

---

# EN ANALYSE AV VINDKRAFTENS OG KRAFTUTVEKSLINGENS BETYDNING FOR EFFEKTJØRING AV NORSKE MAGASINKRAFTVERK

---

KRISTOFFER RYPDAL, PROFESSOR EMERITUS, INSTITUTT FOR MATEMATIKK OG STATISTIKK,  
UIT – NORGES ARKTISKE UNIVERSITET

---

Versjon 3, 17.02.2023

## BAKGRUNN OG SAMMENDRAG

---

Effektkjøring av magasinkraftverk er hurtige og store variasjoner i vannføring og produsert effekt. Spesielt kan store variasjoner innenfor et tidsrom på et døgn føre til tilsvarende variasjoner i vannstand i nedstrøm vassdrag og som kan føre til skader på livet i elva. Det er en gjengs oppfatning at et stort innslag av intermitterende, ikke-regulerbare kraftkilder som vindkraft, vil føre til hardere effektkjøring av den regulerbare vannkraften. Mange mener også at stor kapasitet for kraftutveksling med tilknytning til det nordiske og europeiske kraftmarkedet, kombinert med mye vindkraft, bidrar til økt effektkjøring.

For å undersøke vindkraftens og eksportens innvirkning på effektkjøringen trenger vi data med tidsoppløsning som ikke er dårligere enn hver time for all elektrisk energi som mates inn og ut av kraftnettet i et gitt prisområde. Slike data kan lastes ned fra ENTSOE Transparency Platform<sup>1</sup>. Her finner vi tall for produsert effekt for hver time fordelt på alle aktuelle produksjonsformer og tall for eksport og import fra det gitte prisområdet til alle nabo-områder som det er kraftutveksling med.

Differansen mellom all produsert kraft og netto eksport (som er negativ hvis det er import), utgjør summen av energien som når fram til forbrukerne og energitapet i form av varme i kraftnettet. I det følgende skal jeg for enkelhets skyld bruke ordet *forbruk* om dette og dele produksjonen inn i to kategorier, regulerbar og ikke-regulerbar kraftproduksjon. Den regulerbare produksjonen omfatter magasinkraftverk og pumpekraftverk. Den ikke regulerbare produksjonen består i all hovedsak av vindkraft og elvekraft. Det meste av tiden produseres det betydelig mer vindkraft enn elvekraft i alle prisområder unntatt NO5, som ikke har vindkraft og svært lite elvekraft, og effekten som leveres av elvekraften varierer mye langsommere enn de tidsskalaene som er relevant for effektkjøring. Når jeg diskuterer effekten av ikke-regulerbar kraftproduksjon i dette notatet, er det derfor i praksis synonymt med vindkraftproduksjon. Siden jeg har definert forbruk som differansen mellom

---

<sup>1</sup> <https://transparency.entsoe.eu/>

kraftproduksjon og eksport, har vi relasjonen,  $r + i = f + e$ , der  $r$  er regulerbar kraft,  $i$  er ikke-regulerbar kraft,  $f$  er forbruk og  $e$  er eksport.

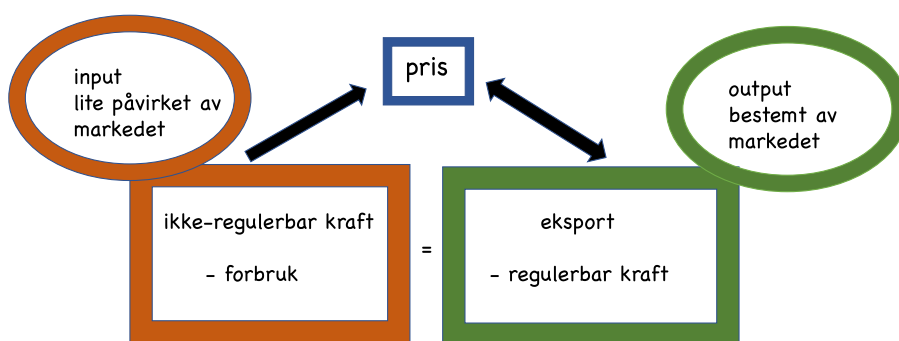
Den ikke-regulerbare kraftproduksjonen er bare avhengig av naturens produksjonsevne, og er derfor uavhengig av markedet og kraftprisen. Inntil ganske nylig, før forbrukerne ble bevisste at de kunne spare strømutgifter ved å følge med på spotprisen, var også forbruket relativt uavhengig av prissvingningene. I Figur 1 har jeg prøvd å illustrere dette ved å omskrive relasjonen ovenfor slik at  $r - f = e - i$ .

Poenget med dette er at begge variablene på venstre side av denne likningen er lite påvirket av markedet og kraftprisen, men kan påvirke prisen. Variablene på høyre side er både påvirket av, og påvirker, prisen. Variablene på venstre side (de i den brune boksen i Figur 1) kan betraktes som markedsuavhengig input til kraftnettet. Det er denne inputen i alle prisområdene i markedet som driver prissvingningene og svingningene i regulerbar kraftproduksjon og eksport (utveksling).

I dette notatet analyserer jeg data for prisområdene NO3 (Midt-Norge), NO5 (Vestlandet) og NO2 (Sørvest-Norge). Jeg har valgt ut disse tre av de fem norske prisområdene fordi det ikke framkommer vesentlige nye poenger med å inkludere NO1 (Østlandet) og NO4 (Nord-Norge). Den mest inngående analysen gjør jeg av NO3, fordi dette prisområdet har den største andelen vindkraft i kraftmiksen. NO5 er interessant fordi dette prisområdet ikke har egen vindkraft, og NO2 fordi de fleste utenlandsforbindelsene har sitt utspring her.

Det viktigste resultatet for NO3 er at på de korte tidsskalaene for effektkjøring (variasjoner innenfor døgnet), så er det ikke bare venstre og høyre side i likningen ovenfor som er like, men dataene viser også at;

*variasjonen i ikke-regulerbar kraftproduksjon i stor grad balanseres av variasjonen i eksporten, og at variasjonen i forbruket i stor grad balanseres av variasjonen i regulerbar kraftproduksjon.*



På korte tidsskalaer har vi at:

**Variasjoner i ikke-regulerbar kraft balanseres tilnærmet av eksport**

**Variasjoner i forbruk balanseres tilnærmet av regulerbar kraft**

**Figur 1.** Input og output til kraftnettet og hovedresultatet av analysen for NO3.

Konsekvensen er at, på de korte tidsskalaene, vil økt/minket vindkraftproduksjon først og fremst gi opphav til økt/minket eksport, og ikke til minket/økt magasinkraftproduksjon (effektkjøring). Videre vil økt/minket forbruk (døgnvariasjoner) være den viktigste driveren for økt/minket magasinkraftproduksjon. Det er derfor liten grunn til å anta at en begrenset økning av vindkraftandelen i kraftproduksjonen vil gi opphav til betydelig mer effektkjøring.

På lengre tidsskalaer, fra 1-30 dager, som er typisk varighet for værsystemer, vil dynamikken være annerledes. Da vil økt /minket vindkraftproduksjon i NO3 i stor grad balanseres av minket/økt magasinkraftproduksjon. Mer vindkraftutbygging kan altså føre til større slike langsommere variasjoner i magasinkraftproduksjonen.

Analysen av NO5 viser at effektkjøringsgraden er 73 % høyere i NO5 enn i NO3, til tross for at NO5 ikke har vindkraft eller annen ikke-regulerbar kraft. Eksporten til Østlandet er den dominerende driveren av effektkjøring, og døgnvariasjonen i forbruket i NO1 er hovedårsaken til at effektkjøringsgraden er så høy i NO5.

NO5 mangler diversitet i både produksjon og utveksling. Det mangler variabel, ikke-regulerbar kraftproduksjon, og eksporten skjer i hovedsak til NO1, der etterspørselen er dominert av døgnvariasjonen i forbruket. Denne mangelen på diversitet krever at den regulerbare produksjonen må absorbere disse døgnvariasjonene som resulterer i hard effektkjøring.

NO2 er karakterisert av stor kraftutveksling med utlandet, og har en effektkjøringsgrad på 0.15 i 2021, som er høyere enn i NO3 (0.11), men lavere enn i NO5 (0.19). I motsetning til NO3, er det lav samvariasjon mellom vindkraftproduksjon og eksport, mens den regulerbare produksjonen og eksporten har nærmest perfekt samvariasjon. Vi ser også at eksporten samvarierer godt med forbruket, som er naturlig siden døgnvariasjonene i etterspørselen utenlands i stor grad er de samme som i Norge.

I NO3 så vi at variasjonene i vindkraftproduksjonen blir absorbert av eksporten, og derfor ikke fører til vesentlig økt effektkjøring. I NO2 er variasjonene i vindkraftproduksjonen relativt små i forhold til døgnvariasjonene i eksport og forbruk, og har minimal innflytelse på effektkjøringen sammenlignet med døgnvariasjonene i forbruket og eksporten. Eksportens bidrag kan være dobbelt så stort som forbrukets.

Sammenligningen av NO3, NO5 og NO2 indikerer at tilførsel av flere variable kraftkilder, og kraftutveksling til et stort marked der etterspørselen varierer, kan bidra til å redusere effektkjøringen heller enn å øke den.

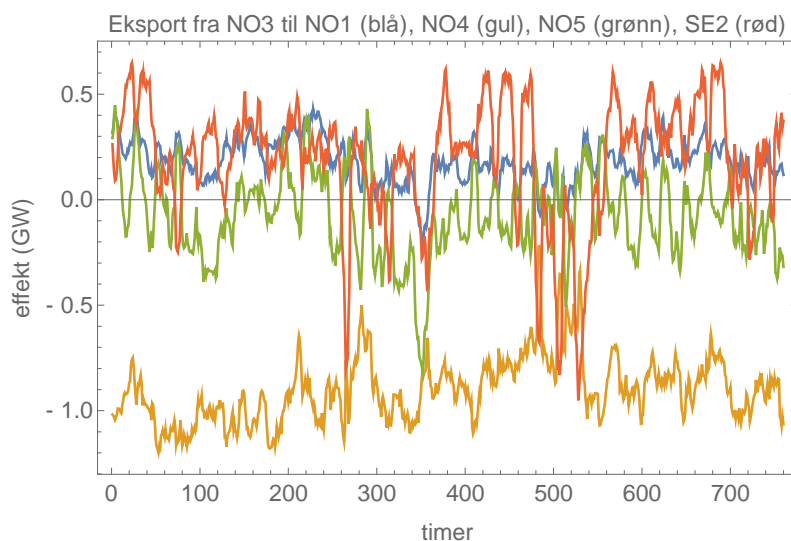
I NO2, som har noe vindkraft, men langt større eksport, bestemmes effektkjøringen stort sett av eksporten til utlandet. Sammenligning av data i 2020 og 2022 viser effekten av de nye utvekslingskablene til Tyskland (NordLink) og til Storbritannia (North Sea Link), som ble satt i drift i 2021. Den viser at aggregert utenlands eksportandel av den totale kraftproduksjonen i NO2 er uendret, mens effektutvekslingsgraden øker nesten tre ganger. Økningen i effektkjøring er også betydelig, men mye lavere enn effektutvekslingen. Dette skyldes at eksporten til norske prisområder balanserer deler av utenlandseksporten.

Disse dataene tyder på at innføring av intermitterende og ikke-regulerbare kraftkilder og et større antall utvekslingskabler til flere markeder med ulik etterspørselsprofil, ikke nødvendigvis fører til vesentlig økt effektkjøring.

### NO3: STOR ANDEL VINDKRAFT

---

Hovedmålet med denne analysen er å undersøke virkningen av variasjoner i ikke-regulerbar kraftproduksjon på variasjoner i regulerbar kraftproduksjon. Denne virkningen avhenger av variasjonen i forbruket innad i prisområdet og av eksporten ut av området (her er import regnet som negativ eksport). I likhet med vindkraft er krafteksport politisk kontroversielt, og derfor er det av interesse å få et innblikk i om krafteksport forsterker eller demper vindkraftens innvirkning på effektkjøringen i magasinkraftverkene. For dette formålet trenger vi også data for krafteksporten ut av NO3. Data for krafteksport fra NO3 til de fire tilgrensende prisområdene NO1 (Østlandet), NO4 (Nord-Norge), NO5 (Vestlandet) og SE2 (Midt-Sverige) med timesoppløsning finnes også på ENTSOE Transparency Portal, og jeg har brukt disse dataene for 2021. I Figur 2 har jeg plottet disse for første måned i 2021.



**Figur 2.** Eksport fra NO3 til NO1 (blå), NO4 (gul), NO5 (grønn) og SE2 (rød) gjennom januar 2021. Figuren er representativ for resten av 2021.

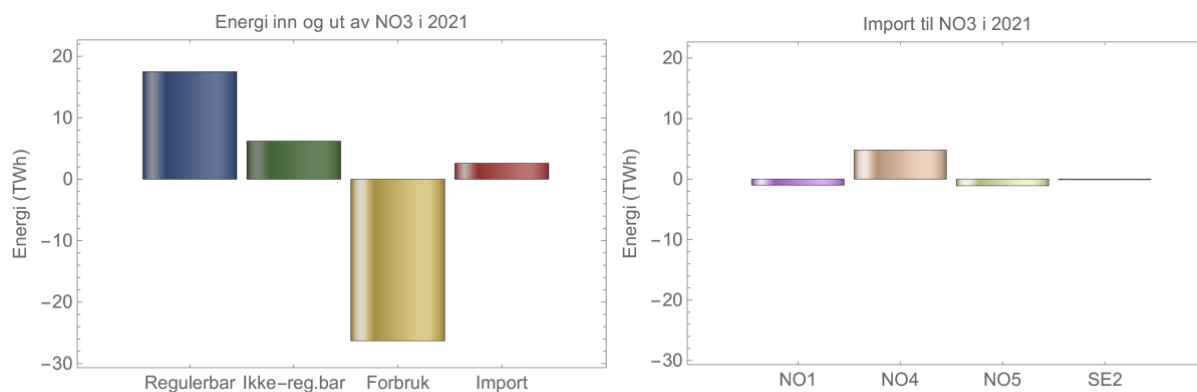
### AGGREGERT PRODUKSJON OG UTVEKSLING I 2021

---

Aggregert eksport til NO1 i 2021 (blå) var 1.0 TWh, fra Nord-Norge (NO4, gul) ble det importert 4.8 TWh, til Vestlandet (NO5, grønn) var eksporten 1.1 TWh, og til Sverige (SE2, rød) var nettoeksporten nær null (0.1 TWh). Totalt var netto import til NO3 i 2021 på 2.6 TWh.

Disse tallene bør sammenlignes med den årlige produksjonen av regulerbar kraft i NO3 (17,5 TWh), av ikke-regulerbar kraft (6.2 TWh), forbruk (26.3 TWh). Legg merke til at

regulerbar + ikke-regulerbar – forbruk – eksport =  $17.5 + 6.2 - 26.3 - (-2.6) = 0$ .



**Figur 3.** Aggregert produksjon, forbruk og eksport/import til NO3 i 2021.

Vi ser at den ikke-regulerbare kraftproduksjonen tilsvarer 26% av den totale produksjonen og 238% av nettoimporten, og at nettoimporten utgjør bare 10% av forbruket. Importen fra Nord-Norge utgjør 22% av forbruket og eksporten til Østlandet og Vestlandet 12% av forbruket. Kraftunderskuddet som gjør netto import nødvendig kan dekkes ved en 42% økning av vindkraftproduksjonen.

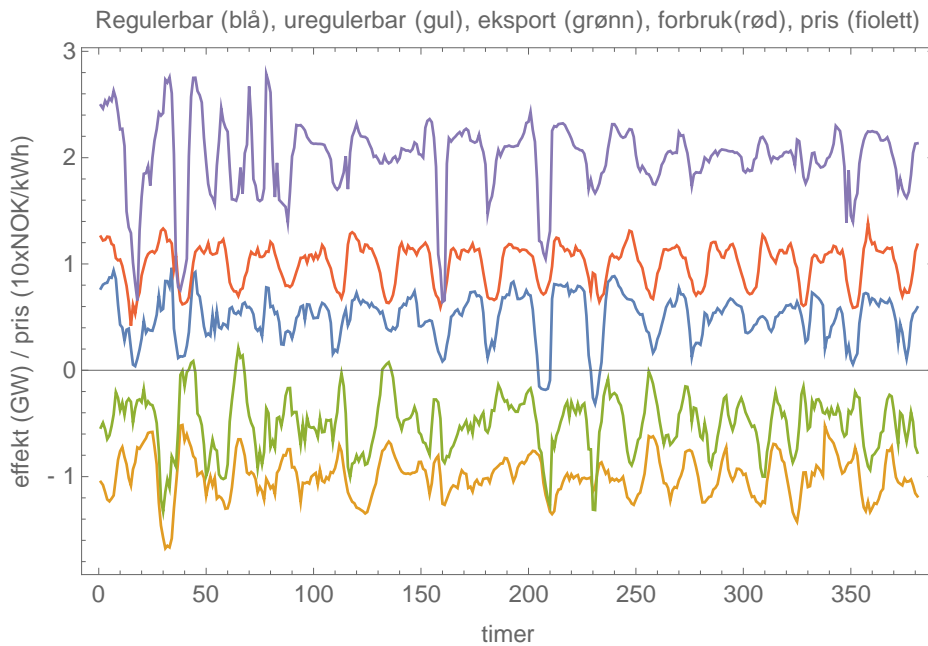
### VARIABILITET OG SAMVARIASJON AV PRODUKSJON, FORBRUK, EKSPORT OG PRIS PÅ DØGNSKALA (1-24 TIMER)

Hovedtemaet i dette notatet er ikke vindkraftens bidrag til den aggregerte kraftproduksjonen eller til netto eksport/import, men snarere bidraget fra vindkraftens variabilitet til de hurtige variasjonene i magasin kraftproduksjonen som kalles effektkjøring.

Vindkraftens innvirkning på annen kraftproduksjon er ulik på ulike tidsskalaer. De variasjonene som gjør mest skade på livet i vassdragene nedstrøms fra magasinene er de som skjer gjennom døgnet. Helt uten innslag av ikke-regulerbar kraft, vil den regulerbare kraften måtte variere gjennom døgnet for å balansere variasjonen i forbruket. Et vesentlig spørsmål er hvor stor betydning vindkraften har for variasjonen på tidsskalaer fra en time til et døgn. For å studere dette ønsker jeg å filtrere ut variasjoner som er langsommere enn et døgn, og det gjøres ved å trekke fra døgnmiddelverdien i tidsintervallet mellom 12 timer før og 12 timer etter observasjonstidspunktet (den glidende middelverdien med et vindu på 24 timer).

Dette avviket fra døgnmiddelverdien har jeg plottet for fem variable med tidsoppløsning på en time i Figur 4. De fem variablene er regulerbar og ikke-regulerbar kraftproduksjon, netto krafteksport, forbruk intern i NO3, og day-ahead spotpris i NO3 i de to første ukene av oktober 2021. Dette er en måned med mye vind.

Vi husker at summen av de fire første variablene er null, slik at hvis vi ikke hadde hatt ikke-regulerbar kraft og eksport, så ville regulerbar kraftproduksjon vært identisk med forbruket. En interessant observasjon fra figuren er at den ikke-regulerbare vindkraften ikke gjør så stor forskjell på vannkraftproduksjonen på denne tidsskalaen, fordi den i stor grad går til eksport/import.



**Figur 4.** Avvik fra døgn-middeler for regulering (blå), uregulering (gul), eksport (grønn), forbruk (rød) og spotpris for NO3 de to første ukene av oktober 2021. Kurvene er ulikt vertikalt forskjøvet, slik at de ikke ligger oppå hverandre. I virkeligheten har alle variablene middeler lik null.

Vi observerer også at den regulerbare produksjonen følger forbruket tett, noe som resulterer i en høy samvariasjon mellom disse (korrelasjon 0.66), og det er også en betydelig samvariasjon mellom regulering og pris (korrelasjon 0.42) og mellom forbruk og pris (korrelasjon 0.41). Det er dermed klart variasjonen i disse tre variablene; regulering og forbruk, er sterkt koblet på tidsskalaer innenfor et døgn. Det er ikke bare samvariasjonen mellom regulering og forbruk som er høy, de varierer også med tilnærmet lik amplitude; standardavviket for den regulerbare kraftproduksjonen disse tidsskalaene er 0.22 GW, mens for forbruket er det 0.16 GW.

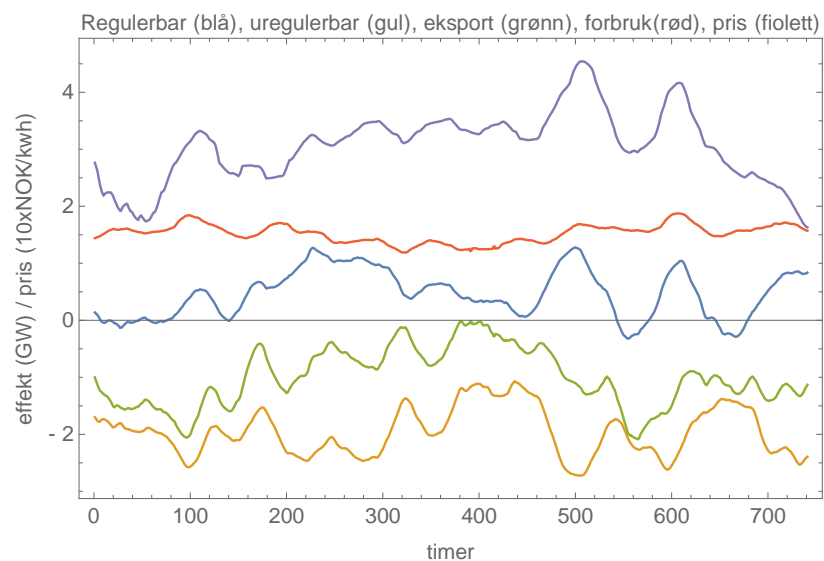
*Dette indikerer at en stor del av effektkjøringen er drevet av døgnvariasjonene i forbruket.*

Vi ser også at den ikke-regulerbare produksjonen samvarierer tett med eksporten (korrelasjon 0.61), men det er også en viss samvariasjon mellom regulering og eksport (korrelasjon 0.43). I tillegg varierer de med sammenlignbare amplituder; standardavvik for ikke-regulerbar produksjon er 0.14 GW og for eksporten 0.21 GW. De andre parvise korrelasjonene er svake. Spesielt legger vi merke til at korrelasjonen mellom regulering og -ikke-regulerbar produksjon bare er -0.16.

*Dette betyr at økt/ redusert vindkraftproduksjon innenfor et døgn bare i liten grad følges av redusert/økt magasinkraftproduksjon, og at variasjonene i vindkraften i hovedsak tas ut i varierende eksport.*

## VARIABILITET OG SAMVARIASJON AV PRODUKSJON, FORBRUK, EKSPORT OG PRIS PÅ MÅNEDSSKALA (1-30 DAGER)

Det kan også være av interesse å studere virkningen av varierende vindkraftproduksjon på lengre tidsskala, selv om slike langsommere variasjoner har mindre miljømessige konsekvenser. Her kan vi se på døgnmiddelverdiene (den glidende middelverdien), men for å unngå effektene av sesongvariasjonene, trekker jeg fra en glidende månedsmiddelverdi. Dette betyr at jeg får et signal som inneholder variasjonene på skala lengre enn et døgn, men kortere enn en måned. Disse skalaene er spesielt relevante for vindkraftvariasjonene, fordi varigheten av typiske værsystemer ligger i dette spennet. De fem variablene båndpass-filtrert på denne måten er plottet for oktober måned i Figur 6.



**Figur 6.** Avvik av døgn-middelverdier fra måneds-middelverdier for regulering (blå), ikke-regulering (gul), eksport (grønn), forbruk (rød) og spotpris for NO3 de to første ukene av oktober 2021.

**Tabell 1.** Pearson korrelasjonskoeffisient mellom variablene regulerbar og ikke-regulerbar kraftproduksjon, netto eksport, kraftforbruk og day-ahead spotpris internt i NO3 gjennom året 2021.

Korrelasjonskoeffisient $K_{xy}$ mellom variablene $x$ og $y$	Tidsskala	Tidsskala
	1-24 timer	1-30 dager
regulerbar – ikke-regulerbar, $K_{ir}$	-0.16	-0.64
regulerbar – eksport, $K_{er}$	0.43	0.27
regulerbar – forbruk, $K_{fr}$	0.66	0.43
Ikke-regulerbar – eksport, $K_{ie}$	0.61	0.49
Ikke-regulerbar – forbruk, $K_{if}$	-0.14	-0.53
eksport – forbruk, $K_{ef}$	-0.18	-0.53
pris – regulerbar, $K_{pr}$	0.42	0.55
pris - ikke-regulerbar, $K_{pi}$	-0.05	-0.42
pris – eksport, $K_{pe}$	0.09	0.03
pris – forbruk, $K_{pf}$	0.41	0.34

Tabell 1 viser at det er betydelige korrelasjoner mellom flere av variablene, som indikerer at vekselvirkningen mellom dem er kompleks. Den største korrelasjonskoeffisienten er mellom regulerbar og ikke-regulerbar kraft (korrelasjon -0.64). Det betyr at magasinkraften i betydelig grad kompenserer vindkraften på tidsskalaer som svarer til varigheten for vindsystemene (typisk 2-5 dager), selv om den positive korrelasjonen mellom vindkraft og eksport (korrelasjon 0.49) også tyder på at mye av vindkraftoverskuddet fortsatt går til eksport.

Prisen er negativt korrelert med vindkraftproduksjonen (korrelasjon -0.42) og positivt korrelert med magasinkraften (korrelasjon 0.55). Det indikerer at vindkraftoverskudd gir lavere pris, som igjen gir lavere magasinkraftproduksjon.

En litt overraskende negativ samvariasjon finner vi mellom ikke-regulerbar kraft og forbruk. Her har den negative korrelasjonskoeffisienten (-0.53) større tallverdi enn den positive korrelasjonen mellom regulerbar kraft og forbruk (0.43). Den ikke-regulerbare kraften avhenger bare av vinden, og forbruket i NO3 må antas stort sett å være lite avhengig av

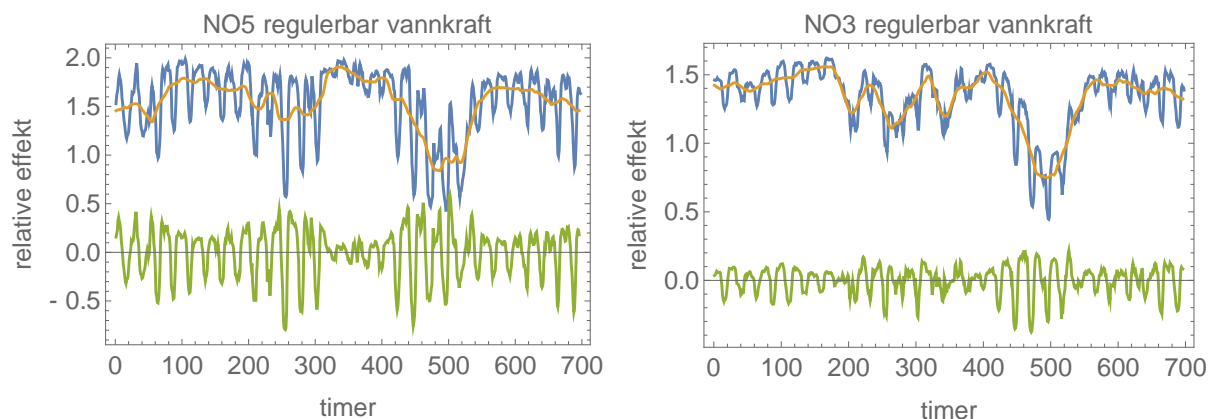


markedssvingningene. Så hvordan kan det være en årsakssammenheng mellom disse to variablene? Den sannsynlige forklaringen finner vi i meteorologiske forhold. Gjennom den delen av året at forbruket er stort, høsten og vinteren, blåser det lite i kalde perioder. I disse periodene er forbruket høyt. Dermed får vi en negativ korrelasjon mellom vindkraftproduksjon og forbruk.

*Vi konkluderer at på tidsskalaer fra 1-30 dager vil magasinkraften ofte kompensere variasjoner i vindkraftproduksjonen, men dette er variasjoner som er langsommere enn det vi vanligvis kaller effektkjøring.*

## NO5: UTEN VINDKRAFT OG EKSPORT TIL UTLANDET

I analysen ovenfor var NO3 utvalgt fordi dette prisområdet har den største andelen av vindkraft av alle de fem norske prisområdene; 26% av årsproduksjonen i NO3 i 2021 var ikke-regulerbar kraft, der det aller meste var vindkraft. Til sammenlikning er NO5 (Vestlandet) spesielt interessant fordi det i 2021 ikke var vindkraftproduksjon der. Ved å sammenligne NO3 og NO5 har vi altså en unik mulighet til å studere hvordan introduksjon av en betydelig andel vindkraft har endret effektkjøringen.



**Figur 7:** Blå kurver er produksjonen av regulerbar effekt i januar 2021 dividert på middeleffekten gjennom hele året. Oransje kurver er døgnmiddelverdier (glidende middel med vindu 24 timer). Grønne kurver er avviket fra døgnmiddel (altså differansen mellom blå og oransje kurver). Venstre panel er NO5 og høyre panel NO3.

Figur 7 viser effekter i NO3 og NO5 dividert på middeleffekten av regulerbar kraft i hvert av prisområdene. De grønne kurvene viser variasjonen av denne normaliserte effekten gjennom døgnet. Vi ser at den normaliserte variasjonen (relativ effektvariasjon) er betydelig større i NO5 enn i NO3. Hvis vi definerer

*effektskjøringsgraden = standardavvik av normalisert effektvariasjon gjennom året,*

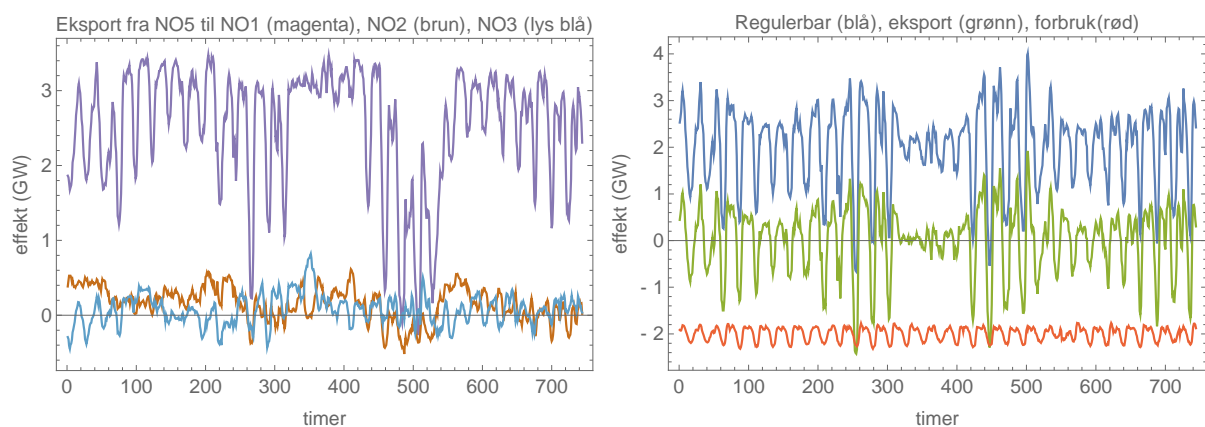
så finner vi at effektskjøringsgraden i 2021 er 0.19 i NO5 og 0.11 i NO3.

*Effektskjøringsgraden er altså 73% høyere i NO5 enn i NO3, til tross for at NO5 ikke har vindkraft eller annen ikke-regulerbar kraft.*

Årsaken til dette kan vi få et hint om ved å se på Figur 8. Venstre panel viser eksporten til de tre tiliggende prisområdene NO1, NO2 og NO3. Vi ser av venstre panel at det er eksporten til NO1 (Østlandet) som dominerer utvekslingen, og den er nesten alltid positiv (netto eksport). Høyre panel viser døgnvariasjonene i kraftproduksjonen, eksporten og forbruket. Eksporten til Østlandet er viktigere som driver av effektkjøring enn forbruket internt i NO5, og døgnvariasjonen i forbruket i NO1 er hovedårsaken til at effektkjøringsgraden er så høy i NO5.

Det vi ser i NO5 er at det mangler diversitet i både produksjon og utveksling. Det mangler intermitterende ikke-regulerbar kraftproduksjon, og eksporten er begrenset til utveksling i hovedsak med ett prisområde, der etterspørselen er dominert av døgnvariasjonen i forbruket. Denne mangelen på diversitet krever at den regulerbare produksjonen må absorbere de periodiske døgnvariasjonene i forbruket et område som er langt større enn NO5.

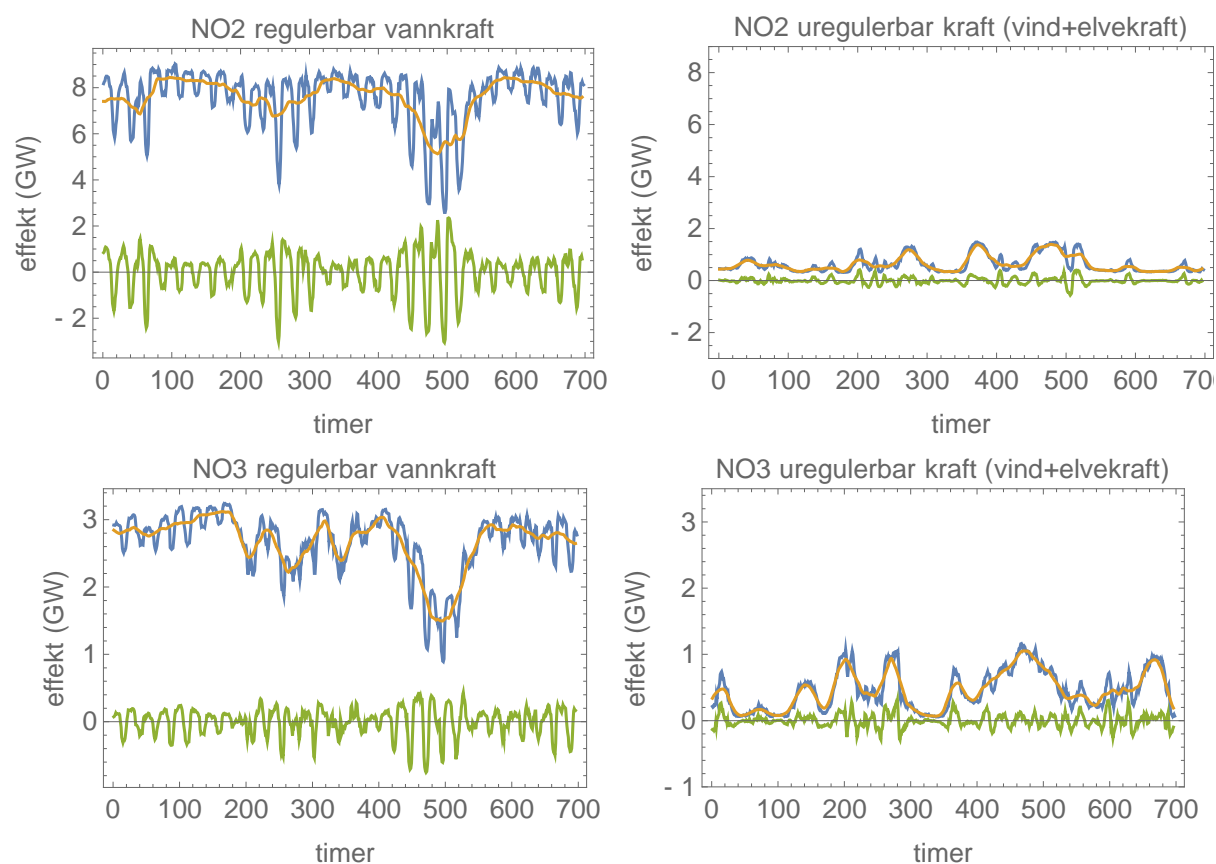
*Dette illustrerer at tilførsel av flere intermitterende kraftkilder, og utveksling til et stort marked der etterspørselen varierer, ikke øker kravet til effektkjøring, men snarere reduserer det.*



**Figur 8:** Venstre panel viser eksporten fra NO5 til de tre omliggende prisområdene, NO1 (magenta), NO2 (brun) og NO3 (lys blå). Høyre panel viser avviket fra døgnmiddelverdier for total produksjon (blå), total eksport (grønn) og forbruk internt i NO5 (rød). De tre kurvene er forskjøvet i forhold til hverandre for å forhindre at de blir liggende oppå hverandre, den blå er forskjøvet +2, og den røde -2.

## NO2: STOR EKSPORT TIL UTLANDET

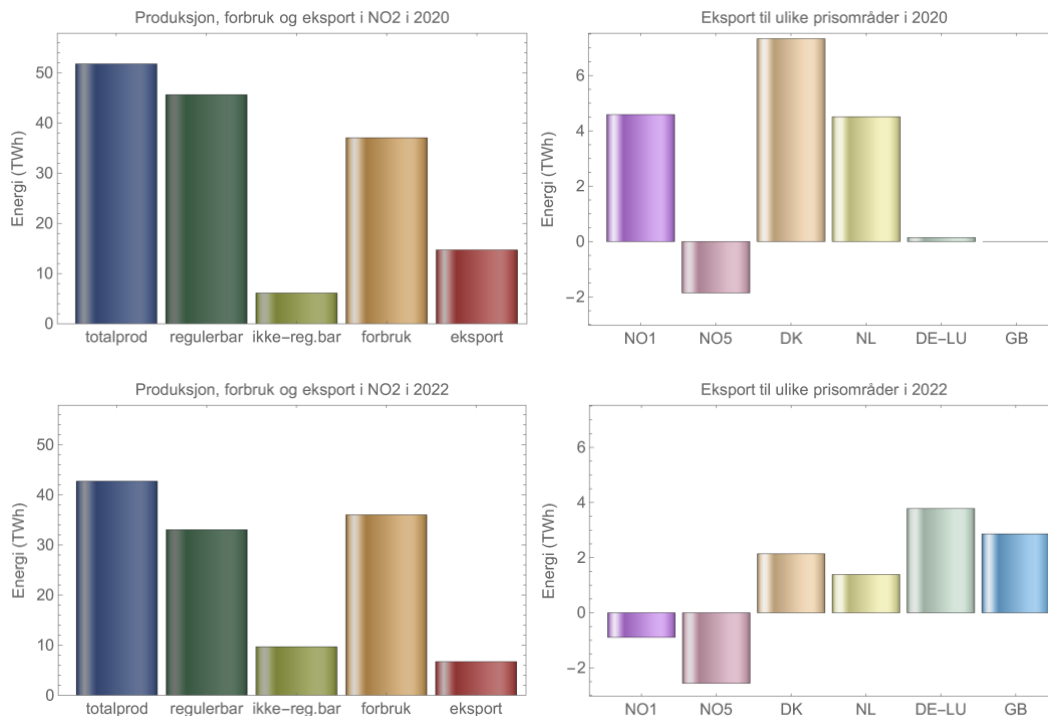
Den regulerbare og ikke-regulerbare kraftproduksjonen NO2 og NO3 i 2021 er vist i Figur 9.



**Figur 9:** Blå kurver i panelene til venstre er regulerbar kraftproduksjon med timesoppløsning i januar 2021, og i panelene til høyre viser den ikke-regulerbar produksjonen. De gule kurvene er glidende middel med 24 timers vindu (døgnmiddelverdier). De grønne kurvene er avvik fra døgnmiddel, dvs. differansen mellom blå og gule kurver.

Midleffekten av regulerbar kraft i NO2 i 2021 var 5.54 GW og 2.20 GW i NO3. For ikke-regulerbar kraft var den 0.82 GW i NO2 og 0.71 GW i NO3. Andelen ikke-regulerbar kraft var altså 13% i NO2 og 24% i NO3. Effektkjøringsgraden for NO2 (standardavviket for den grønne kurven i panelet øverst til venstre i Figur 9 dividert på middelverdien av den blå kurven) er 0.15, mens den er 0.11 i NO3. Igjen ser vi at effektkjøringen er hardere i NO2, selv om andelen ikke-regulerbar kraft i NO2 bare er halvparten av hva den er i NO3.

Men det viktigste som skiller NO2 fra de andre prisområdene er eksportkablene til utlandet, så det er interessant å se på hvilken betydning eksporten har for effektkjøringen og for den regulerbare produksjonen generelt. Fordi de to nyeste av disse kablene kom i drift i 2021, ser vi nå på data for 2022, og sammenligner med 2020, slik at vi får med den fulle effekten av de nye utenlandsforbindelsene.

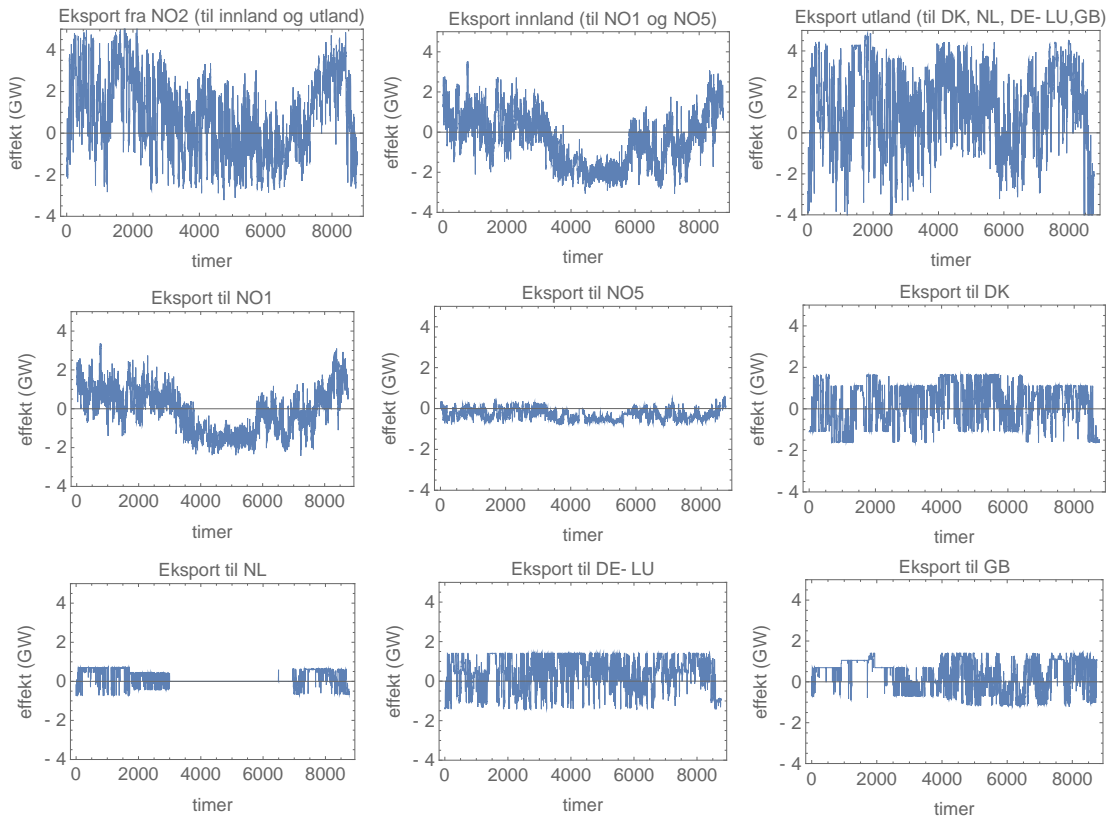


**Figur 10:** Venstre paneler: Aggregert kraftproduksjon, regulerbar produksjon, ikke-regulerbar produksjon, forbruk og eksport i NO2 i 2020 og 2022. Høyre paneler: Aggregert eksport fra NO2 i samme perioder til NO1 (Østlandet), NO5 (Vestlandet), DK (Danmark), NL (Nederland), DE-LU (Tyskland-Luxemburg) og GB (Storbritannia).

La oss først undersøke om disse kablene har ført til at en større andel av aggregert produksjon har blitt eksportert. Figur 10 viser hvordan produksjon, forbruk og utveksling fra NO2 til ulike prisområder fordelte seg i disse to årene. 2020 var et svært nedbørsrikt år med høy vannkraftproduksjon i NO2 (51.8 TWh), mens 2022 var nedbørsfattig med lav produksjon (42.8 TWh). Når vi skal se på effekten av de nye utenlandskablene er det derfor rimelig å måle utenlandseksportens andel av totalproduksjonen. I 2020 var aggregert eksport til utlandet fra NO2 lik 12.0 TWh, mens den i 2022 var 10.2 TWh. Utenlandseksportens andel av totalproduksjonen var altså 23.2 % i 2020, og 23.8 % i 2022.

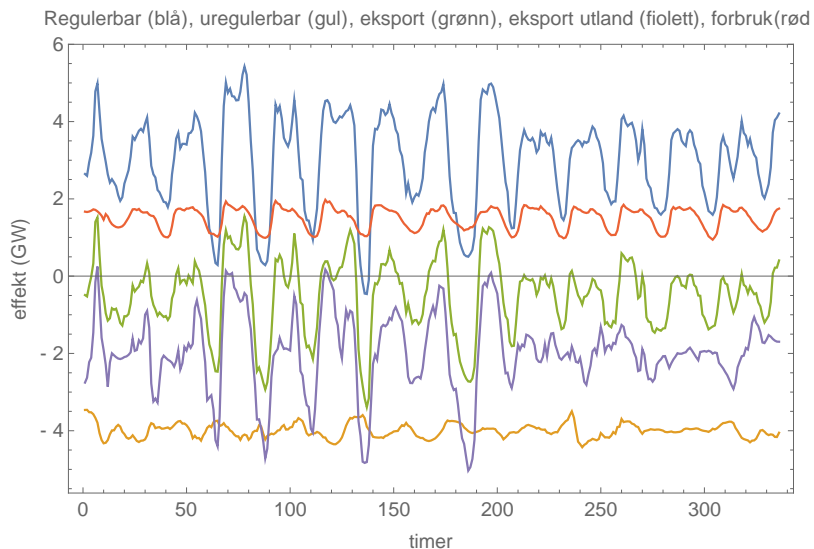
Vi ser altså at de nye kablene ikke har endret eksportandelen til utlandet fra NO2. Nettoeksporten gjennom de nye kablene til Tyskland og Storbritannia er kompensert av redusert eksport gjennom de gamle kablene til Danmark og Nederland. Det er altså ikke utvekslingskapasiteten som setter grenser for nettoeksporten, men snarere kraftoverskuddet som er igjen etter at hjemlig kraftbehov er dekket.

Disse aggregerte tallene sier noe om hvor stort kraftoverskuddet i NO2 og Norge er, men lite om hva eksporten betyr for variasjonene i den regulerbare produksjonen. Her må vi se på tidsseriene for produksjon, forbruk og eksport. Tidsseriene for eksport er vist for hele året 2022 i Figur 11.



**Figur 11:** Tidsserier for hele 2022 for ulike komponenter av eksporten fra NO2.

Kortere tidsserier som viser variasjon omkring døgnmiddelverdien for regulerbar og ikke-regulerbar kraftproduksjon, total eksport og eksport til utlandet, samt forbruket innad i NO2, er vist i Figur 12.



**Figur 12:** Tidsserier for avvik fra døgnmiddel med timesoppløsning for de to første ukene av 2022; regulerbar kraftproduksjon (blå), ikke-regulerbar produksjon (gul), eksport (grønn) eksport utland (fiolett) og forbruk, alt for NO2. Kurvene er ulikt forskjøvet for å hindre at de ligger oppå hverandre.

Den viser døgnvariasjonene i de to første ukene i januar. Den totale eksporten er dominert av eksporten til utlandet. Standardavviket til døgnvariasjonene for regulerbar kraftproduksjon gjennom hele året er 0.94 GW, for ikke-regulerbar produksjon 0.49 GW, for total eksport 0.83 GW og for forbruket 0.21 GW.

**Tabell 2:** Korrelasjonskoeffisienter mellom avvik fra døgnmiddel for NO2 og NO3.

Korrelasjonskoeffisient mellom variablene	NO2 2022	NO3 2021
regulerbar – ikke-regulerbar, $K_{ri}$	-0.11	-0.16
regulerbar – eksport, $K_{re}$	0.96	0.43
regulerbar – forbruk, $K_{rf}$	0.60	0.66
Ikke-regulerbar – eksport, $K_{ie}$	0.06	0.61
Ikke-regulerbar – forbruk, $K_{if}$	0.01	-0.14
eksport – forbruk, $K_{ef}$	0.42	-0.18

NO2 har en effektkjøringsgrad på 0.25 i 2022, som er høyere enn i NO3 (0.11) og i NO5 (0.19) i 2021. I motsetning til NO3, ser vi fra Tabell 2 at det er lav korrelasjon mellom ikke-regulerbar produksjon og eksport, mens den regulerbare produksjonen og eksporten har nærmest perfekt samvariasjon. Vi ser også at eksporten samvarierer godt med forbruket, som er naturlig siden døgnvariasjonene i etterspørselen utenlands i stor grad er de samme som i Norge.

I NO3 så vi at variasjonene i vindkraftproduksjonen blir absorbert av eksporten, og derfor ikke fører til vesentlig økt effektkjøring. I NO2 er variasjonene i vindkraftproduksjonen relativt små i forhold til døgnvariasjonene i eksport og forbruk, og vindkraften korrelerer lite med de andre variablene. Det er derfor vanskelig å avgjøre nøyaktig hvordan vindkraften fordeler på den regulerbare produksjonen og eksporten, men den har uansett en minimal innflytelse på effektkjøringen sammenlignet med døgnvariasjonene i forbruket og eksporten.

Standardavviket for eksporten er 0.828 GW og for forbruket 0.210 GW, så det er i hovedsak variabiliteten i eksporten som setter nivået på effektkjøringen i NO2. Standardavviket i døgnvariasjonene for eksporten til utlandet er 0.932 GW, og for innenlands eksport (til NO1 og NO5) er standardavviket 0.453 GW. Vi ser altså at summen av innenlands og utenlands eksport har lavere standardavvik enn utenlands eksport alene. Vi kan altså ikke gå ut fra at åpning av nye utvekslingsforbindelser nødvendigvis medfører økt effektkjøring, for hvis variasjonene i utvekslingen gjennom de nye forbindelsene er negativt korrelert med utvekslingen i de gamle, så kan de delvis kansellere hverandre.

Jeg skal definere *effektutvekslingsgraden* med utlandet som forholdstallet mellom standardavviket av utenlandseksportens effekt og middelveidien av den regulerbare effekten. I 2020 var den effektutvekslingsgraden i NO2 med utlandet 0.17, mens den i 2022 var 0.48. Vi ser altså at effektutvekslingsgraden med utlandet har økt med 182% fra 2020 til 2022, og det er rimelig å anta at de nye kablene er hovedgrunnen til denne økningen. Det er denne utvekslingen som er den samfunnsøkonomiske begrunnelsen for disse kablene. Utvekslingen sørger for at kraften strømmer dit etterspørselen er størst og kraftprodusentene får større avkastning fordi de kan produsere når prisene er høyest.

Men denne utvekslingen fører også til høyere effektkjøring. I 2020 var effektkjøringsgraden 0.14, mens den i 2022 var 0.25, altså en økning på 79% fra 2020 til 2022. Vi ser imidlertid at effektutvekslingsgraden med utlandet har økt mye mer enn effektkjøringsgraden (182%). Dette skyldes at korrelasjonen mellom innenlands og utenlands eksport var nær null i 2020, mens den var -0.46 i 2022. Dette betyr at i 2022, så ble økt/reduert innenlands eksport delvis kompensert av redusert/økt utenlands eksport, slik at økt utenlandseksport i mindre grad førte til økt effektkjøring.

Dette er et eksempel på at økt diversitet i eksporten i form av fler forbindelser til ulike markeder kan bidra til å holde effektkjøringsgraden lav mens effektutvekslingsgraden øker. I prinsippet kunne vi jo hatt null økning av effektkjøring fra utveksling hvis samlet eksport og samlet import gjennom alle forbindelser til enhver tid kompenserte hverandre.

## KONKLUSJON

---

En analyse av tidsrekke-data med timesoppløsning for regulerbar kraftproduksjon (magasin- og pumpekraft), ikke-regulerbar produksjon (vindkraft og elvekraft) og eksport i prisområdene NO2, NO3 og NO5 gir en klar indikasjon på at tilførsel av mer ikke-regulerbar kraft som vindkraft ikke trenger å føre til større variabilitet på korte tidsskalaer fra en time til et døgn. Denne variabiliteten kalles gjerne effektkjøring.

Variasjonene på disse tidsskalaene er dominert av døgnvariasjon i forbruk og eksport i alle disse prisområdene. I NO3, som har mer vindkraft enn de andre prisområdene, går vindkraften i stor grad til eksport, mens effektkjøringen bestemmes av døgnvariasjonen i forbruket.

I NO5, som ikke har vindkraft, men stor eksport til NO1, bestemmes effektkjøringen av eksporten til NO1, og effektkjøringsgraden er nesten dobbelt så stor som i NO3.

I NO2, som har noe vindkraft, men langt større eksport, bestemmes effektkjøringen stort sett av eksporten til utlandet. Sammenligning av data i 2020 og 2022 viser at aggregert utenlands eksportandel av den totale kraftproduksjonen i NO2 er uendret, mens effektutvekslingsgraden (standardavviket av eksportert effekt til utlandet delt på midlere effekt av den regulerbare produksjonen) øker 182 %. Økningen i effektkjøring er imidlertid bare 79 %, noe som skyldes at innenlands og utenlands eksport er negativt korrelert i 2022, slik at innenlands eksport balanserer deler av utenlandseksporten.

Disse dataene viser at tilførsel av intermitterende kraftkilder som vindkraft og åpning av flere utvekslingsforbindelser til ulike markeder ikke behøver å føre til mer netto eksport. Det vil derimot føre til økt grad av utveksling og økt inntjening til kraftprodusentene. Variasjonen i utvekslingen skjer i stor grad på døgnskala, slik at økt samlet utveksling gjennom alle kabler vil øke effektkjøringsgraden. Men med flere kabler til ulike markeder vil det være muligheter for at eksport gjennom én kabel kan kompenseres av import gjennom en annen, og dermed skape bedre balanse mellom tilbud og etterspørsel og høyere avkastning for produsentene, uten at man øker effektkjøringen.