

Prognoser for tilsig til vannkraft på vestlandet

Harald Yndestad

Arbeidsnotat

GENERELT

Innhold

GENERELT	2
Innhold	2
Begreper	3
Symboler	3
1 INNLEDNING	4
2 MATERIALER OG METODE.....	5
Dataseriene	5
Systemteori	5
Wavelet spektrum analyse	7
3 RESULTATER	9
NAO vinter indeks	9
Norsk vannkraft.....	10
4 DISKUSJON	14
REFERANSER	15

Begreper

Lunar nodal syklus: Tiden det tar (18.6134 år) for at krysspunktet mellom månens plan og solens ekliptiske plan, trenger for å rotere 360 grader.

Lunar nodal spektrum: Et sett av harmoniske (18.6/n år) og sub-harmoniske ($n \cdot 18.6$ år) perioder som er relatert til lunar nodal syklus.

Lunar nodal tide: En vertikal og horisontal tidevannbølge forårsaket av lunar nodal syklus.

Nutasjon: En endring av polpunktet i x-retning og y-retning (9'' grader) som en følge av lunar nodal syklus.

Wavelet: En glidende krysskorrelasjon mellom en tidsserie og et pulsformet signal.

Wavelet transform: Et sett av wavelet funksjoner med ulik skalering for krysskorrelasjonen.

Wavelet spektrum: Et sett av funksjoner fra en wavelet transform.

Symboler

a_n	Amplituden av en generell syklus
a_{n0}	Middelverdien av en syklus
a_{n1}	Amplituden av en syklus
N	Antall år i tidsserien
n	Tellevariabel for antall år i en tidsserie
n	Tellevariabel for harmonisk nummer i lunar nodal spektrum
Q	Pearsons korrelasjonskoeffisient
R	Korrelasjonskoeffisient
$R(\tau)$	Auto korrelasjonsfunksjon
$R_a(\tau)$	Autokorrelasjon for wavelet spektrum
$R_n(\tau)$	Autokorrelasjon for stasjonært lunar nodal spektrum
R_{xy}	Krysskorrelasjon mellom tidsseriene x og y
S/N	Signal til støyforhold
t	Tid
T_0	Tiden for lunar nodal syklus (18.6134 år)
$u(t)$	Et lunar lodal spektrum
$v(t)$	En forstyrrelse fra en ukjent kilde
$W(t)$	Et sett dominante wavelets
$W_{a,b}(t)$	En wavelet transformasjon med skalering a og tidsforskyvning b.
$y(t)$	En dataserie med målinger
π	3.14
φ	Faseforsinkelse (rad)
τ	Tidsforsinkelse
\angle	Vinkel (rad)
ω	Vinkelfrekvens (rad/tid)
Ψ	Wavelet operator
φ_0	Fasen til lunar nodal syklus (rad)
ω_0	Vinkelfrekvens til lunar nodal syklus(rad/tid)
Σ	Sum operator

1 INNLEDNING

Betydningen av langtids prognoser

Norge har valgt å bruke vannkraft som praktisk talt eneste ressurs i sin kraftproduksjon. I denne situasjonen er kraftleverandørene spesielt, og samfunnet generelt, ekstra sårbare for endringer i tilsig av vann til kraftproduksjon. Tilsig av vann til vannmagasinene er som kjent en lite forutsigbar ressurs og en mangler gode langtids prognoser for nedbør. Tendensen i perioden 1990-2000 var at det kom mer nedbør enn tidligere år. Klimaforskere mener at denne økningen kan skyldes drivhuseffekten og at denne utviklingen kommer til å fortsette. Prognoser fra NVE viser at en forventet klimaendring vil føre til at tilsiget til enkelte vassdrag vil få økning på opp til 7 % de nærmeste 30 år og opp til 20 % de neste 100 år (Roald m.fl., 2004). Både norske myndigheter og en del kraftselskaper har som følge av dette oppjustert sine anslag for fremtidig nedbør og kraftproduksjon (Oddgeir Løken pers. kom.). Dette betyr at en allerede har budsjettert med en økning i kraftproduksjon som følge av en forventet klimaendring. Tilsiget til vannmagasinene har derfor stor betydning for prisutviklingen kraftmarkedet. Dersom denne økningen ikke kommer, og vi i en lengre periode går mot en tørrere periode, vil dette få store konsekvenser for både kraftprodusenter og samfunnet forøvrig.

NAO-indeksen

NAO-indeksen er en indikator for mengden av høytrykk eller lavtrykk over Atlanterhavet. Denne indikatoren vil kunne si noe om forventet nedbør og forventet tilsig. Det betyr at dersom en kan lage gode prognoser for NAO-indeksen, kan en også lage gode prognoser for forventet nedbør. Problemet er at der i dag ikke er noen klar offisiell teori om hva som påvirker NAO-indeksen (Hurrell, 2003). Dette gjør at det er vanskelig å benytte NAO-indeksen som en indikator for forventet tilsig til kraftmarkedet.

Underliggende problemer med prognoser

Langtidsprognoser er vanligvis basert på historiske data der en søker å estimere en underliggende trend i dataene. Slike analyser kan vise utviklingen av en trend, men det kan være vanskelig å identifisere når trenden vil snu. En annen metode er å ta utgangspunkt i klimamodeller. Problemet her er at klimamodeller er kostbare og usikre. I denne undersøkelsen er det benyttet en tredje analysemetode. Metoden er basert på at en forsøker å identifisere spekteret i tidsserien. Dersom en finner deterministiske sykluser i spekteret, kan en beregne forventet utvikling. Spektralanalyse av dataserier er vanligvis basert på en fourieranalyse. Problemet med fourieranalyse er at metoden forutsetter at der er en stokastisk stasjonær statistikk over hele tidsserien. Dette er vanligvis ikke tilfelle med tidsserier fra naturen. Et annet problem er at en mister informasjon om fasen til sykluser i spekteret. Fasen er viktig fordi den inneholder informasjon om når endringene kommer. I denne undersøkelsen er det benyttet waveletanalyse for å identifisere periodetid og fase til underliggende deterministiske sykluser i tidsserien. Dersom periodetid og fase er deterministisk, kan en beregne en forventet utvikling.

Deterministiske perioder

Diskusjonen om at det finnes deterministiske sykluser i klima og nedbør har vært og er fortsatt omstridt (Borroughs W, 1992). På begynnelsen av 1900-tallet lanserte den svenske oseanografen Otto Pettersson ideen om at der er en sammenheng mellom nedbør i Skandinavia og lange tidevannsbølger på ca 18 år. Til tross for at Pettersson var en grunnlegger av moderne oseanografi, fikk teorien ingen anerkjennelse i hans samtid

(Pettersson 1905, 1914, 1915, 1930). I perioden fra 1920 til 1970 gjorde russiske forskere en omfattende studie av oseanografiske forhold i Atlanterhavet. Resultatet viste at det var en sammenheng mellom nedbør og tidevannsbølger på ca 18 år (Maksimov og Smirnov 1964, 1965, 1967). Denne forskningen ble avsluttet i 1960-årene etter at den ble møtt med stor motstand fra andre russiske forskere (Ozinsky pers. kom.). I de senere år har amerikanske og canadiske undersøkelser kommet et tilsvarende resultat (Currie 1981, 1984, 1987, 1995; Keeling and Whorf 1997; Loder and Garret 1978; Schlessinger and Ramankutty, 1994). Også disse undersøkelsene møtte motbør fordi en ikke kunne gjøre rede for fysiske forklaringer.

Ved Høgskolen i Ålesund startet en i 1995 en studie av sammenhengen mellom sykliske endringer i klima og sykliske endringer i biomassen i Barentshavet. Undersøkelsene var basert nye metoder for wavelet spektrumanalyse for å identifisere dominante sykluser i en lang rekke med arktiske tidsserier. En samlet dr.grad avhandling viste at det er en nær sammenheng mellom et harmonisk spektrum fra tidevannsbølgen på 18.6 år, utbredelse av arktisk is, biomassen i Barentshavet og NAO-indeksen (Yndestad, 2004). Derved hadde en for første gang en samlet teori for deterministiske fluktuasjoner i biomasse og klima.

Denne undersøkelsen

Hensikten med denne undersøkelsen er å studere sammenheng mellom lunar nodal spektrum og nedbør til kraftmarkedet for å utvikle prognoser over en periode på 20 år. Rapporten inneholder en forholdsvis detaljert metodebeskrivelse og resultatene av en wavelet spektrumanalyse av tidsserien for vannkraftproduksjon fra 1931 til 2002. Analysen viser at dataserien for norsk vannkraftproduksjon er dominert av et deterministisk lunar nodal spektrum med perioder på ca 6, 9 og 18 år. Videre er det foretatt en prognose på 20 år fram til 2022. Denne viser at en kan forvente periodiske endringer på ca 9 år og en samlet reduksjon av nedbør i årene som kommer.

2 MATERIALER OG METODE

Dataseriene

Dataseriene for Norsk tilsig omfatter perioden fra 1931 til 2002. De representerer ikke direkte data for tilsig, men midlere produksjon av vannkraft i Gwh pr uke. Analysen i denne undersøkelsen er basert på den årlige middelveiden av dataene for å undertrykke variasjoner over årstiden. Midlingen av dataseriene gjør også at en må anta at det er en nær sammenheng mellom tilsig og kraftproduksjon. Alle dataseriene er formidlet av Frode Haga ved BKK i Bergen.

Systemteori

Denne undersøkelsen representeres med en forenklet systemmodell.

$$S(t) = \{B(t), \{S_{Sun}(t), S_{Moon}(t), S_{Arc}(t), S_{Oce}(t), S_{Atm}(t), S_v(t)\}\} \} \quad \text{Formel 1}$$

der $S_{Sun}(t)$ resenterer solsystemet, $S_{Moon}(t)$ representerer månen som system, $S_{Arc}(t)$ representerer det arktiske system, $S_{Oce}(t)$ representerer the oseanografiske system, $S_{Atm}(t)$ det atmosfæriske

system, $S_v(t)$ representerer forstyrrelse fra en ukjent kilde, og $B(t)$ representerer en tidsvariant relasjon mellom alle systemene.

Hypotesen

Hypotesen i denne undersøkelsen er basert på kunnskaper om at tilstanden til månens bane $S_{\text{Moon}}(t)$ ikke er stasjonær. Siden det er en binding $B(t)$ mellom månen og jorden via gravitasjon, vil sykliske endringer i månens bane påvirke alle andre elementene i systemet.

Den mest betydningsfulle endringen er den såkalte Lunar nodal cycle på 18.6 år. Denne har sammenheng med at månens plan har en vinkel på 23.27 grader i forhold til det ekliptiske planet mellom jorden og solen. Forholdet mellom jorden, månen og solen fører til at krysspunktene mellom månens plan og det ekliptiske plan roterer 360 grader på 18.6134 år. Vinkelen mellom månens plan og det ekliptiske plan endres da med 5.09 grader på 18.6 år. Dette kan formuleres med modellen

$$u_0(t) = 23^{\circ}27' + 5^{\circ}09' \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{Formel 2}$$

der $\omega_0 = 2\pi/T_0 = 2\pi/18.6134$ (rad/år) er vinkelfrekvensen på lunar nodal syklus, t (år) er tiden og $\varphi_0 = 0.90\pi$ er fasevinkelen. Fasevinkelen er justert mot et maksimum i November 1987 og et minimum i March 1996 (Pugh, 1996). Endringen i gravitasjon kraften fra månen fører til en global 18.6 år horisontal og vertikal tidevannsbølge i havet og en syklisk endring i jordaksen (nutasjonen) på 18.6 år.

Fra ulineær teori vet vi at energien fra en stasjonær syklus fordeles som et harmonisk spektrum. Dette spektrum kan representeres med modellen

$$u(t) = \sum_n a_n(t) \sin(n\omega_0 t + \varphi_n(t)) \quad \text{Formel 3}$$

der $u(t)$ representerer et lunar nodal spektrum sammensatt av et sett harmoniske- og subharmoniske sykluser med amplitude $a_n(t)$ og fase $\varphi_n(t)$. Etter denne modellen vil månen påvirke klimaet i perioder på $n\omega_0 = n2\pi/18.6$ (år) der $n=1,2,3\dots$ $n=1/2, 1/3, 1/4\dots$. Betydningen av periodene er bestemt av amplituden $a_n(t)$ og fasen $\varphi_n(t)$ bestemmer når periodene har maksimum eller minimum. En nærmere analyse av tidsserier viser at amplituden og fasen kan variere med tiden. En varierende amplitude fører til at en kan få mer ekstreme variasjoner i klimaendringer. Det viser seg også at fasen kan være stabil i perioder for så å bli snudd 180 grader (Yndestad, 2004). Dette fenomenet fører til en ny form for usikkerhet og det forklarer hvorfor disse syklusene har vært vanskelig å oppdage med klassiske metoder for spektrumanalyse.

Wavelet spektrum analyse

Analysen av dataseriene er basert på hypotesen om at måleseriene for tilsig kan representeres med modellen:

$$y(t) = u(t) + v(t) \quad \text{Formel 4}$$

der $y(t)$ er den målte tidsserien, $u(t)$ er et kjent lunar nodal syklus spektrum i dataserien og $v(t)$ representerer forstyrrelser fra et sett med andre ukjente kilder. Identifikasjonsproblemet er å identifisere det deterministiske spekteret $u(t)$ i måleserien $y(t)$.

Prognoser for sykliske endringer har sammenheng med syklusenes periodetid og fase. En egnet metode til å beregne periodetider og fase er å studere tidsseriens wavelet spektrum. Et wavelet spektrum kan beregnes med transformasjonen

$$W_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R y(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad \text{Formel 5}$$

der $y(t)$ er den målte dataserien for analyse, $\Psi(\cdot)$ er en wavelet impuls funksjon, $W_{a,b}(t)$ er et sett med wavelet transformasjoner, med skalering a , og tidsforskyvning b . Det beregnede wavelet spektrum $W_a(t)$ representerer en glidende krysskorrelasjon mellom dataserien $y(t)$ og wavelet impuls funksjonen $\Psi(\cdot)$ over hele dataserien. En kan da betrakte wavelet spekteret som resultatet fra et sett med lineære filter med ulik båndbredde (Matlab, 1997; Daubechies, 1992). Hver skalering, med bredden a , kan da plukke ut potensiell underliggende perioder i dataserien. Dersom wavelet spekteret inneholder stasjonære sykluser kan måleserien representeres med

$$y(t) = W(t) + v(t) \quad \text{Formel 6}$$

der $W(t)$ representerer dominante wavelet sykluser og $v(t)$ representerer et sett med forstyrrelser fra en ukjente kilder. Spørsmålet da er om det er en sammenheng mellom et lunar nodal spektrumet $u(t)$ og de dominante syklusene $W(t)$.

Periodetid

Periodetiden til dominante sykluser i Lunar nodal spektrumet identifiseres med å beregne autokorrelasjon av hele wavelet spekteret med

$$R_a(\tau) = E[W_a(t)W_a(t + \tau)] \quad \text{Formel 7}$$

Et sett av autocorrelasjoner $R_a(\tau)$ vil da vise periodetiden på dominante stasjonære sykluser over tidsserien.

Fase

Periodetidene til Lunar nodal spektrum $u(t)$ er kjent siden periodetiden på basisperioden 18.6 år er kjent, men fasen til periodetidene er ukjent. Fasen til identifiserte perioder identifiseres med krysskorrelasjonen

$$R_n = E[u_n(t)W_n(t)] \quad \text{Formel 8}$$

der $W_n(t)$ er en dominant wavelet syklus, $u_n(t)$ er en harmonisk lunar nodal syklus R_n er en optimal krysskorrelasjon når $\varphi_n(t)$ den frie variable fase.

Kvaliteten av krysskorrelasjonen kan beregnes med Pearsons korrelasjonskoeffisient

$$Q_k = R_k \sqrt{\frac{n-2}{1-R_k^2}} \sim t(n-2) \quad \text{Formel 9}$$

der n er antall verdier i tidsrekken Q_k er testet mot en student t -fordeling med $(n-2)$ frihetsgrader for å undersøke om korrelasjonen er statistisk signifikant. (Storch and Zwiers, 1999; Daly F et al. 1995). Amplitudens til nodal spekterets innflytelse undersøkes med Signal til Støyforholdet

$$S/N = \text{var}(W(t))/\text{var}(v(t)) \quad \text{Formel 10}$$

der $v(t)=(y(t)-W(t))$ representerer forstyrrelsen fra ukjente kilder

Nivå og amplitude på deterministisk funksjon

$u(t)$ er sammensatt av en sum deterministiske sinusfunksjoner. Etter at periodetid og fase er identifisert, er neste trinn å identifisere nivå og amplitude for sinusfunksjonene. Nivået til en dominant wavelet, med periode n , identifiseres med å beregne periodens middelværdi $a_{n0}=E[W_n(t)]$. Amplituden identifiseres med å beregne variansen $a_{n1}=\text{var}[W_n(t)]$.

En tidligere analyse tyder på at der er en multiplikativ modellering mellom av de store fluktuasjonene i NAO-indeksen (Yndestad, 2004). Denne antakelsen bekreftes i de resultatene som framkommer i denne analysen. Den multiplikative modellering kan framstilles med modellen

$$a_n(t) = K[1 + m \sin(\omega_0 t / n_1 + \varphi_n(t))] \sin(n_2 \omega_0 t + \varphi_0(t)) \quad \text{Formel 11}$$

der K bestemmer utslager og m bestemmer hvor mye den sub-harmoniske syklus n_1 påvirkes av en høyere periode n_2 .

Prognose

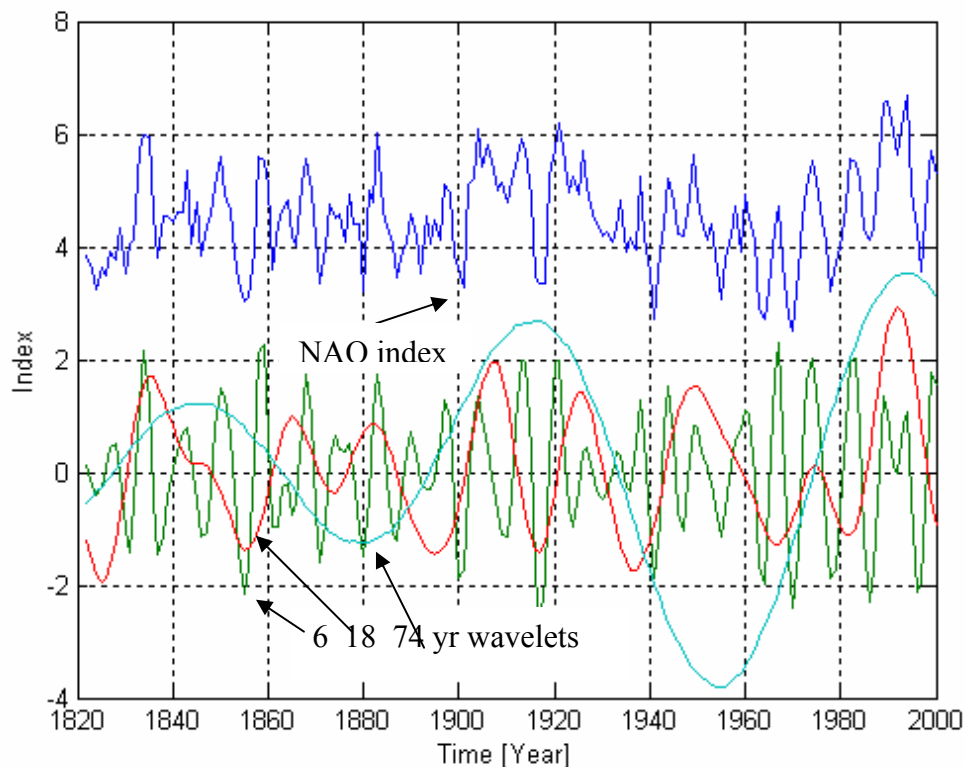
Den samlede prognosen beregnes ut fra en sum av alle deterministiske sykluser

$$u(t) = \sum_n a_n(t) \sin(n\omega_0 t + \varphi_n(t)) \quad \text{Formel 12}$$

Etter denne metoden har vi en perfekt modell dersom $e(t)=y(t)-u(t)=0$ nå t omfatter alle samples i tidsserien. En prognose på 20 år får en dersom t økes fra $t=2004$ til $t=2024$. Det betyr at etter denne metoden får vi testet modellen over hele tidsserien av historiske data.

3 RESULTATER

NAO vinter indeks



Figur 1 NAO vinter indeks og identifiserte sykluser på 6, 18 og 74 år.

NAO vinter indeks (november til mars) er en indikator som viser sammenheng mellom høytrykk og lavtrykk mellom Island og Portugal. En høy NAO indeks er et uttrykk for at det er mild vinter og mye nedbør i Skandinavia. Når indeksen er lav har en kald vinter og lite nedbør. Denne figuren viser utviklingen av NAO vinter indeks fra 1822 til 2000. En wavelet analyse av indeksen viser at den har dominante sykluser på ca 6, 18 og 74 år (Yndestad, 2004).

Maksimum for 74 år NAO er ca {1918, 1995}.

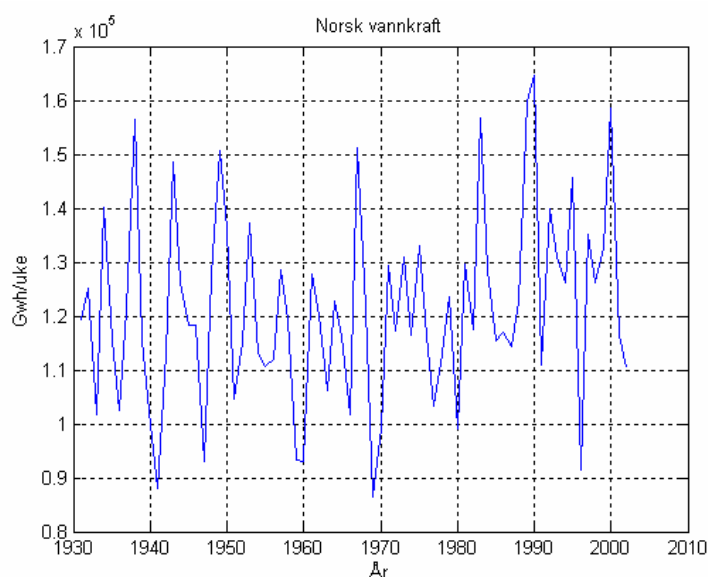
Minimum for 74 år NAO er ca {1955}.

Maksimum for 18 år NAO er ca {1930, 1950, 1970, 1990}

Minimum for 18 år NAO er ca {1938, 1965, 1981}.

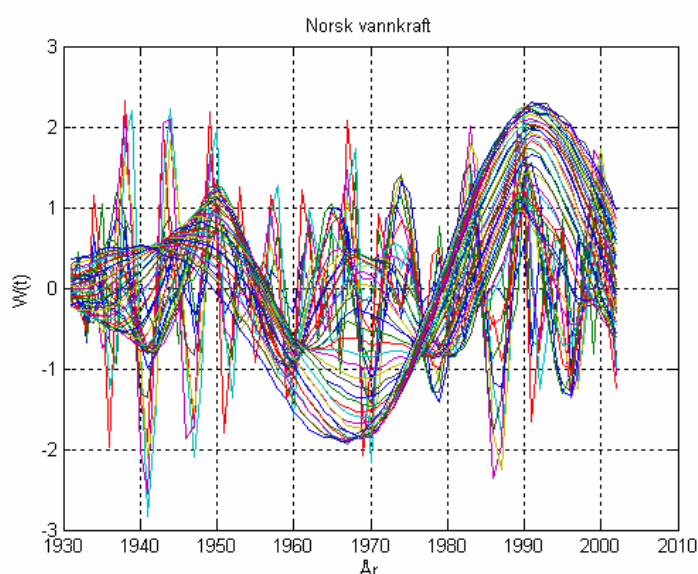
Fasen til 18-år syklusen er beregnet til $\phi_{NAO18} = 1.48/0.48\pi$ (Yndestad, 2004). Syklusen på 6 år er noe mer ustabil. Denne NAO-indeksen kan være en referanse for periodiske endringer for nedbør på Vestlandet.

Norsk vannkraft



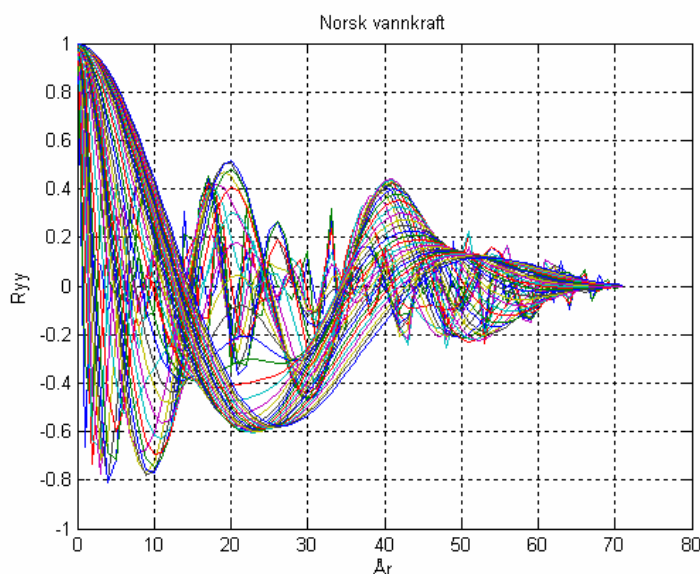
Figur 2 Samlet norsk vannkraftproduksjon

Figur 2 viser utviklingen av årlig midlere vannkraftproduksjon (Gwh/uke) fra 1931 til 2002. Vi ser av dataserien at den midlere produksjonen kan variere fra 0.9 til $1.6 \cdot 10^5$ Gwh/uke. Det betyr at vannkraftmarkedet kan variere $\pm 25\%$ og illustrerer dermed den store ustabiliteten vi har i tilskudd av vannkraft til kraftmarkedet. Samtidig ser vi at endringene svinger fra den ene ytterligheten til den andre. Fluktuasjonene er også ulik den vi forbinder med normalfordelt støy.



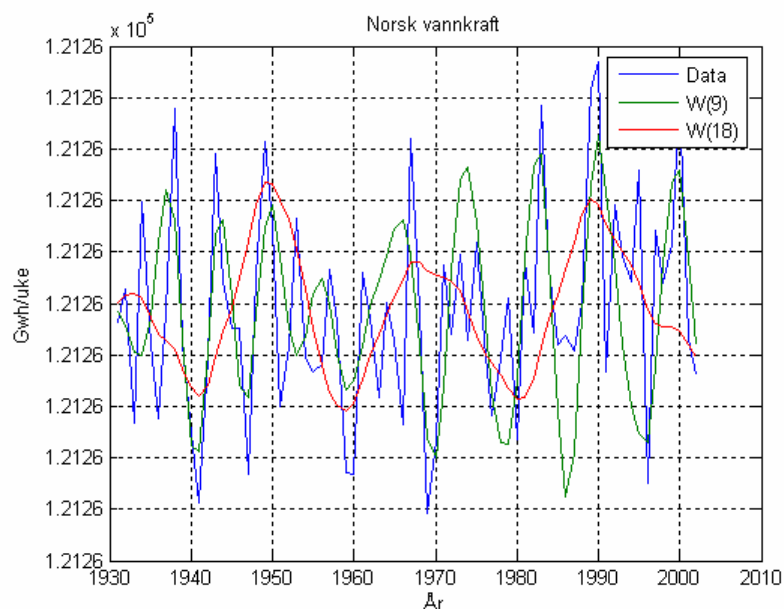
Figur 3 Wavelet spekter

Figur 3 viser wavelet spekteret $W_a(t)$ (Formel 5) for tidsserien. Wavelet spekteret viser at der er en konsentrasjon av noen raske periodiske svingninger og en svingning med en lengre periode.



Figur 4 Autokorrelasjon av waveletspekteret

Figur 4 viser autocorrelasjonen for alle periodene i wavelet spekteret (Formel 7). Det framgår av denne figuren at wavelet spekteret har dominante perioder ca 6, 9 og 18 år. Det betyr at de store fluktuasjonene i dataserien har omtrent samme periodetid som tidevannspekteret på 18,6, $18.6/2=9.3$ og $18.6/3=6.2$ år.



Figur 5 Dataserie for Norsk vannkraft og dominante wavelet perioder på 9 og 18 år.

Denne figuren viser tidsserien for midlere norsk vannkraft og de dominante wavelet periodene på 9, og 18 år. Det fram går av figuren at der er

Maksimum for 18 år syklus ved ca {1950, 1968, 1990}

Minimum for 18 år syklus ved ca {1940, 1959, 1980}

I denne analysen er dataserien for kort til å fastslå periodetiden til de langre fluktuationene på 55 og 74 år. Tar vi utgangspunkt i analysen fra NAO-indeksen, kan en forvente at der er en underliggende syklus på ca 75 år.

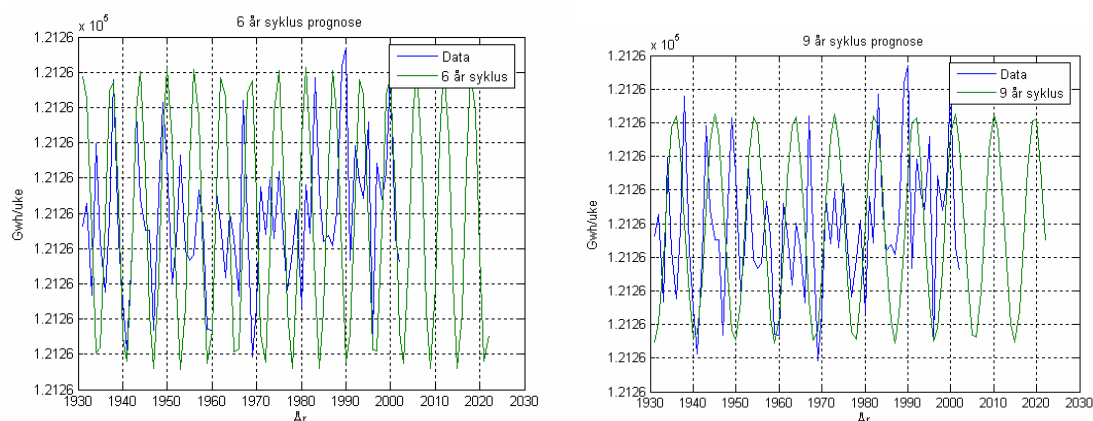
Krysskorrelasjonen og mellom data serien og wavelet estimatet er beregnet til $R_{yw} = 0.72$ med $Q_{yw} = 8.78$ (Formel 8 og 9). Signal til Støyforholdet mellom dataserien og wavelet spekteret er beregnet til $S_{yw}/N = 1.6$ (Formel 10). Dette viser at der er en nær sammenheng mellom dataserien og de dominante wavelet syklusene. Korrelasjonen (Formel 8 og 9) mellom de dominante wavelets syklusene og Lunar nodal spektrum er beregnet til

$$\begin{array}{lll} R_6 = 0.72 & Q_6 = 6.0 & N = 33 \text{ samples} \\ R_9 = 0.73 & Q_6 = 6.4 & N = 36 \text{ samples} \\ R_{18} = 0.79 & Q_6 = 10.9 & N = 70 \text{ samples} \end{array}$$

Dette viser at der er en nær sammenheng mellom dominante sykluser i dataserien og lunar nodal spekteret. Lunar nodal spekteret kan representeres med et sett med sinusfunksjoner (Formel 12). En optimal korrelasjon (Formel 8) gir oss et estimatet av lunar nodal spekter med parametrene

$$\begin{array}{lll} a_{0_6} = 0.0047 & a_{1_6} = 2.14 & \varphi_6 = 1.96\pi \\ a_{0_9} = 0.0047 & a_{1_9} = 1.70 & \varphi_9 = 0.54\pi \\ a_{0_{18}} = 0.0169 & a_{1_{18}} = 1.25 & \varphi_{18} = 0.90\pi \end{array}$$

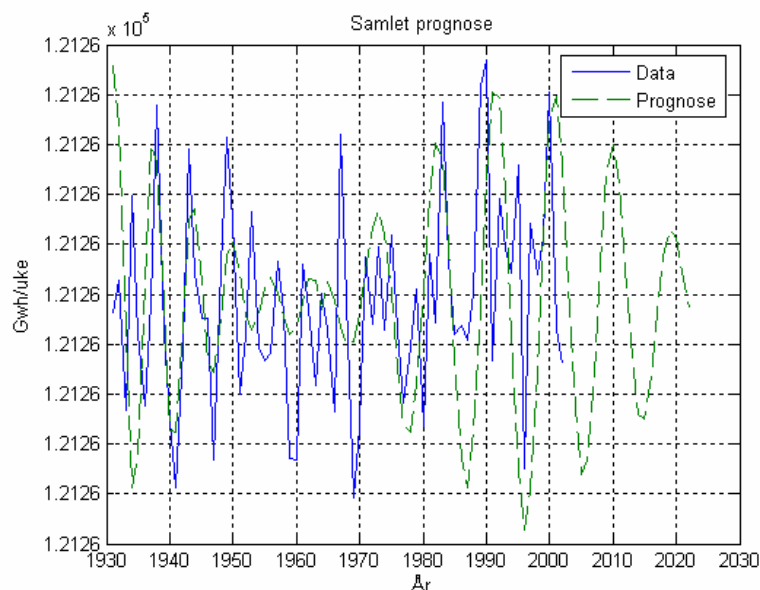
der a_{0_6} representerer middelverdien a_{1_6} amplitude og $\varphi_6 =$ fasen for syklusen på 6.2 år. Den estimerte syklus på 18 år har fasen $\varphi_{18} = 0.90\pi$. Dette er eksakt samme fase som den astronomisk lunar nodal syklus på 18.6 år. Det betyr at der er en forsinkelse mellom 18-år syklusen for Norsk vannkraft og 18-år syklusen for NAO vikter indeks på $(0.90\pi - 0.48\pi) = 0.42\pi$ (rad) eller ca 3-4 år.



Figur 6 Data serie og deterministiske sykluser på 6 og 9 år

Figur 6 viser dataseriene og stasjonære sykluser på $18.6/3 = 6.2$ år og $18.6/2 = 9.3$ år. Fasen til syklusene har optimal korrelasjon ved $\varphi_6(t) = 1.96\pi$ (rad) og $\varphi_9(t) = 0.54\pi$ (rad). Fasen til 6-år syklusen for utbredelse av arktisk i Barentshavet er beregnet til $\varphi_{6is}(t) = 1.09\pi$ (Yndestad, 2004). Det betyr at der er en forsinkelse på 0.13π (rad) eller 0.4 år mellom reduksjon arktisk is og mer nedbør i Norge.

Figur 7 viser samtidig at den dominante syklus på 6.2 år skifter periodetid til 9.3 fra ca 1965 og beholder denne perioden resten av tidsserien. Tidspunktet for denne forandringen faller sammen med når 74 år i NAO hadde et minimum.



Figur 7 Dataserie fra 1931 til 2002 og prognose fra 1931 til 2022

Figur 7 viser dataserien fra 1931 til 2002 og en estimert deterministisk prognose fra 1931 til 2022. Prognosen er basert på en multiplikativ modulasjon mellom den lavfrekvente syklus på 75 år og de med høyfrekvente sykluser på 6 og 9 år (Formel 11). Videre er det tatt hensyn til at der er et skifte fra en 6 år syklus til en 9 år syklus fra 1965. Korrelasjonen mellom dataserien og den deterministiske prognose er beregnet til $R_{yu} = 0.4$ med $Q_{yu} = 3.3$ (Formel 8 og 9) for tidsintervallet $t=1931$ til 2002. Signal til støyforholdet er beregnet til $S_{yu}/N = 1.3$. Korrelasjonen til de dominante wavelet syklusene er estimert til $R_{yw} = 0.6$.

Prognosen fra 2002 til 2022 viser at amplituden til fluktuasjonene reduseres med et maksimum rundt 2010 og 2019, og minimum rundt 2006 og 2015, samtidig som middelverdien er noen lunde konstant.

4 DISKUSJON

Sammenheng med Lunar nodal spektrum

Korrelasjonen mellom dominante sykluser og lunar nodal spekter er estimert til $R_6= 0.72$, $R_9= 0.73$ og $R_{18}= 0.79$. Fase til 18-års perioden $\phi_{18}= 0.90\pi$ faller sammen med fasen til den perfekte lunar nodal syklus. Fasen til 6-års syklusen $\phi_6= 1.96\pi$ faller sammen med 6-års syklusen for tidebølgen og utbredelse av arktisk is i Barentshavet (Yndestad, 2004). Fra 1960 fikk vi et regimeskifte der 6-år syklusen skiftet over til 9-års syklus. Årsaken til dette skiftet er uklart, men vi ser at det inntreer samtidig med at 74-år syklusen i NAO-indeksen har et minimum. Dette viser at det er en klar sammenheng mellom fluktuasjoner i vannkraft og de fluktuasjoner en har i lunar nodal spekter.

Sammenheng med NAO vinter indeks

Undersøkelsen viser videre at 18-år syklusen i dataserien for Norsk vannkraft har samme fase som den astronomiske lunar nodal syklus og den kommer 3-4 år tidligere enn 18-år syklusen i NAO vinter indeks. Forklaringen på denne faseforskjellen kan være at 18-års tidevannsbølgen har en forsinkelse på 3-4 år fra Atlanterhavet til Barentshavet hvor NAO vinter indeks påvirkes av utbredelsen av Arktisk is (Yndestad m.fl., 2004). Dette tyder på at nedbøren i Norge er mer avhengig av havets overflatetemperatur enn av selve NAO-indeksen.

Prognosen fra 1931 til 2002

Korrelasjonen mellom dataserien for Norsk vannkraft og de dominante wavelets er beregnet til $R_{yw}= 0.6$. Dette er et meget godt samsvar, tatt i betraktning at det er en prognose på 70 år fra 1931. Denne gode korrelasjonen viser at hoveddelen av fluktuasjonene i spekteret er knyttet til de sykliske periodene på 6, 9 og 18 år.

Korrelasjonen mellom dataserien for Norsk vannkraft og prognosen er basert på deterministiske sinusfunksjoner og beregnet til $R_{yu}= 0.4$ over en periode på 70 år. Også dette er et resultat som er langt bedre enn det en kan forvente. Feilavviket synes her å være knyttet til at det ikke er en stasjonær amplitude på sinusestimatet. I denne prognosen er amplituden basert på en multiplikativ modellering mellom 6-år og 9-år syklusen, og 74 år syklusen fra NAO indeksen. Med en mer omfattende analyse, bør dette resultatet kunne forbedres ytterligere.

Prognosen fra 2002 til 2022

Prognosen fra 2002 til 2022 viser en dominant 9-års syklus der amplituden følger en fallende amplitude for en syklus på ca 75 år. Raskere perioder enn 9 år, er ikke tatt med i denne prognosen. Prognosen tyder på en reduksjon av tilsig til vannkraft for denne perioden. Tar en utgangspunkt i sykliske mønster fra NAO-indeksen, er det grunn til å anta at vi får en kjøligere periode med mindre medbør slik vi fikk fra 1950-årene og utover i 1960-årene.

REFERANSER

- Borroughs, William James. 1992. *Weather cycles real or imaginary?* Cambridge University Press.
- Currie, R. G. 1981. Evidence for 18.6 year (*sic*) signal in temperature and drought conditions in North America since A. D. 1800: *Journal of Geophysical Research*.86:11,055-11,064.
- Currie, R. G. 1984. Evidence for 18.6 year (*sic*) lunar nodal (*sic*) drought in western North America during the past millennium: *Journal of Geophysical Research*.89:1295-1308.
- Currie, R. G. 1987. Examples and implications of 18.6- and 11--year terms in world weather records, Chap. 22, p. 378-403 in M.R. Rampino, J.E. Sanders, W.S. Newman, and L.K. Konigsson, eds. *Climate: History, periodicity, and predictability: International Symposium held at Barnard College, Columbia University, New York, New York, 21-23 May 1984 (R. W. Fairbridge Festschrift):* New York, NY, Van Nostrand Reinhold Publishing Corp., 588 p.
- Currie, R. G. 1995. Variance Contribution of M_n and S_c Signals to Nile River Data over a 30-8 Year Bandwidth. *Journal of Coastal Research Special Issue No. 17: Holocene Cycles: Climate, Sea Levels and Sedimentation*, pp 29-38.
- Currie, R. W., T. Wyatt, and D.P. O'Brien. 1993. Deterministic signals in European fish catches, wine harvests, sea level, and further experiments: *International Journal of Climatology*. 8:255-281.
- Keeling, Charles D. and T. P. Whorf. 1997. Possible forcing global temperature by oceanic tides. *Proceedings, National Academy of Sciences of the United States*. 94:8321-8328.
- Loder J. W. and C. Garret. 1978. The 18.6 year cycle of the sea surface temperature in the shallow seas due to tidal mixing. *Journal of Geophysical Research*. 83: 1967-1970.
- Roald, Lars A m.fl 2002. Scenarios of annual and seasonal runoff for Norway based on climate scenarios for 2030-49. Norwegian Meteorological Institute. Net.no Report 19/02.
- Schlesinger, M. E. and N. Ramankutty. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*. 367:723-726.

- Maksimov, I. V. and N.P. Smirnov. 1964. Long range forecasting of secular changes of the general ice formation of the Barents Sea by the harmonic component method. Murmansk Polar Sci. Res. Inst., Sea Fisheries. 4: 75-87.
- Maksimov, I. V. and N.P. Smirnov. 1965. A contribution to the study of causes of long-period variations in the activity of the Gulf Stream. Oceanology. 5:15-24.
- Maksimov, I. V. and N.P. Smirnov. 1967. A long-term circumpolar tide and its significance for the circulation of ocean and atmosphere. Oceanology 7: 173-178 (English edition).
- Maksimov, I. V. and B.A. Sleptsov-Shevlevich. 1970. Long-term changes in the tide-generation force of the moon and the iciness of the Arctic Seas. Proceedings of the N. M. Knipovich Polar Scientific-Research and Planning Institute of Marine Fisheries and Oceanography (PINRO). 27: 22-40.
- Petterson, Otto, 1905. On the probable occurrence in the Atlantic current of variations periodical, and otherwise, and their bearing on metrological and biological phenomena. Rapp. P.-v. R'eun. Cons. Perm. Int. l'Explor. Mer. 42: 221-240.
- Pettersson, Otto, 1914, Climatic variations in historic (*sic*) and prehistoric time: Svenska Hydrogr. Biol. Kommissiones Skrifter, No. 5, 26 p.
- Pettersson, Otto, 1915, Long periodical (*sic*) variations of the tide-generating force: Conseil Permanente International pour l'Exploration de la Mer (Copenhagen), Pub. Circ. No. 65, p. 2-23.
- Pettersson, Otto, 1930, The tidal force. A study in geophysics: Geografiska Annaler.18:261-322.
- Pugh, D T. 1996. Tides, Surges and Mean Sea-Level. John Wiley & Sons. New York.
- Yndestad, H: 2004. The Lunar nodal cycle influence on the Barents Sea. NTNU. 2004:132.
- Yndestad H, Turrell W, Ozhigin V: 2004. Temporal linkages between the Faroe-Shetland time series and the Kola section time series. ICES Annual Science Conference. Sept 2004. Vigo. Regime Shifts in the North Atlantic Ocean: Coherent or Chaotic? ICES CM 2004/M.