er større enn den relative endringen i pris, karakteriserer vi etterspørselen som elastisk. Når den relative endringen i mengde er mindre enn den relative endringen i pris, beskriver vi etterspørselen som uelastisk. Når den relative endringen i mengde er lik den relative endringen i pris, refererer vi til etterspørselen som enhetselastisk (Belsom, 2018). Med dette har vi følgende definisjoner:

$$|E_{e,p}| > 1 \rightarrow \text{Elastisk etterspørsel}$$

$$|E_{e,p}| = 1 \rightarrow \text{Enhetselastisk etterspørsel}$$

$$|E_{e,p}| < 1 \rightarrow \text{Uelastisk etterspørsel}$$

Burke og Abayasekara (2018) utførte en studie der de beregnet elastisiteten for husholdningssektoren i USA ved hjelp av paneldata som inkluderte informasjon om delstat, sektor og år for tidsperioden 2003 til 2015. Ved hjelp av en førstedifferens-estimator, fant de ut at den kortsiktige priselastisiteten for husholdninger på årsbasis var -0,10.

Husholdningenes etterspørsel er uelastisk i kortsiktig perspektiv når det gjelder prisendringer, siden elastisiteten er mindre enn 1 i absolutt verdi. Vi velger dermed at elastisiteten i dette tilfellet er 0.10 for å representere uelastisk etterspørsel.

Som vi vet fra tidligere, er pris lik marginalnyttens:

$$p = U'(e) \quad (7.1)$$

I dette tilfellet er kvantum:

$$e = p^{-\varepsilon} \quad (7.2)$$

Fra uttrykket for kvantum kan vi løse for pris som følger:

$$p = e^{-\frac{1}{\varepsilon}} = U'(e) \quad (7.3)$$

Etterspørselens egenpriselastisitet uttrykker relativ endring i etterspurt mengde i forhold til relativ endring i prisen for godet (Belsom, 2018). Matematisk kan den uttrykkes som følger:

$$E_{e,p} = \frac{\partial e}{\partial p} * \frac{p}{e} = -\varepsilon p^{-\varepsilon-1} \frac{p}{e} = -\varepsilon \left(\frac{p^{-\varepsilon}}{e} \right) = -\varepsilon \quad (7.4)$$

Vi antar at vi har to perioder, sommer og vinter, med forskjellige eller like produksjonsnivåer, Q_{vinter} og Q_{sommer} . Videre antar at vi har en gitt produksjonsmengde som er 3⁴ i løpet av de to periodene. Vi må ta en beslutning om hvordan vi ønsker å fordele produksjonsmengden mellom de to periodene. I dette tilfellet sammenligner vi to scenarier. I **scenario 1** er det en liten vindkraftprodusent som produserer dobbelt så mye i periode 2 sammenlignet med periode 1. I **scenario 2** får et stort innslag av vann og det produseres samme mengde i de to periodene. Disse tilfellene illustreres i figur 12 og figur 13.

⁴ Produksjonsmengden blir satt til 3 som et vilkårlig tall. Vi kunne valgt å oppgi produksjonsmengden i kWh, men for å forenkle velger vi tallet 3.

Siden elastisiteten i dette tilfellet er uelastisk setter vi $\varepsilon = 0.1$ og vi får:

$$\varepsilon = 0.1 \rightarrow \frac{1}{\varepsilon} = 10 \quad (7.5)$$

$$p = e^{-\frac{1}{\varepsilon}} = e^{-10} \quad (7.6)$$

Vi kan definere verdien av kraften produsert i hver periode som følgende:

- For vinterperioden:

$$V_{vinter} = Q_{vinter} * P_{vinter} \quad (7.8)$$

- For sommerperioden:

$$V_{sommer} = Q_{sommer} * P_{sommer} \quad (7.9)$$

Verdien av et magasin per enhet kraft blir følgende:

$$V_{magasin} = P_{vinter} - P_{sommer} \quad (7.10)$$

Definisjonen av verdien av et magasin per enhet kraft samsvarer med resultatet vi har fått tidligere i (4.29).

Vi sammenligner verdien av magasinet med et scenario der vi har ulik produksjon mellom vinter og sommer (scenario 1), med et scenario der vi har lik produksjon mellom de to periodene (scenario 2).

Scenario 1: Når produksjonen er ulik mellom vinter og sommer:

Ulik produksjonsmengde vinter ($e = 1$) og sommer ($e = 2$) gir følgende priser:

$$P_{vinter} = 1^{-10} = 1 \quad (7.11)$$

$$P_{sommer} = 2^{-10} = 0.001 \quad (7.12)$$

Verdien av kraft med ulik produksjonsmengde i de to periodene (summen av produksjonsmengde*pris, t=2):

$$V_{vinter} + V_{sommer} = 1 * 1 + 2 * 0.001 = 1.002 \quad (7.13)$$

Verdien av magasinet per enhet blir da følgende:

$$V_{magasin} = P_{vinter} - P_{sommer} = 1 - 0.001 = 0.999 \quad (7.14)$$

Scenario 2: Når produksjonen er lik mellom vinter og sommer:

Lik produksjonsmengde vinter ($e = 1.5$) og sommer ($e = 1.5$) gir lik pris i de to periodene:

$$P_{vinter} = P_{sommer} = 1.5^{-10} = 0.017 \quad (7.15)$$

Verdien av kraft når det produseres det samme i begge periodene (summen av produksjonsmengde*pris, $t=2$):

$$3 * 0.017 = 0.0051 \quad (7.16)$$

Verdi av magasin per enhet:

$$P_{vinter} - P_{sommer} = 0 \quad (7.17)$$

Dette viser at magasinet har ingen verdi når prisene er like i begge periodene. Dette resultatet er i tråd med det som ble diskutert i tidligere, og det understreker betydningen av prisforskjeller mellom periodene for å bestemme verdien av et magasin. Når prisene er like i begge periodene, er det ingen økonomisk insentiv for å lagre kraft i magasinet og derfor ingen verdi knyttet til det. **Ulik pris i de to periodene gjør at magasinet får en verdi.**

I et scenario med uelastisk etterspørsel, kan et vannmagasin fortsatt være viktig for å sikre energisystemets stabilitet og for å dekke forbrukernes energibehov i perioder med variabel vindkraftproduksjon uten at det nødvendigvis representerer en skjult subsidie på vindkraften.

I figur 12 ser vi at når det er et system med bare vindkraft og ulikt produksjonsnivå i to perioder får vi ulik pris i de to periodene. Fra scenario 1 ser vi at magasinet har en høyere verdi, sammenlignet med scenario 2. Dette skyldes at vindkraftproduksjonen varierer betydelig mellom de to periodene, og magasinet fungerer som en viktig buffer for å lagre overskuddskraft når produksjonen er høy i den ene perioden og frigjøre denne lagrede energien når produksjonen er lav i den andre perioden. Dette bidrar til å opprettholde kraftstabilitet og balansere tilbud og etterspørsel, noe som gir magasinet en betydelig verdi.

Når det derimot er et stort innslag av vannkraft i figuren og prisene blir like i de to periodene, påvirker dette verdien av et magasin (som vi ser i scenario 2). Dette skyldes at med vannkraftens pålitelige og stabile produksjon blir magasinet mindre nødvendig for å utjevne svingningene i produksjonen. Prisene er allerede like i begge periodene, og det er derfor mindre økonomisk insentiv for å lagre kraft i magasinet. Dette reduserer verdien av magasinet.

Samlet sett viser dette at verdien av et magasin i et energisystem avhenger av flere faktorer, inkludert produksjonsmønsteret, prisene i de to periodene, tilstedeværelsen av andre energikilder som vannkraft, og etterspørselen etter kraft i de aktuelle periodene. Magasinet har større verdi når det er behov for å jevne ut svingningene i produksjonen, som ofte er tilfelle med vindkraft, sammenlignet med situasjoner der produksjonen er mer stabil og prisene er like.

7.2 Markedsmakt som følge av uforutsigbare vindforhold

På en indirekte måte på bakgrunn av at vind er uforutsigbart og det i perioder blåser veldig lite får vindkraftprodusenten et ønskelig produksjonsmønster som kan ligne på et som en monopolist vil ha når han står ovenfor uelastisk etterspørsel. Dette kan skape situasjoner der tilbudet av vindkraft er begrenset, mens etterspørselen forblir relativt konstant. De kan dra nytte av perioder med lav vindkraftproduksjon ved å øke prisene, da forbrukerne er villige til å betale mer for å opprettholde sin nødvendige elektrisitetsforsyning. Dette skyldes at forbrukerne er villige til å betale høyere priser for elektrisitet, gitt den uelastiske etterspørselen. Dette kan resultere i økte inntekter for vindkraftprodusenten, selv om produksjonen er lav. I dette scenarioet vil vindkraftprodusenten ikke ha behov for utjevningskraft, da de har tilstrekkelig markedsmakt til å kontrollere prisen og opprettholde lønnsomheten uten behov for lagring eller utjevning av kraftproduksjonen. Fra produsentens ståsted er det ikke ønskelig med å benytte seg av et magasin (utjevningskraft) siden dette vil føre til lavere pris som vi har vist tidligere. Vindkraftprodusenten vil dermed oppnå høyere inntekter per enhet produsert, og dette kan føre til økte inntekter til tross for lavere produksjonsvolum. Dette er gunstig for vindkraftprodusenten, da de kan maksimere inntektene sine uten å måtte bekymre seg for å miste betydelig etterspørsel fra forbrukerne.

8 Mulige modellutvidelser

8.1 Usikkerhet

En annen vesentlig forenkling i modellen er utelukkelsen av all usikkerhet knyttet til tilsig, vind og etterspørsel. Med andre ord, modellen forutsetter at samfunnsplanleggeren har full oversikt over hva som vil skje når han tar beslutningene sine. Det å lage fullstendige prognoser for værforholdene er utfordrende. I tørråret 2021-22 var fyllingsgraden på magasinkapasitet langt under det som tidligere har vært normal. I virkeligheten kan det oppstå avvik fra slik v i har karakterisert værforholdene i modellen.

For å ta hensyn til usikkerhet i modellen kunne vi ha maksimert *forventet nytte gitt de betingelsene vi står ovenfor*. Inkluderingen av usikkerhet i modellen medfører perioder med prisendringer, selv når ingen av modellens begrensninger er strengt bindende. Dette skyldes at usikkerheten tvinger til justeringer i produksjonen i respons til faktisk variasjon i tilsig, vindforhold eller etterspørsel.

Anta at samfunnsplanleggeren tidligere antok at periode $t+1$ ville ha lavt tilsig, og derfor ble det bestemt å overføre en betydelig mengde vann til denne perioden. Når perioden $t+1$ faktisk ankommer, viser det seg imidlertid at tilsiget ikke er like lavt som tidligere antatt. Den overskytende vannmengden i magasinene kan potensielt føre til oversvømmelser og unødig sløsing med ressurser. Som et resultat blir prisen i denne perioden satt lavere enn tidligere forutsatt, for å unngå slike tap.

Med andre ord, usikkerheten tvinger produksjons- og lagringsbeslutningene som ble tatt i modellen, til å tilpasse seg faktiske forhold når de oppstår. Dette kan resultere i prisendringer som er en reaksjon på usikkerheten og nødvendigheten av å tilpasse seg de endrede situasjonene.

8.2 Handel

Vi har hele utelatt handel og sett på en lukket økonomi. Det kunne vært relevant å inkludere handel i modellen av flere grunner. For det første kan handel gjøre etterspørselen mer elastisk, noe som kan ha en betydelig innvirkning på prisen. Hvis vi hadde inkludert handel i modellen, ville det bety at når prisene i utlandet krysser en viss terskel, kan det ha en negativ

effekt på prisene i Norge. Dette er spesielt viktig når elastisiteten spiller en sentral rolle, da det kan påvirke prisfølsomheten til forbrukerne.

Fra et vindkraftperspektiv kan inkludering av handel også være relevant. Vindkraften kan oppleve en høyere elastisitet i etterspørselen. Dette betyr at prisendringer kan ha en mer markant effekt på etterspørselen etter vindkraft. Derfor, når prisene i utlandet stiger, kan det føre til økt etterspørsel etter vindkraft i Norge.

Åpning for handel med utlandet kan bidra til å dempe noen av disse effektene. Ved å tillate eksport av overskuddskraft til utlandet til en høyere pris, kan man unngå å senke prisene i Norge for å forbruke all tilgjengelig kraft. Dette kan være en måte å opprettholde høyere priser i Norge selv når det er overskudd av elektrisitet. Inkludering av handel i modellen kan påvirke elastisiteten i etterspørselen og prisendringer, spesielt fra et vindkraftperspektiv. Å tillate eksport av overskuddskraft til utlandet kan bidra til å opprettholde høyere priser i Norge, selv når det er overskudd av elektrisitet.

8.3 Inkludere flere kilder til elektrisitetsproduksjon

En mulighet for å utvide modellen er å inkludere flere kilder til elektrisitetsproduksjon, som termisk kraft. Dette kan åpne for muligheten til å regulere termisk kraftproduksjon, som igjen kan påvirke aspekter som monopolmakt og forestillingen om at prisen blir svært høy når etterspørselen er uelastisk. Ved å integrere termisk kraftproduksjon i modellen, kan man potensielt redusere behovet for ekstremt høye priser i perioder med uelastisk etterspørsel, da termisk kraft kan brukes som en kilde for å opprettholde elektrisitetstilbudet.

8.4 Start og stoppkostnader

En faktor som ikke har blitt inkludert i modellen er start- og stoppkostnader knyttet til kraftproduksjon. Startkostnader er kostnadene som påløper når en kraftproduksjonsenhet startes opp eller gjenopptar produksjonen etter en periode med avstengning. Det inkluderer ting som vedlikehold og nødvendige tiltak for å få enheten i drift.

Stoppkostnader er kostnadene knyttet til midlertidig stansing eller avstengning av en kraftproduksjonsenhet. Dette kan være nødvendig for vedlikehold, reparasjon eller når kraftproduksjonen ikke er lønnsom på et gitt tidspunkt.

Både start- og stoppkostnader kan variere avhengig av kraftproduksjonstype, teknologi og reguleringsforhold i kraftmarkedet. Disse kostnadene påvirker kraftprodusentenes beslutninger og kan ha betydelig innvirkning på kraftmarkedet. Dette er noe vi kunne ha sett på i en videre modellering. (Eggen, 2021)

8.5 Andre begrensninger

I hensyn til miljømessige aspekter kunne vi ha satt en nedre magasinbegrensning. For å ta hensyn til fiske, dyre- og planteliv er det viktig å ha en nedre grense på mengden vann som er i magasinet. De nedre grensene på magasinene kan også variere i forhold til årstid. Magasinene kan også være dekket av is som vil være en påvirkning når det kommer til nedre grense.

I en mer realistisk modell kan vi vurdere flere perioder og ta hensyn til større variasjoner i disse periodene. Dette ville gi oss muligheten til å inkludere de større svingningene som oppstår i vindkraftproduksjonen, noe som er mer representativt for virkeligheten. En slik tilnærming ville være mer egnet for en langsiktig analyse.

9 Konklusjon

Resultatet vi har analysert, der utjevningskraft er mer lønnsomt for forbrukerne enn for produsenten av vindkraft, gir et argument mot påstanden om at utjevningskraft fungerer som en skjult subsidie på vindkraft. Ut fra resultatene vi får ovenfor ser vi at utjevningskraft i større grad kommer forbrukeren til nytte, sammenlignet med vindkraftprodusenten. En vindkraftprodusent kommer bedre ut uten utjevningskraft. Dette kommer av at vindkraftprodusenten har mulighet til å selge strøm til en høyere pris uten utjevningskraft (som vist i figur 12, kap. 5) og oppnå høyere profitt.

I filmen "Økonomibløffen" blir det argumentert for at utenlandske investorer kan være interessert i å investere i norske vindkraftverk på grunn av tilgangen til gratis utjevningskraft. Imidlertid, basert på analysen, ser det ut til at dette ikke nødvendigvis er tilfelle. Faktisk viser analysen at prisene kan bli lavere med utjevningskraft, noe som kan redusere profitten for investorene. Dette kan derfor belyse hvordan utjevningskraft ikke nødvendigvis gir økonomisk fordeler for vindkraftprodusenter, til tross for at det gir en mer stabil pris for forbrukerne.

Forbrukerne har nytte av å ha tilgang til utjevningskraft, spesielt når etterspørselen etter elektrisitet er uelastisk. Dette skyldes at utjevningskraft bidrar til å opprettholde pålitelig strømforsyning i perioder med variabel kraftproduksjon. Utjevningskraft kan bidra til å redusere prisfluktasjoner i kraftmarkedet. Ved å tilføre ekstra kraft i perioder med høy etterspørsel og trekke tilbake kraft i perioder med lav etterspørsel, kan utjevningskraft bidra til å stabilisere kraftprisene, noe som er gunstig for forbrukere

På den annen side er det ikke nødvendigvis mer lønnsomt for produsenten av vindkraft å bruke utjevningskraft. Produsenten tar hensyn til kostnader og inntekter, og hvis prisforskjellen mellom periodene ikke er stor nok til å dekke lagringskostnadene, kan det ikke være økonomisk lønnsomt å bruke utjevningskraft.

Utjevningskraft fungerer derfor nødvendigvis ikke som en skjult subsidie på vindkraft, fordi det er en strategi som gir fordeler til forbrukerne ved å opprettholde pålitelig elektrisitetssystem uten å gi en ubetinget økonomisk fordel til vindkraftprodusenten. Prisen på elektrisitet i markedet reflekterer den reelle kostnaden og etterspørselen, og

utjevningskraft blir brukt for å tilpasse produksjonen til etterspørselen, spesielt når vindkraftproduksjonen varierer.

Ved å tillate bruk av utjevningskraft for å opprettholde pålitelig strømforsyning, kan markedet operere mer samfunnsøkonomisk effektivt ved å tilpasse produksjonen til etterspørselen. Dette kan også bidra til å redusere behovet for kostbare tiltak for å sikre strømforsyningen, som for eksempel reservekraftverk.

Sammenfattende gir analysen et argument mot påstanden om at utjevningskraft fungerer som en skjult subsidie på vindkraft. Det er snarere en strategi som hjelper til med å opprettholde pålitelig elektrisitetssystem, spesielt når etterspørselen er uelastisk, og det er ingen grunn til å anse det som en ubetinget fordel for vindkraftprodusenten.

Avslutningsvis kan vi fastslå at i energisystemer der vannkraft og vindkraft samvirker, øker verdien av et vannmagasin. Dette øker stabiliteten og påliteligheten til energisystemet ved å gi utjevningskraft, spesielt i perioder med variabel kraftproduksjon. Den økte verdien av vannmagasinet skyldes behovet for å balansere etterspørsel og tilbud i et marked der etterspørselen er uelastisk eller der vindkraft utgjør en betydelig del av produksjonen.

Litteraturliste

- Belsom, E. (2018, Høst). *INEC1800 – ØKONOMI, FINANS OG REGNSKAP*. Hentet fra Likevekt, elastisitet og konsumteori: <https://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INEC1800/h18/fagstoff/bedrifts%C3%B8konomi/forelesningsnotat-2-2018.pdf>
- Burke, P. J., & Abayasekara, A. (2018). *The price elasticity of electricity demand in the* . Hentet fra The Energy Journal: <https://doi.org/10.5547/01956574.39.2.pbur>
- Dahlback , M. L., & Skille, Ø. B. (2020, juni 23). *Viral vindkraft-video er full av feil*. Hentet fra Faktisk: <https://www.faktisk.no/artikler/zl868/viral-vindkraft-video-er-full-av-feil>
- Eggen, A. O. (2021). *Modell for kjøremønsterrelaterte kostnader*. Hentet fra HydroCen: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2977416/HydroCen%20Rapport%2024.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Energifaktanorge*. (2022, mai 13). Hentet fra Kraftproduksjon: <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftforsyningen/>
- Energikommisjonens rapport. (2023, februar 1). *NOU 2023: 3*. Hentet fra Mer av alt – raskere : <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2023-3/id2961311/>
- Førsund, F. R. (2015). *Hydropower Economics*. Springer New York, NY.
- Førsund, F. R., & Hjalmarsson, L. (2010). Renewable Energy Expansion and the Value of Balance Regulation Power. *Working Papers in Economics No. 441, University of Gothenburg*.
- Gårseth-Nesbakken, L. (2022, desember 22). *Sunk cost*. Hentet fra SNL: https://snl.no/sunk_cost
- Jaehnert, S. (2023, januar 31). *SINTEFblogg*. Hentet fra Hvorfor vannverdi er viktig for strømpris og forsyningssikkerhet: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/vannverdi-er-viktig-for-strompris-og-forsyningssikkerhet/>
- NVE. (2020). *Det svinger mer med fornybar strøm*. Hentet fra https://publikasjoner.nve.no/rapport/2020/rapport2020_44.pdf
- Olje- og Energidepartementet. (2015). *Fakta 2015 Energi og vannressurser i Norge*.
- Statnett. (2022). Hentet fra Statnett: <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/>
- Wold, M. (2023, januar 26). *Kraftproduksjon fra vindturbiner*. Hentet fra NVE: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/kraftproduksjon-fra-vindturbiner/>

