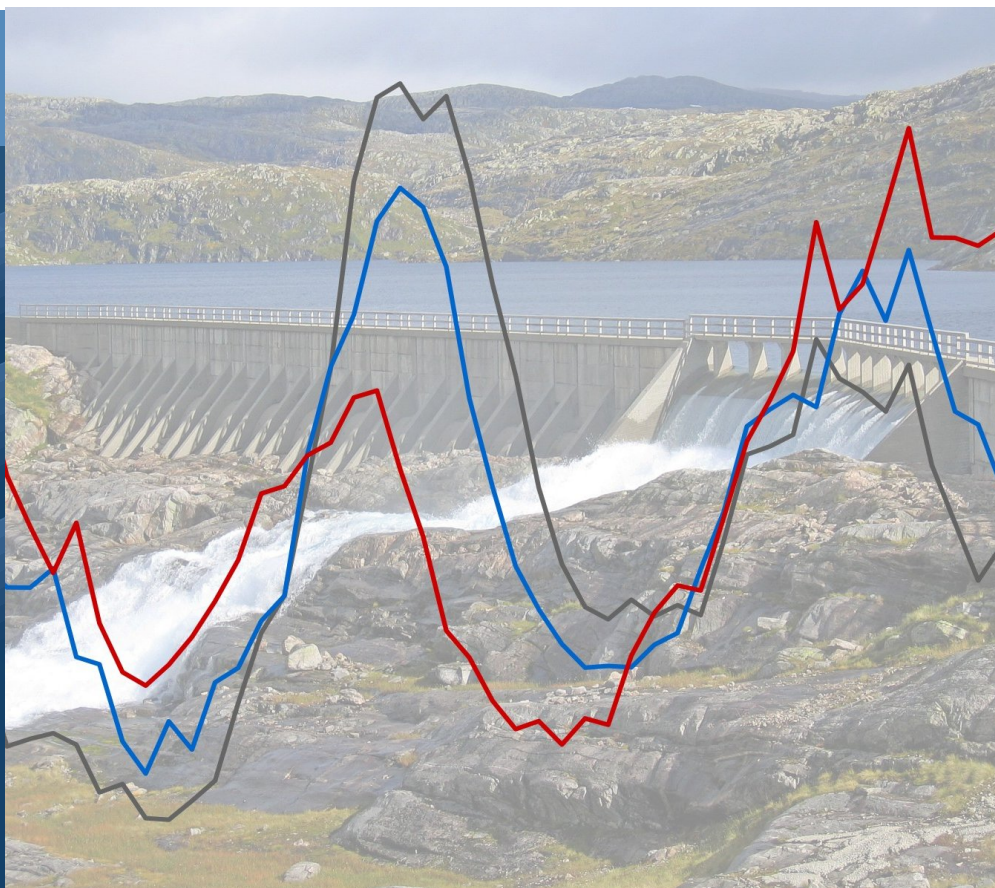




Virkninger av klimaendringer på BKKs kraftproduksjon

*Christina S. Beisland, Christine Birkeland, Valentin J. Koestler,
Birgit Longva, Bjørn Sønju-Moltzau og Eirik V. Øyslebø*

84
2017



R
A
P
P
O
R
T

Rapport nr 84-2017

Virkninger av klimaendringer på BKKs kraftproduksjon

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Prosjektleder: Birgit Longva

Redaktør: Christina Stene Beisland

Forfattere: Christina S. Beisland, Christine Birkeland, Valentin J. Koestler, Birgit Longva, Bjørn Sønju-Moltzau og Eirik V. Øyslebø

Trykk: NVEs hustrykkeri

Opplag:

Forsidefoto: BKK

ISBN 978-82-410-1638-7

ISSN 1501-2832

Sammendrag: Konsekvenser av klimaendringer i vassdragene der BKK har sin kraftproduksjon.

Emneord: Klimaendringer, tilsig, kraftsystemet, produksjonssystemet, kraftverk

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

desember 2017

Innhold

Forord	2
Sammendrag	3
1 Klimaet i Norge vil bli varmere og våtere mot 2100.....	4
2 Modell, datagrunnlag og definisjoner	5
3 BKK sine kraftverk ligger i flere vassdrag.....	7
3.1 Samnangervassdraget	8
3.2 Modalsvassdraget	8
3.3 Matre- og Haugsdalsvassdraget	8
3.4 Bergsdalsvassdraget.....	8
3.5 Herlandsfossvassdraget.....	9
3.6 Eksingedal- og Teigdalsvassdraget	9
3.7 Fossmark, Trengereid, Ulvik 2 og Kløvtveit.....	9
4 Klimaendringer vil gi endrede tilsigsforhold.....	10
4.1 Tilsiget øker mot midten og slutten av århundret	10
4.2 Tilsigstoppen flytter seg fra våren til høsten.....	10
4.3 Snøgrensa flytter seg oppover	11
4.4 Snømagasinet halveres mot slutten av århundret.....	12
4.5 Høst og vinter blir våtere	14
4.6 Sommeren blir tørrere	15
5 Klimaendringer gir økt kraftproduksjon og økte flomtap.....	15
5.1 Utnyttelsesgraden synker utover århundret	16
5.2 Høst- og vinterproduksjonen øker	16
5.3 Lav reguleringsgrad gir større flomtap	18
5.4 Magasinkraftverkene er godt rustet til å håndtere økt tilsig.....	19
5.5 Det blir mer utfordrende å planlegge produksjonen	21
6 Vedlegg.....	23
6.1 Forutsetninger	23
6.1.1 Produksjonssystemet	23
6.1.2 Tilsig- og temperaturserier	24
6.1.3 Tilsigsserier i Vansimtap	25
6.1.4 Antagelser om kraftpris	27
6.2 Sammenligning av klimamodellert tilsig og observert tilsig	28

Forord

Denne rapporten er den tredje i rekken av hvordan det norske kraftsystemet vil påvirkes av et varmere og våtere klima. I oktober 2015 ga NVE ut rapporten «Et væravhengig kraftsystem – og et klima i endring». Den beskrev hovedtrendene Norge vil se i kraftsystemet som følge av klimaendringer.

I 2016 fulgte NVE opp med rapporten «Klimaendringer i Glommavassdraget – påvirkning på kraftverk og produksjonssystemet». Her var fokuset på hvordan produksjonssystemet i Norges største vassdrag håndterer endringer i klima fra i dag og frem mot slutten av århundret.

Det er forskjeller i hvordan de forskjellige landsdelene i Norge vil bli påvirket av klimaendringer og hvordan de vil håndtere endringene. Topografien på Vestlandet er brattere enn på Østlandet, og produksjonssystemene er bygd opp tilpasset geografien. Det har vært viktig for NVE å også belyse forskjellige deler av landet for å lære mer om hvordan klimaendringer kan påvirke produksjonssystemet, og hvilke utfordringer vi kan komme til å møte i fremtiden. Dette er grunnleggende kunnskap som er nyttig for fremtidige revisjoner av konsesjonsvilkår, og ved store reinvesteringer i norske vannkraftanlegg.

Analysene gir ingen uttømmende kunnskap om hvilke konsekvenser klimaendringer vil ha. Dette gjelder blant annet hvordan vassdragene er rustet til å håndtere økninger i kortvarig kraftig nedbør, og hvordan dette bør tas hensyn til i fremtidige opprustning- og utvidelsesprosjekter.

Vi tar gjerne imot tilbakemeldinger på rapporten, og håper at konklusjonene vil bidra til gode diskusjoner og inspirasjon til nye analyser på flere aspekter ved dette temaet.

Arbeidet hadde ikke vært mulig uten hjelpen vi har fått fra BKK. De har bidratt med helt nødvendig informasjon og kunnskap om produksjonsanleggene i vassdragene, og har vært gode diskusjonspartnere både i utformingen av problemstillingene og tolkingene av resultatene.

Oslo, desember 2017



Anne Vera Skriverhaug
Avdelingsdirektør
Energiavdelingen

Sammendrag

Et varmere og våtere klima vil påvirke kraftproduksjonen i Norge gjennom endringer i tilsig. Landsdelene vil bli påvirket ulikt av klimaendringer. I tillegg har produksjonssystemene i de forskjellige delene av landet ulike egenskaper, og vil derfor håndtere klimaendringene ulikt. I denne rapporten er det fokus på vestlandsvassdragene der BKK har kraftproduksjon. Analysen tar utgangspunkt i dagens system med fremtidens klima. Hovedkonklusjonene fra analysen er:

- **Tilsiget øker og tilsigstoppen flytter seg fra våren til høsten.** Tilsiget øker utover århundret som følge av økt nedbør. Vassdragene går fra å ha en tydelig tilsigstopp i forbindelse med snøsmeltingen på våren, til å få større deler av tilsiget utover høsten og vinteren. Det ventes mindre snøsmelteflommer om våren.
- **Snøgrensa flytter seg oppover og snømagasinet halveres mot slutten av århundret.** Snøen vil komme stadig senere og smelte stadig tidligere ettersom temperaturene øker. Jo lavere vassdragene ligger, jo sterkere vil denne trenden være.
- **Høst og vinter blir våtere, sommeren blir tørrere.** Når klimaet blir våtere og varmere vil tilsiget til kraftverk og magasiner øke gjennom store deler av høsten og vinteren. Ettersom temperaturene øker, vil det også forekomme situasjoner i vintersesongen som i dag er typiske for høsten, med mye tilsig og store flomtap. Den våteste vinteren får nær en dobling av vintertilsiget mot slutten av århundret sammenliknet med i dag. Somrene blir tørrere, både fordi snøsmeltingen flyttes mot vintersesongen, og fordi høyere temperaturer bidrar til økt fordampning.
- **Økt produksjon og flomtap på høsten og vinteren.** Når nedbøren i økende grad faller som regn, vil kraftproduksjonen i større grad følge nedbøren. Produksjonsøkningen kommer dermed i de kaldeste periodene av året. Flomtapene øker også på høsten og vinteren. Mot slutten av århundret vil det være enkelte år som byr på utfordringer for systemet.
- **Utnyttelsesgraden reduseres utover århundret.** Utnyttelsesgraden er andelen av det tilgjengelige tilsiget som utnyttes til kraftproduksjon. Kraftproduksjonen i BKK sine kraftverk øker ettersom tilsiget øker. Økningen i flomtap er imidlertid større enn økningen i produksjon. Dermed går utnyttelsesgraden ned.
- **Utfallsrommet i magasinifyllingen øker.** I gjennomsnitt vil magasinene tappes mindre ned på våren, og ligge lavere gjennom høsten. Ettersom det blir større forskjell på de våte og de tørre årene vil utfallsrommet i magasinifyllingen mellom år bli større. Dette kan gjøre det mer utfordrende å planlegge produksjonen mot slutten av århundret.

1 Klimaet i Norge vil bli varmere og våtere mot 2100

Rapporten «Klima i Norge 2100» beskriver hvordan klimaet i Norge kan utvikle seg frem mot år 2100, med ulike scenarioer for klimagassutslipp. Det er tatt utgangspunkt i resultater fra ti ulike kombinasjoner av globale og regionale klimamodeller, fra ulike forskningsinstitutt rundt om i verden. Disse er skalert ned og justert for avviket mellom observert og modellert temperatur og nedbør. Hver av klimamodellene er kjørt med to utslippsscenarioer, et moderat og et høyt. Scenarioet med moderate utslippsøkninger (RCP4.5) tilsvarer en utvikling med en global temperaturøkning på rundt 2,5 °C mot år 2100. Det høye utslippsscenarioet (RCP8.5) representerer en utvikling som følger dagens utslippsvekst, og gir en global temperaturøkning på om lag 4,5 °C. Temperaturøkningene i de to utslippsscenarioene er i forhold til før-industriell tid (ca. 1850-1900).

I etterkant av «Klima i Norge 2100» ga NVE ut rapporten «Et væravhengig kraftsystem – og et klima i endring». Her ble noen av framskrivningene på avrenning fra «Klima i Norge 2100» benyttet inn i NVEs kraftmarkedsmodell for å forstå hvordan klimaendringene kan påvirke det norske kraftsystemet. Kun en klimamodell ble benyttet, og det var fokus på de overordnede resultatene for landet som helhet. Rapporten konkluderte blant annet med at det norske kraftsystemet vil oppleve både økt produksjon og økte flomtap som følge av at klimaet endrer seg utover århundret.

I fjor ga NVE ut en mer detaljert rapport med fokus på Norges største vassdrag, Glommavassdraget. I denne analysen ble det benyttet flere klimamodeller, slik at man her så på et utfallsrom basert på resultater fra fem ulike modellkombinasjoner. Disse ble kjørt med begge utslippsscenarioene, slik at analysene baserte seg på ti sett med framskrivninger for tilsig i Glommavassdraget. Hovedkonklusjonen fra denne analysen var at klimaendringer gir mindre sesongvariasjoner i tilsiget, noe som bidrar til at utnyttelsesgraden i produksjonssystemet øker utover århundret. Dette skyldes blant annet at produksjonssystemet er relativt uregulert og elvekraftverkene drar nytte av at tilsiget kommer jevnere over året.

Denne rapporten har fokus på den andre siden av fjellene, på Vestlandsvassdrag der BKK har kraftproduksjon. Denne analysen vil derfor komplementere analysen av den overordnede utviklingen i Norge og bidra til forståelsen av hvordan et endret klima vil påvirke ulike typer vannkraftproduksjon. En hovedforskjell mellom Glommavassdraget og BKK-områdene er størrelsen på kraftverkene og regulerbarheten i vassdragene. I tillegg er topografien og klimaet veldig forskjellig på øst- og vestsiden av fjellene i Sør-Norge.

Årsmiddeltemperaturen for Hordaland er forventet å øke med ca. 4° C frem mot år 2100 sammenlignet med i dag dersom utslippene øker med samme takt som i dag. Økningen er størst på høst og vinter, og noe mindre for sommeren. Årsmiddelnedbøren i Hordaland er beregnet å øke med rundt 15 prosent mot 2100. Det er endringen i disse variablene som driver endringen i tilsiget, og som videre påvirker hvordan produksjonssystemet håndterer klimaendringene.

Utslippsscenarioer

FNs klimapanel har analysert ulike scenarioer for globale utslipp av klimagasser. Disse scenarioene har de kalt '**Representative Concentration Pathways**' (**RCP**er). I dette prosjektet har vi tatt utgangspunkt i to utslippsscenarioer: RCP4.5 og RCP8.5. Tallene bak står for økning i klimapådriv fra før-industriell tid (1850-1900) til slutten av dette århundret.

RCP8.5: Dette er det høyeste utslippsscenarioet og tilsvarende en global temperaturøkning på rundt 4,5°C. Dette legger til grunn at utslippene av klimagasser fortsetter å øke i samme takt som de har gjort de siste tiårene.

RCP4.5: Dette utslippsscenarioet er moderat og tilsvarer en global temperaturøkning på ca. 2,5 °C mot slutten av århundret. Scenarioet innebærer at klimagasskonsentrasjonene i atmosfæren vil øke noe fram mot 2060, men at det stabiliseres ved slutten av århundret. Utslippene i dette scenarioet kan øke noe i starten av dette århundret, men fra 2040 må de avta, og fra 2080 må utslippene stabiliseres på et nivå som tilsvarer ca. 40 prosent av utslippene i 2012.

2 Modell, datagrunnlag og definisjoner

Denne analysen tar utgangspunkt i data fra framskrivninger, ikke statistikk. Datagrunnlaget som er benyttet i denne rapporten er modellresultater. Tallene i historisk periode (1981-2010) stemmer derfor nødvendigvis ikke nøyaktig overens med statistikk fra samme periode. Se mer om dette i vedlegg 6.2.

Det er tatt utgangspunkt i dagens produksjonssystem, og av inngangsdataene er det kun klimaet som endrer seg fra periode til periode. Dette endrer seg både direkte, gjennom endring i tilsig, men også indirekte, gjennom prisrekkene som kraftverkene i vestlandsområdet handler mot. Vurderingen av hvordan vannkraftsystemet i BKK-området påvirkes av klimaendringer er basert på analyser gjort i produksjonssystemmodellen Vansimtap. Dette er en stokastisk optimaliseringsmodell som tar hensyn til usikkerhet i tilsig. Inngangsdata til Vansimtap er tilsigsserier. Tilsigsseriene er laget ved å kjøre resultater fra klimaframskrivningene på temperatur og tilsig gjennom en hydrologisk vannbalansemodell (HBV-modellen).

Denne analysen tar utgangspunkt i fem ulike klimaframskrivninger, kjørt med to ulike utslippsscenarioer (RCP4.5 og RCP8.5). Dette gir 10 ulike sett med tilsigsserier fra i dag og til slutten av århundret. Framskrivningene kan ses på som like sannsynlige, men med ulike beskrivelser av fremtidsklimaet. På denne måten blir det et utfallsrom i resultatene som synliggjør noe av usikkerheten i slike analyser. Det er likevel en del fellestrekk uavhengig av utslippsscenario og klimaframskrivning.

Analysen fokuserer på kraftproduksjonen til BKKs anlegg. I den sammenhengen er det viktig å påpeke at Vansimtap har ukesoppløsning. Resultatene i analysen egner seg derfor ikke til å si noe om konsekvenser av kortsiktige tilsigsvariasjoner innenfor time eller

døgn. Tidsoppløsningen har mindre betydning for de overordnede resultatene i et system med stor magasinkapasitet enn for et uregulert system.

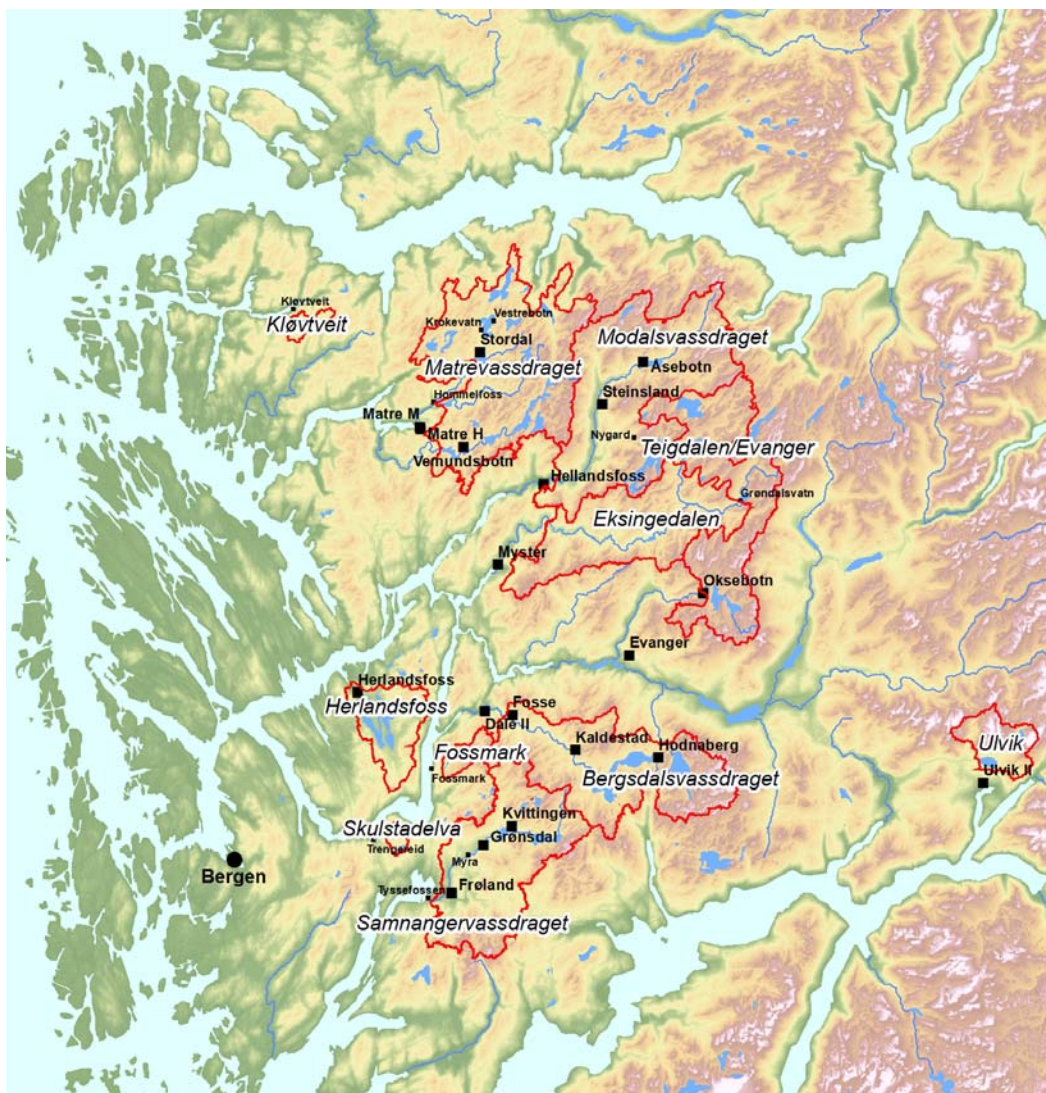
I analysen er det fokusert på verdier for tre ulike trettiårsperioder for å illustrere dagens tilsigsforhold, og hvordan det utvikler seg frem mot midten og slutten av århundret. De tre trettiårsperiodene er definert som følger: 1981-2010, 2031-2060 og 2071-2100. Det er hovedfokus på gjennomsnittsverdier innenfor de tre periodene, men utfallsrommet presenteres der det er interessant, for eksempel for å vurdere konsekvenser av ekstremer. De fleste figurene i rapporten er vist for det høye utslippsscenarioet. Trendene er stort sett de samme i det moderate utslippsscenarioet, men ikke like kraftige. Der det er snakk om sesonger har vi definert vinter som uke 49 til uke 9, vår fra uke 10 til uke 22, sommer fra uke 23-35 og høst fra uke 36-48.

For mer utfyllende informasjon om modeller og inngangsdata se vedleggene.

3 BKK sine kraftverk ligger i flere vassdrag

BKK har kraftproduksjon i flere vassdrag som hovedsakelig er lokalisert i Nord-Hordaland. Samlet midlere årstilsig til disse vassdragene er på ca. 7,0 TWh og kraftverkene i området produserer totalt rundt 6,6 TWh¹ per år. Dette tilsvarer i underkant av 5 prosent av Norges kraftproduksjon. Produksjonen er fordelt på 33 kraftverk, hvor 28 av kraftverkene er heleid av BKK. Det er i underkant av 50 små og mellomstore magasiner i systemene.

Figur 1 viser vassdragene i BKK-området med tilhørende kraftverk.



Figur 1: De forskjellige vassdragene BKK har kraftproduksjon i er uthevet på kartet. Firkanten ved siden av kraftverksnavn angir størrelsen på kraftverket.

¹ Midlere årsproduksjonen som er oppgitt for de enkelte vassdragene i avsnitt 3.1– 3.7 er simulert produksjon fra Vansimtap og kan avvike fra faktisk normalårsproduksjon. For mer informasjon, se vedlegg 6.1

Tabell 1. Nøkkelinformasjon for de ulike vassdragene hvor BKK har kraftproduksjon. Alle tall er hentet fra NVEs Vansintap-modell.

Vassdrag	Installert effekt (MW)	Magasin-volum (GWh)	Tilslig (GWh)	Produksjon (GWh)
Samnangervassdraget	99	150	522	473
Modalsvassdraget	264	447	1128	1041
Matre- og Haugsdalsvassdraget	435	804	1989	1888
Bergsdalsvassdraget	228	604	1300	1244
Herlandsfossvassdraget	14	28	67	66
Eksingedal- og Teigdalvassdraget	747	429	1711	1633

3.1 Samnangervassdraget

Samnangervassdraget er et enkelt vassdrag med én elvestreng med kraftverk og magasiner. Vassdraget strekker seg fra de øverste magasinene på ca. 800 meter over havet, og ned til Samnangerfjorden. Det er fem kraftverk og seks regulerte vann i vassdraget. Midlere årsproduksjon er på om lag 480 GWh. Det øverste kraftverket i Samnangervassdraget er Kvittingen kraftverk. Dette er også det største kraftverket i vassdraget, med en midlere årsproduksjon på i overkant av 160 GWh. Kvittingen får vann fra Svartavatnet (om lag 600 moh) og Øvre og Nedre Dukavatnet (om lag 800 moh) i tillegg til flere mindre bekkeinntak.

3.2 Modalsvassdraget

Modalsvassdraget er et relativt komplekst vassdrag i Nordhordland og Sogn og Fjordane. Hoveddelen av magasinene ligger over 600 moh, og flesteparten av de regulerte magasinene ligger på 800-1000 moh. I Modalsvassdraget ligger Nygard pumpekraftverk, med en installert effekt på 56 MW. Totalt er det fire større kraftverk i vassdraget, på mellom 15 og 170 MW, med en total midlere årsproduksjon på i overkant av 1 TWh. Det er 5 regulerte vann i vassdraget og mange uregulerte vann.

3.3 Matre- og Haugsdalsvassdraget

Matre- og Haugsdalsvassdraget ligger i fjellområdet på grensen mellom Hordaland og Sogn og Fjordane. Systemet har 20 regulerte vann, og magasinene ligger mellom 450 og 800 moh. De største kraftverkene er Matre H og Matre M som utnytter vannet i henholdsvis Haugsdalsvassdraget og Matrevassdraget. I Matrevassdraget utnyttes også vann fra Førdevassdraget og fem mindre vassdrag med naturlig avløp til Sognefjorden. Total midlere årsproduksjon produksjon for kraftverkene i dette systemet er på ca. 1,9 TWh.

3.4 Bergsdalsvassdraget

Bergsdalsvassdraget ligger i Vaksdal, Kvam og Voss kommuner i Hordaland. Vassdraget strekker seg fra høyfjell, med øverste magasin på rundt 890 moh, til utløp i Veafjorden.

De to største magasinene i Bergsdalsvassdraget er Hamlagrøvatnet (580 moh) og Torfinnsvatnet (890 moh). Det er fire kraftverk i vassdraget med en total midlere årsproduksjon på omtrent 1,2 TWh. Det største kraftverket er Dale kraftverk med en installert effekt på 150 MW.

3.5 Herlandsfossvassdraget

Herlandsfossvassdraget ligger på Osterøy, og inneholder to kraftverk og to reguleringsmagasin. Herlandsfoss er det største kraftverket med en installert effekt på 13 MW. Storavatnet (ca. 150 moh) er det største magasinet. Vassdraget får også tilsig fra Hesjedalsvassdraget ved overføringen fra Botnavatnet til Storavatnet. Total midlere årsproduksjon er ca. 65 GWh.

3.6 Eksingedal- og Teigdalsvassdraget

De øverste delene av Eksingedal- og Teigdalsvassdraget ligger på grensen mellom Hordaland og Sogn og Fjordane. De tre kraftverkene i systemet, Evanger, Oksebotn og Myster, ligger alle i Hordaland. Det er 7 regulerede magasiner i vassdraget som ligger mellom 700-1000 moh. Vassdraget har en midlere årsproduksjon på rundt 1,6 TWh. Det største kraftverket i reguleringen er Evanger kraftverk på 330 MW.

3.7 Fossmark, Trengereid, Ulvik 2 og Kløvtveit

BKK har også enkeltstående kraftverk utenfor de store vassdragene. Her er en beskrivelse av fire av kraftverkene som har inngått i denne analysen.

Fossmark kraftverk ligger sørøst for Bergsdalsvassdraget og utnytter fallet i Fossdalselvi. Det er tre magasiner i systemet; Gråsidvatnet, Holmavatnet og inntaksmagasinet Fossdalsvatnet. Fossmark kraftverk har en ytelse på 9 MW.

Ulvik II kraftverk er del av Tyssovassdraget og utnytter fallet fra Solsætvatnet til Ulvikafjorden. Ytelsen er på 20 MW.

Kløvtveit kraftverk ligger i Gulen kommune, hvor også det meste av nedslagsfeltet til kraftverket ligger. Det utnytter fallet fra Kløvtveitvatnet til Austgulfjorden og har en ytelse på 8,9 MW.

Trengereid kraftverk ligger i Skulstadelva og utnytter fallet fra Skulstadvatnet til Sørfjorden. Kraftverkets ytelse er på 3,5 MW.

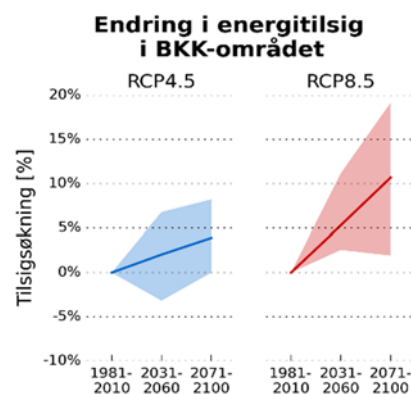
4 Klimaendringer vil gi endrede tilsigsforhold

Hydrologien i Hordaland er preget av bratte elver i små vassdrag som reagerer raskt på nedbørssvingninger. Endringer i tilsiget, som følge av høyere temperaturer og mer nedbør, er den viktigste forklaringsvariabelen på hvordan kraftproduksjonen til BKK vil bli påvirket av klimaendringer. Det er derfor viktig å forstå utviklingen i tilsiget for å forstå endringene i kraftproduksjon og magasindisponering.

4.1 Tilsiget øker mot midten og slutten av århundret

Tilsiget til BKK sine kraftverk øker i gjennomsnitt med henholdsvis 4 og 11 prosent i det moderate og høye utslippsscenarioet fra perioden 1981-2010 til 2071-2100.

Figur 2 viser hvordan sumtilsiget i et normalår utvikler seg frem mot slutten av århundret. Utfallsrommet spennes av de ulike klimamodellene, og er større i det høye enn i det moderate utslippsscenarioet.² Som figuren viser øker tilsiget i gjennomsnitt dobbelt så mye i det høye som i det moderate utslippsscenarioet.



Figur 2: Endring i energitilsig i BKK-området. Det skraverte området viser utfallsrommet mellom klimamodellene som er benyttet i analysen.

I det moderate utslippsscenarioet øker utfallsrommet mer mot midten enn mot slutten av århundret. Dette skyldes at én av framskrivningene gir en nedgang i tilsig mot midten av perioden. De resterende gir en tilsigsøkning fra i dag til midten av århundret. I det høye utslippsscenarioet øker tilsiget i alle de fem kombinasjonene av klimamodeller mot midten av århundret. Mot slutten er det én framskrivning som gir lavere tilsig mot slutten av århundret sammenlignet med midten av århundret. De fire andre framskrivningene øker fra i dag mot både midten og slutten av århundret. Alle framskrivninger anses som like sannsynlige. I gjennomsnitt er trenden dermed at tilsiget øker mot både midten og slutten av århundret i begge utslippsscenarioer.

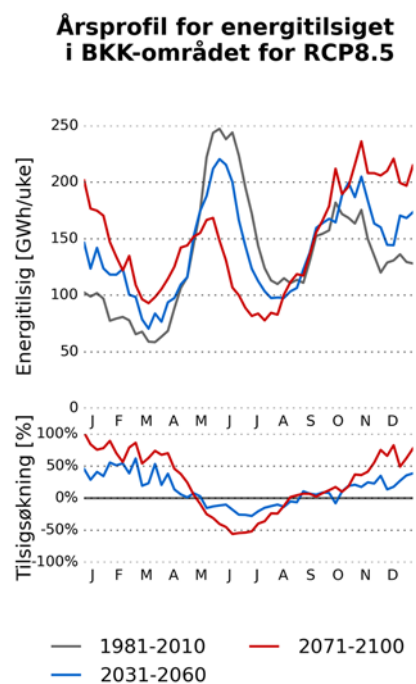
4.2 Tilsigstoppen flytter seg fra våren til høsten

Klimaendringer fører i hovedsak med seg to viktige endringer for tilsiget. For det første vil tilsiget til magasiner og kraftverk øke utover århundret som følge av mer nedbør. Samtidig vil tilsigsprofilen endre seg ettersom temperaturene blir høyere. Som følge av

² Nedbør og temperatur er det som benyttes fra resultatene fra klimamodellene, og via en hydrologisk modell beregnes tilsiget. Ettersom Vansimtap kun modellerer produksjonssystemet er det kun tilsiget som benyttes direkte inn i analysen. Endringer i temperatur har indirekte innvirkning på resultatene gjennom påvirkning på både tilsig og kraftpris. Les mer om dette i vedlegg 6.1.

økt temperatur vil nedbøren i større grad komme i form av regn i stedet for snø lenger utover høsten og tidligere på våren.

Figur 3 illustrerer hvordan tilsiget endrer seg i et normalår, over de ulike trettiårsperiodene, i det høye utslippsscenarioet. Tilsigsprofilen over året endrer seg markant fra i dag og frem mot slutten av århundret. Endringene går i samme retning, men er mindre markante i det moderate utslippsscenarioet. Vassdragene går fra å ha en tydelig tilsigstopp i forbindelse med snøsmeltingen på våren og tidlig sommer, til å få større deler av tilsiget utover høsten og vinteren mot slutten av århundret. I tillegg kommer tilsigstoppen på våren tidligere når temperaturene øker. Dermed vil det bli mindre snøsmelting om våren. Til gjengjeld vil høsttilsiget bli større enn tidligere. Jo større endringer i klimaet, jo tydeligere blir det at tilsigstoppen flyttes fra vår og sommer, til høsten og vinteren.



Figur 3: Tilsigsprofilen over året for sumtilsiget til BKK-området. Gjennomsnitt av de ulike klimamodellene.

Tilsiget øker mest seint på høsten og tidlig på året med opp mot en dobling i enkelte uker. Det vil derfor i økende grad komme tilsig til magasiner og kraftverk gjennom hele vinteren. Samtidig reduseres sommertilsiget i gjennomsnitt med opptil 50 prosent i midtsommerukene. Dette skyldes både mindre tilsig fra snøsmelting og økt fordampning ettersom temperaturene øker.³

4.3 Snøgrensa flytter seg oppover

En viktig konsekvens av at temperaturen øker, er at snøsesongen blir kortere og at snøgrensa flytter seg oppover. I dag er det store variasjoner i snødekke fra år til år, og det er store forskjeller mellom kystnære og høyereliggende strøk. I Sør-Norge er det snødekket areal i om lag 200 dager i året over ca. 800 moh. Hovedtrenden for Norge er at maksimal snømengde reduseres ettersom klimaet endrer seg. Nedgangen er størst i høyereliggende strøk på Vestlandet og i Nordland. Økte temperaturer fører til en senere start og tidligere avslutning på snøsesongen. I tillegg vil det føre til flere smelteperioder gjennom vinteren. Jo større temperaturøkning mot slutten av århundret, jo høyere vil snøgrensa ligge. Det vil fortsatt være år med snøfall både i høyere- og lavereliggende områder, men trenden er entydig.⁴

I gjennomsnitt vil en temperaturøkning på én grad celsius heve den gjennomsnittlige snøgrensa på Vestlandet med ca. 140 meter. Dette vil variere med for eksempel avstand

³ Modelleringen av fordampning er svært usikker, grunnet blant annet mangel på måledata å verifisere modellberegningene mot.

⁴ Les mer i kapittel 3.3.2 og 5.3.2 om snø i "Klima i Norge 2100".

til kyst, og det kan være store forskjeller mellom områder. En årlig økning i temperatur på opp mot fire grader i 2100 vil dermed kunne øke snøgrensa med i overkant av 500 meter. Dette vil gi store utslag for snømagasinene rundt BKK sine kraftverk.

4.4 Snømagasinet halveres mot slutten av århundret

Figur 4 viser hvordan det totale snømagasinet i området BKK har kraftverk utvikler seg fra i dag og frem mot slutten av århundret i det høye utslippsscenarioet. Som figuren viser vil snømagasinet i gjennomsnitt halveres. Snøen vil komme stadig senere på året, og smelte stadig tidligere ettersom temperaturene øker. Jo lavere nedbørfeltet til vassdragene ligger jo sterkere vil denne trenden være.

Figur 5 viser utviklingen i snømagasinet for Herlandsfossvassdraget og Bergsdalsvassdraget. Nedbørfeltet til

Herlandsfossvassdraget har en

gjennomsnittshøyde på ca. 300 moh⁵, mens

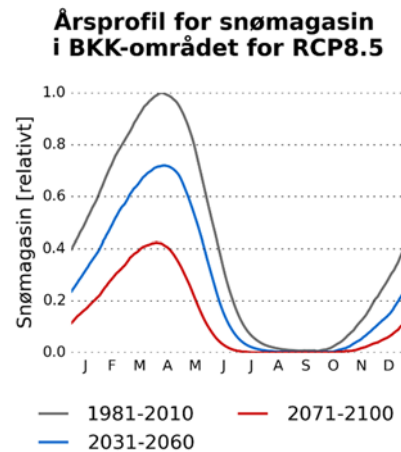
Bergsdalsvassdraget sitt felt har en

gjennomsnittshøyde på om lag 900 moh. Disse

vassdragene representerer vassdrag med hhv. lavtliggende og høytliggende nedbørfelt i områdene hvor BKK har kraftproduksjon.

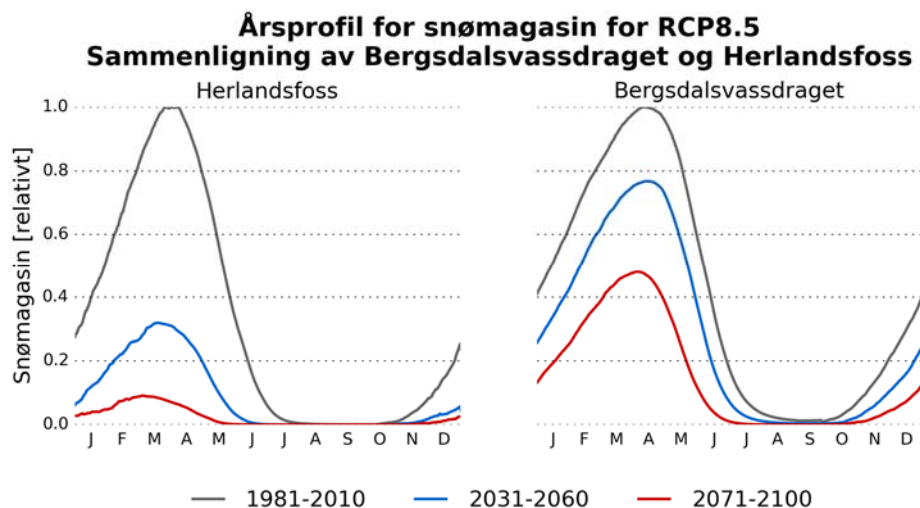
Som figuren illustrerer, vil snømagasinet til Herlandsfoss reduseres kraftig, og mer eller mindre forsvinne mot slutten av århundret. Det vil fortsatt være variasjoner fra år til år, men trenden er entydig, og konsistent med at nedbørfeltet ligger nokså lavt og nært kysten. Bergsdalsvassdraget vil også oppleve en kraftig reduksjon i snømagasinet, men siden nedbørfeltet ligger såpass høyt, vil det fortsatt være et snømagasin å spille på om vinteren.

Denne utviklingen har viktige konsekvenser for tilsigsprofilen over året. Som vist i Figur 3 vil tilsiget følge nedbøren når den i stadig større grad faller som regn gjennom vinteren, og ikke som snø. Dette bidrar til tidligere og mindre snøsmelting om våren, men ettersom man mister en måte å lagre energi på når snømagasinene forsvinner, vil høst- og vintertilsgiet øke i omfang. Det vil derfor gå fra å være et system som får tilsigstoppen om våren til et som får den i høst- og vintersesongen.



Figur 4: Snømagasinet i BKK-området reduseres kraftig fra i dag og frem mot slutten av århundret.

⁵ Nedbørfeltene er referert tilsigsserien som har størst andel av tilsiget i de ulike vassdragsmodellene. Se vedlegg 6.1.3 for mer informasjon.

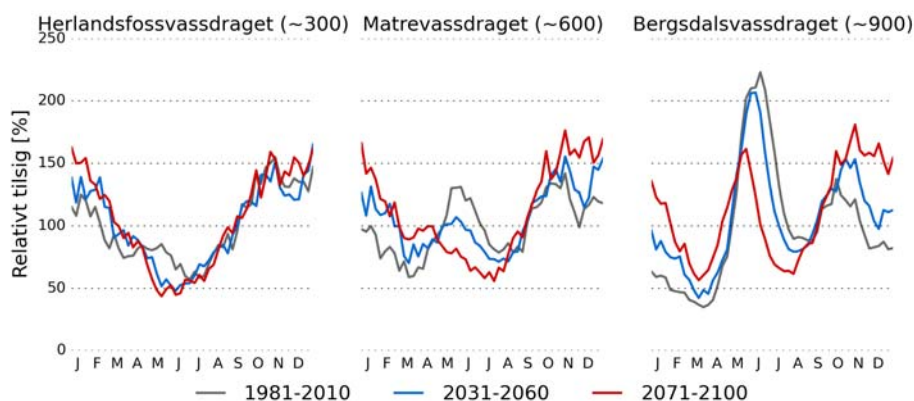


Figur 5: Herlandsfossvassdraget og Bergsdalsvassdraget er brukt som eksempel på vassdrag med hovedvekt av hhv. lavtliggende og høytliggende nedbørfelt. Snømagasinet forsvinner omtrent i Herlandsfossvassdraget mot slutten av århundret. Det vil fortsatt være snø i Bergsdalsvassdraget, men snømagasinet vil halveres fra i dag og mot slutten av århundret.

Vassdrag som ligger lavt har allerede i dag en nokså flat tilsigsprofil over året, med et relativt lite snømagasin. Vassdragene Matre og Herlandsfoss er eksempler på dette, som er illustrert i Figur 6. Nedbørfeltet til Herlandsfossvassdraget har en middelhøyde på om lag 300 moh. og Matrevassdraget på rundt 600 moh. Ettersom temperaturene øker vil snømagasinet i stadig større grad forsvinne. Tilsiget vil øke i høst- og vintermånedene og reduseres på sommeren.

Bergsdalsvassdragets tilsigsprofil er avbildet til høyre i Figur 6. Her er tilsigsprofilen tydelig påvirket av snø i dag. Økte temperaturer vil også her føre til at tilsigsprofilen vil flate ut, selv om tilsiget vil fortsette å være påvirket av snøfall og snøsmelting.

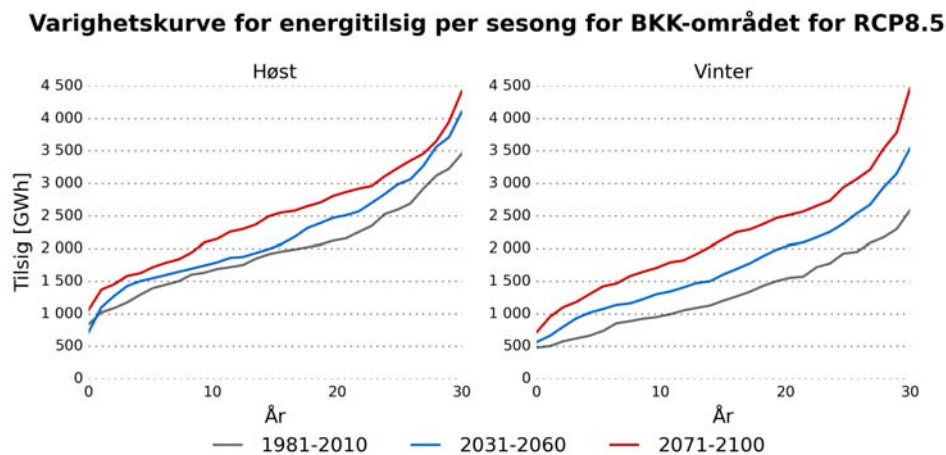
Årsprofil for tilsiget for utvalgte vassdrag i BKK-området for RCP8.5



Figur 6: Tilsiget til forskjellige vassdrag vil bli påvirket ulikt, blant annet avhengig av hvor høyt nedbørfeltene ligger. Figuren viser tre vassdrag med nedbørfelt i forskjellige høyder og hvordan tilsiget utvikler seg fra i dag og frem mot slutten av århundret.

4.5 Høst og vinter blir våtere

Mot slutten av århundret vil tilsigstoppen flytte seg fra perioden rundt vårflommen, til høst- og vintersesongen. Høsten og vinteren blir markant våtere fra i dag og frem mot år 2100. Ettersom temperaturene øker vil det forekomme typiske «høstsituasjoner», med mye tilsig og store flomtap, også i januar og februar. Dette finner vi ikke i dataene for 1981-2010.



Figur 7: Varighetskurve (årsverdier sortert etter størrelse) av energitilsiget i høst- og vintersesongen (13 uker hver) per år for det høye utslippsscenariet. Kurvene er et gjennomsnitt av varighetskurven for hver klimaframskrivning.

Figur 7 viser varighetskurver på tilsig for høst og vinter. Varighetskurvene viser tilsiget rangert fra lavest til høyest for hvert år innenfor de tre trettiårsperiodene i analysen, for henholdsvis høst- og vintersesongen. Høst er i denne analysen ukene 35-48, og vinter går fra uke 49-9. Som figuren illustrerer blir både høsten og vinteren våtere i 2071-2100, sammenlignet med i dag.

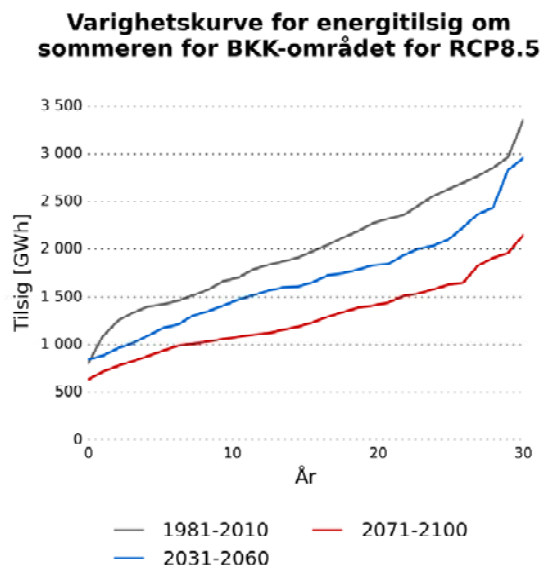
Økt tilsig i høst- og vintersesongen skyldes flere faktorer. Klimaendringene vil føre med seg økte nedbørsmengder mot slutten av århundret. Videre vil høyere temperaturer medføre at nedbøren som i dag faller som snø i stadig større grad kommer som regn. Det vil da komme direkte som tilsig til kraftverk og magasiner gjennom høsten og vinteren. Dette er tilsig som i dag kommer i forbindelse med snøsmeltingen om våren og tidlig sommer. Økt høst- og vintertilsig kan derfor delvis forklares av en forflytning mellom sesonger, og delvis av økte nedbørmengder.

Forskjellen mellom de tørreste og våteste vintrene blir større jo lengre ut i århundret man kommer. I den våte enden av varighetskurvene øker også forskjellen betydelig fra i dag til slutten av århundret. Det er spesielt interessant at vintrene med mest tilsig får nær en doubling av vintertilsiget i perioden 2071-2100, sammenliknet med 1981-2010. I perioden 1981-2010 viser datagrunnlaget at den våteste vinteren har et tilsig på 2,5 TWh. I siste del av århundret øker dette til 4,5 TWh. Det er en økning også i høstsesongen, men ikke like markant.

4.6 Sommeren blir tørrere

Samtidig som høsten og vinteren blir våtere utover århundret, vil sommeren i gjennomsnitt bli tørrere. En årsak til dette er nettopp at snøsmeltingen kommer tidligere og forflytter store mengder tilsig fra tidlig på sommeren til vinter og vår. Høyere temperaturer vil også bidra til økt fordampning i sommerhalvåret.

Figur 8 viser sommertilsiget sortert fra lavest til høyest for de tre trettiårsperiodene i det høye utslippsscenarioet. Som varighetskurvene viser, blir de tørreste somrene noe tørrere mot slutten av århundret. De våteste somrene blir vesentlig tørrere i siste periode av århundret, sammenlignet med i dag. Den våteste sommeren i datagrunnlaget for perioden 1981-2010 ligger på opp mot 3,5 TWh tilsig i løpet av ukene 23 til 35. I perioden 2071-2100 får den våteste sommeren i overkant av 2 TWh tilsig.

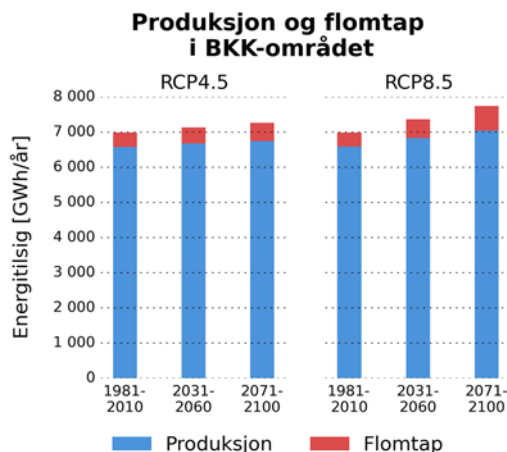


Figur 8: Varighetskurve (årsverdier sortert etter størrelse) av energitilsiget i sommersesongen (13 uker) per år for det høye utslippsscenarioet. Kurvene er et gjennomsnitt av varighetskurven for hver klimafremskrivning.

5 Klimaendringer gir økt kraftproduksjon og økte flomtap

Klimaendringer medfører økt produksjon mot slutten av århundret i vassdragene som BKK regulerer.

Når tilsigsgrunnlaget endres, både med hensyn til mengde og profil over året, vil håndteringen av produksjonssystemet forandre seg. I BKK sitt system, som er plassert i forskjellige vassdrag i et geografisk begrenset område, er det forskjeller fra vassdrag til vassdrag på hvordan kraftverkene og magasinene utnyttes i fremtidens klima. Det er viktig å påpeke at produksjonssystemet tilsvarer dagens system. Eventuelle begrensninger og flaskehalser i systemet kan derfor



Figur 9: Kraftproduksjon og flomtap i BKK sitt produksjonssystem for de to utslippsscenarioene. Summen av de blå og de røde delene av søylene gir totalt årlig tilsig i gjennomsnitt for de tre periodene.

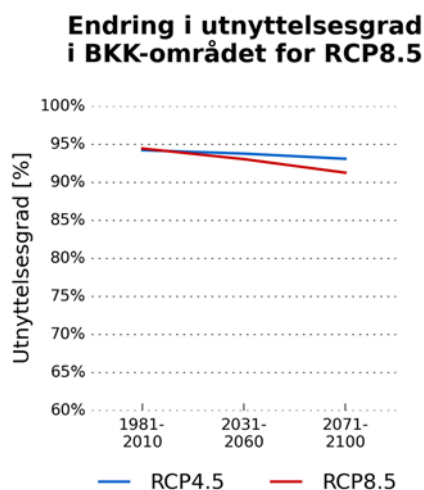
skyldes at kraftverkene er dimensjonert på bakgrunn av historisk tilsig, og ikke på det klimaet systemet vil møte i fremtiden.

Hovedtrenden er at produksjonen i BKK sitt system øker etter hvert som tilsiget øker, men at produksjonsapparatet ikke klarer å nyttiggjøre seg av alt det økte tilsiget. Derfor øker også flomtapene. Figur 9 viser volumet av samlet kraftproduksjon og flomtap for vassdrag som BKK regulerer. Figuren viser gjennomsnittet over de tre trettiårsperiodene av de fem klimamodellene, for hvert utslippsscenario. Summen av produksjon og flomtap gir totalt årlig tilsig i de tre periodene. Produksjonen øker i gjennomsnitt med 3 prosent i det moderate utslippsscenarioet og 7 prosent i det høye utslippsscenarioet.

5.1 Utnyttelsesgraden synker utover århundret

Med utgangspunkt i dagens produksjonssystem vil den samlede utnyttelsesgraden i vassdragene synke utover århundret. Utnyttelsesgraden er andelen av det tilgjengelige tilsiget som utnyttes til kraftproduksjon. For produksjonssystemet til BKK øker både kraftproduksjon og flomtap på grunn av økt tilsig. Utnyttelsesgraden synker fordi flomtapene øker mer enn produksjonen.

Som Figur 10 illustrerer, reduseres den samlede utnyttelsesgraden for vassdraget fra ca. 94 til 91 prosent fra i dag og frem mot slutten av århundret i det høye utslippsscenarioet. Hvordan tilsiget fordeler seg over året er en viktig forklaringsfaktor på hvorfor utnyttelsesgraden synker, selv om produksjonen øker. I perioder vil tilsiget øke betraktelig og føre til en større økning i flomtapene enn i produksjonen. Dette gjelder spesielt for høsten og vinteren.



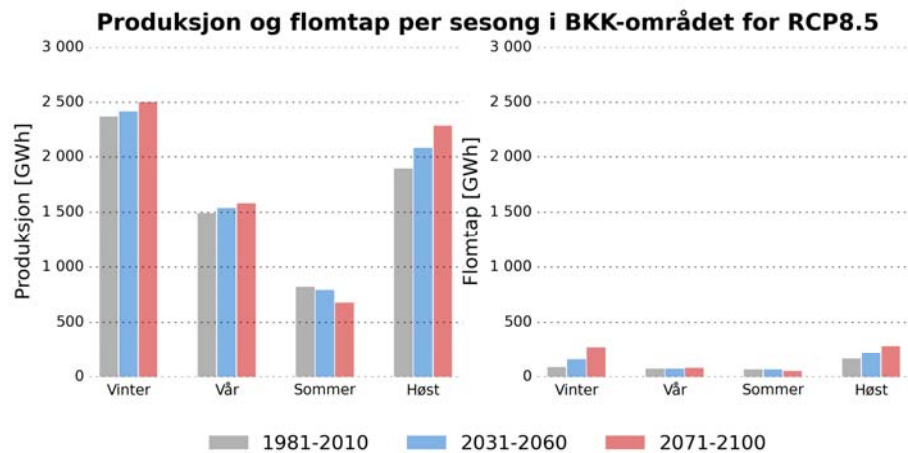
Figur 10: Den samlede utnyttelsesgraden i vassdragene BKK regulerer synker utover århundret.

5.2 Høst- og vinterproduksjonen øker

I perioder med høyt tilsig er det også høy produksjon fra kraftverkene i BKK sitt produksjonssystem. Når nedbøren i økende grad faller som regn, vil kraftproduksjonen i større grad følge nedbøren. Dette gjelder spesielt for de uregulerte kraftverkene, som ikke har muligheten til å lagre energien til perioder med mindre tilsig. Figur 11 viser hvordan fordelingen av kraftproduksjonen og flomtapet for hele BKKs samlede produksjonsapparat endrer seg mellom sesongene ettersom været blir mildere og våtere.

Produksjonen øker mest om høsten, mens den går ned i sommermånedene. Dette tilsvarer endringene vi ser i tilsiget. Tilsiget kan i stor grad lagres i magasinene og utnyttes når behovet for strøm er størst og kapasiteten i produksjonssystemet er tilgjengelig. Siden den største tilsigssøkningen kommer i høst- og vinterhalvåret, vil det bli høyere produksjon i

de kaldeste periodene med høyest etterspørsel. Magasinene og den utbygde produksjonskapasiteten er i perioder likevel ikke tilstrekkelig til å håndtere tilsigsmengden som kommer, noe som fører til økte flomtap i disse periodene.

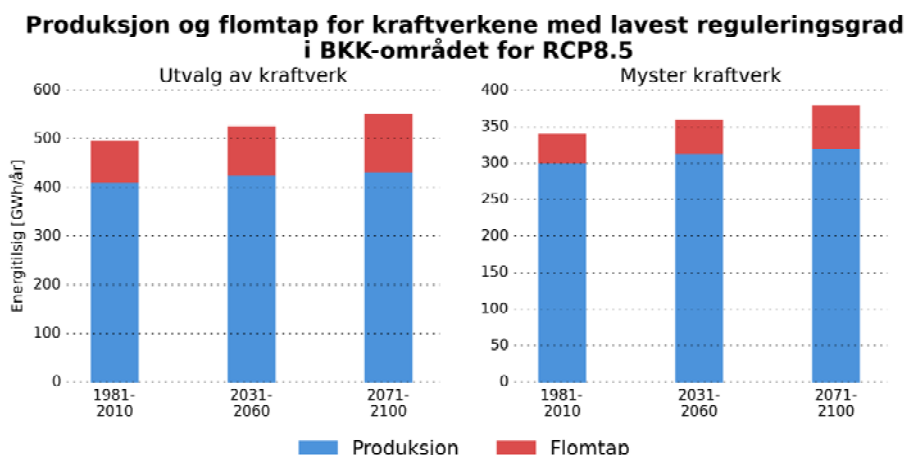


Figur 11: Produksjonen (til venstre) i BKK sine kraftverk øker på vinter, vår og høst, men reduseres om sommeren. Flomtapene (til høyre) følger samme mønster.

Flomtapene øker i omfang utover århundret, slik Figur 11 viser. Som nevnt i kapittel 4.5 blir også forskjellen mellom år større. Flomtapene øker i snitt fra rundt 400 GWh i perioden 1981-2010 til rundt 700 GWh i perioden 2071-2100 i det høye utslippsscenarioet. Det er noen enkeltår i perioden 1981-2010 der flomtapene beveger seg opp mot 900 GWh. Mot slutten av århundret vil det være enkelte år som byr på spesielt store utfordringer der flomtapene kommer over 2 TWh.

5.3 Lav reguleringsgrad gir større flomtap

Dette avsnittet fokuserer på kraftverkene med lavest reguleringsgrad⁶. Disse kraftverkene er i hovedsak uregulerte kraftverk uten magasiner. Som Figur 12 viser, øker kraftproduksjonen noe fra i dag og frem mot slutten av århundret. Flomtapene øker imidlertid mer enn produksjonen. Utnyttelsesgraden i kraftverkene med lavest reguleringsgrad synker dermed ettersom klimaet endrer seg. Siden disse kraftverkene må produsere når det er vann i elvene, følger kraftproduksjonen i stor grad tilsigsprofilen.



Figur 12: Grafen til venstre viser utviklingen i kraftproduksjon og flomtap fra i dag til mot slutten av århundret for en gruppe kraftverk med lav reguleringsgrad, i vassdragene hvor BKK har sin kraftproduksjon. Grafen til høyre viser utviklingen i Myster kraftverk for den samme perioden. Summen av de blå og de røde delene av søylene gir totalt årlig tilsig i gjennomsnitt for de tre periodene.

Ettersom tilsiget mot slutten av århundret ventes å bli lavere i sommerhalvåret, vil også produksjonen fra de mindre regulererte kraftverkene reduseres i denne perioden. Produksjonen flyttes fra vår og tidlig sommer, til høsten og vinteren. Summen av produksjon over året endres imidlertid ikke nevneverdig. Størsteparten av dem har allerede i dag en relativt høy brukstid og en vinterandel på over 50 prosent. Kraftverkene klarer likevel bare å utnytte deler av det økte tilsiget utover perioden, og mesteparten går til flomtap. Andelen vinterproduksjon vil øke med rundt 10 prosentpoeng fra i dag til slutten av århundret for samtlige av kraftverkene i utvalget.

Et eksempel på et kraftverk med lav reguleringsgrad er Myster. Kraftverket utnytter nedre del av Eksingedalsvassdraget og henter vann fra Nesevatnet og elva Leiro. Tilsiget til Myster kraftverk er vist til høyre i Figur 12. Tilsiget følger hovedtrenden for alle vassdragene, med lavere vårflom og høyere tilsig på høst og vinter.

I det høye utslippsscenarioet øker tilsiget til Myster kraftverk med 11 prosent. Økningen i tilsiget gir en produksjonsøkning på 6,5 prosent. Det er hovedsakelig økt produksjon vinterstid som er årsaken til dette. Vinterandelen øker fra 57 til 69 prosent, mens

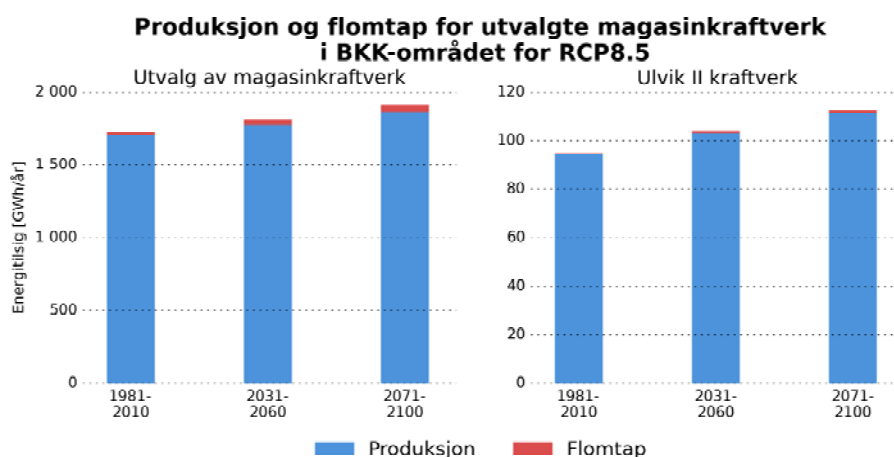
⁶ Vi har sett på følgende fem kraftverk med lavest reguleringsgrad i de aktuelle vassdragene som er studert: Myster, Hommelfoss, Fossmark, Trengereid og Tyssefossen.

produksjonen synker i sommerhalvåret. Ettersom Myster er et kraftverk med lav reguleringsgrad, vil mye av tilsiget vinterstid gå til flomtap. Det kommer mer vann til kraftverket enn det klarer å utnytte til produksjon, og utnyttelsesgraden reduseres fra 88 til 84 prosent.

Siden modellen kjøres med ukesoppløsning blir dette i praksis som å ha et dempningsbasseng på en uke. Dersom modellen hadde hatt døgnoppløsning ville flomtapene mest sannsynlig vært enda høyere, både i dag og mot slutten av århundret.

5.4 Magasinkraftverkene er godt rustet til å håndtere økt tilsig

Magasinkraftverkene med høy reguleringsgrad er godt rustet til å håndtere det økte tilsiget. Figur 13 viser kraftproduksjon og flomtap for et utvalg av BKK sine godt regulerte kraftverk, med en reguleringsgrad over 0,5⁷. I magasinkraftverkene vil det økte tilsiget fanges opp i magasinene og i stor grad utnyttes til kraftproduksjon. Flomtapene blir derfor begrenset selv om de øker noe utover århundret.



Figur 13: Grafen til venstre viser kraftproduksjon og flomtap i de tre trettiårsperiodene for et utvalg magasinkraftverk i BKK sin portefølje i det høye utslippsscenarioet. Grafen til høyre viser de samme størrelsene for Ulvik II kraftverk. Summen av de blå og de røde delene av søylene gir totalt årlig tilsig i gjennomsnitt for de tre periodene.

Ulvik kraftverk er et magasinkraftverk som utnytter et fall på 387 meter fra Solsævatnet til Ulvikafjorden. Kraftverket har en global reguleringsgrad⁸ på 53 prosent. Grafen til høyre i Figur 13 viser kraftproduksjon og flomtap til kraftverket i de tre trettiårsperiodene for det høye utslippsscenarioet. Midlere årstilsig til Ulvik øker med 19 prosent fra i dag og frem mot slutten av århundret. Tilsiget følger hovedtrenden for de utvalgte

⁷ Det er totalt 5 kraftverk i utvalget. Nygard pumpekraftverk og kraftverk med mulighet til å produsere vann fra to ulike inntaksmagasin, er ekskludert av praktiske årsaker. Utvalget inkluderer kraftverkene Hodnaberg, Stordal, Kaldestad, Evanger og Ulvik

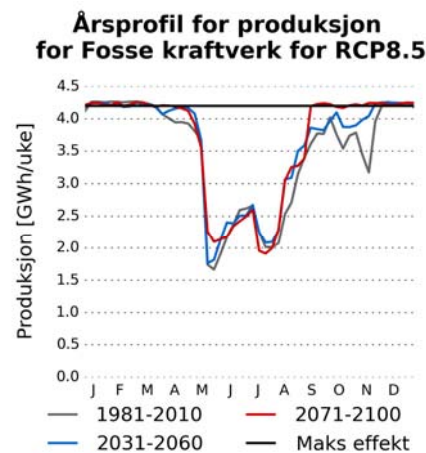
⁸ Global reguleringsgrad er summen av oppstrøms magasinivolum, inkludert eget magasin, delt på summen av midlere årstilsig oppstrøms kraftverket (Magasinivolum/Tilsig).

vassdragene, men har mindre vårflom og høyere tilsig på høst og vinter enn gjennomsnittet for BKK-området. Selv om tilsiget til kraftverket kommer fra et høytliggende felt vil vårflommen komme tidligere på året og bli mindre i omfang ettersom temperaturen øker.

Kraftproduksjonen i Ulvik kraftverk vil øke når tilsiget øker. Produksjonen øker med 18 prosent mot slutten av århundret, sammenlignet med perioden 1981-2010. Kraftverket er godt regulert, og har lite flomtap i utgangspunktet. Mot slutten av århundret øker flomtapene noe, og utnyttelsesgraden reduseres med 0,6 prosentpoeng.

I noen tilfeller vil ikke magasinkraftverkene klare å utnytte det økte tilsiget. Det kan være andre forhold i vassdraget som bidrar til dette. Det kan skyldes fysiske begrensninger i kraftverk, eller for eksempel restriksjoner i konsesjonsvilkår og manøvreringsreglement.

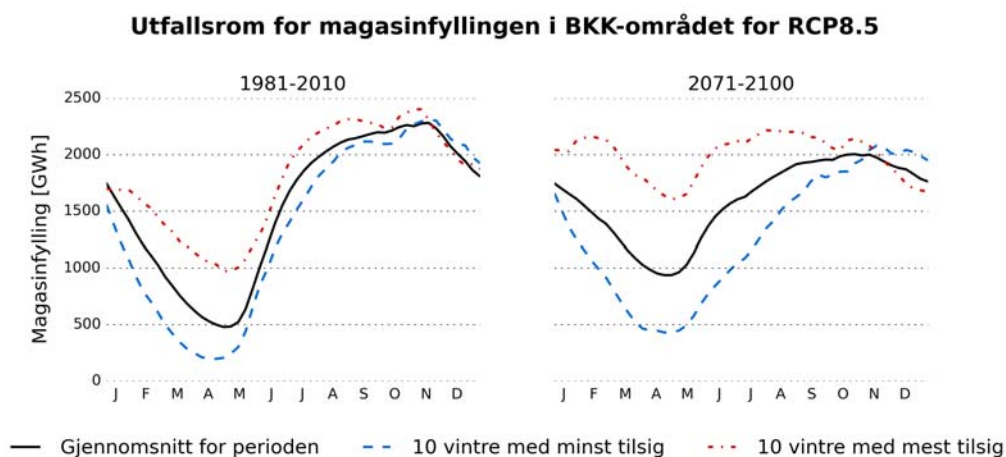
Et eksempel på dette er Fosse kraftverk i Bergsdalsvassdraget. Dette kraftverket har lavere slukeevne enn kraftverkene som ligger ovenfor og nedenfor i vannstrengen, og blir derfor en flaskehals i perioder med høyt tilsig. I tillegg blir første del av sommeren preget av en magasinrestriksjon i et høyereliggende magasin i vassdraget. Etter hvert som klimaendringene fører med seg høyere tilsig på høsten, vil dette kraftverket i økende grad kjøres på maksimal effekt, samtidig som mer vann må slippes forbi. Årsprofilen for kraftproduksjonen i Fosse kraftverk for de tre trettiårsperiodene er vist i Figur 14.



Figur 14: Fosse kraftverk blir i økende grad en flaskehals i Bergsdalsvassdraget etter hvert som klimaet endrer seg.

5.5 Det blir mer utfordrende å planlegge produksjonen

Magasindisponeringen er avhengig av tilsiget i de ulike årstidene. Om vinteren er det stort behov for strøm samtidig som det er lavt tilsig, dette gjør at magasinene tappes ned. Når våren kommer, fylles magasinene med vannet som har blitt lagret i snøen. Gjennom sommeren og høsten fyller magasinene seg opp igjen, inntil de tappes ned neste vinter.



Figur 15: Utfallsrommet for magasinfyllingen øker mot slutten av århundret, sammenlignet med perioden 1981-2010. Figuren viser gjennomsnittlig magasinifylling, og magasinifyllingen i de ti vintrene med lavest og høyest tilsig i det høye utslippsscenarioet.

Figur 15 illustrerer hvordan magasindisponeringen endrer seg fra i dag og frem mot slutten av århundret. Magasinene vil i gjennomsnitt tappes mindre ned om våren og ligge lavere gjennom høsten i siste del av århundret. Behovet for å fylle magasinene helt opp om høsten reduseres når nedbøren i stadig større grad vil falle som regn gjennom vinteren. Tilgangen på vannressurser gjennom vinteren blir dermed større når temperaturene øker. Samtidig vil dette føre til at snømagasinet i gjennomsnitt blir mindre, noe som vil redusere behovet for å tappe ned magasinene om våren, for å gjøre plass til snøsmeltingen.

I tillegg vil utfallsrommet i magasindisponeringen mellom år øke mot slutten av århundret, som avstanden mellom de stiplede røde og blå linjene i figuren over viser. Det er lite tilsig gjennom vinteren når den er nedbørsfattig eller kald. Det vil fortsatt være år med kalde vintre i fremtiden, noe som vil gi lite tilsig til magasinene. Magasinene får dermed en viktig rolle fordi de muliggjør produksjon i perioder med høy etterspørsel, men lavt tilsig. I de våteste vintrene forsterkes trenden med mindre nedtapping av magasinene på våren, siden tilsiget er høyt gjennom vinteren, og snøsmeltingen er mindre i omfang.

Denne store forskjellen fra år til år kan gjøre det mer utfordrende for kraftverkseierne å planlegge produksjonen. Imidlertid kan usikkerheten rundt disponeringen bli mindre dersom man får gode sesongvarsler, og med større sikkerhet kan forberede seg på om det

blir en vinter med mye eller lite tilsig. Det kan dermed bli et nyttig verktøy for å gjøre vurderinger av hvor mye magasiner må tappes ned for å ta vare på tilsiget som kommer gjennom vinteren.

6 Vedlegg

I denne delen er forutsetninger for modellkjøringene i Vansimtap beskrevet i større detalj.

I tillegg er det gjort en sammenligning av observert tilsig og klimamodellert tilsig for perioden 1981-2010 i kapittel 6.2.

6.1 Forutsetninger

Forutsetninger som må legges inn i Vansimtap før modellkjøringene gjøres er:

- Produksjonssystemet
- Prisrekker for prisområdet NO5
- Tilsigs- og temperaturserier

Inngangsdataene vil til sammen gi resultatene av analysen. Det er viktig å forstå hva man legger inn i modellen for å forstå resultatene som kommer ut av modellkjøringene. Av inngangsdataene er det kun klimaet som endrer seg fra periode til periode. Dette endrer seg imidlertid både direkte, gjennom endring i tilsig, men også indirekte, gjennom prisrekkene som kraftverkene i vestlandsområdet handler mot. Dette er nærmere beskrevet i fortsettelsen.

6.1.1 Produksjonssystemet

NVE sin modell av vassdragene med kraftverk og magasiner blir brukt for å simulere produksjonssystemet. I analysen har vi tatt utgangspunkt i dagens produksjonssystem. I sammenheng med dette prosjektet har vi samlet inn data fra BKK og revidert datagrunnlaget. Det kan være forskjeller mellom det regulanten anser som maksimal ytelse og det som er benyttet i NVE sin modell. Maksimal ytelse i modellen vil variere avhengig av blant annet fallhøyde og vann forbi elvekraftverk.

Kraftverk med en maksimal ytelse på over 10 MW, og mindre kraftverk som produserer på regulert vann, er tatt med i modellen. I noen tilfeller er det også modellert mindre uregulerte kraftverk dersom disse var lagt inn i modellen fra før av. Restriksjoner, som for eksempel minstevannføring og minstefylling av magasiner om sommeren, har i stor grad blitt lagt inn. For mange av restriksjonene har det blitt gjort forenklinger siden det ikke er mulig å gjenspeile manøvreringsreglementet nøyaktig i modellen. Fokus har vært på at restriksjonens hovedformål oppfylles (for eksempel friluftsf- og fiskeinteresser) og at magasinene disponeres med samme mønster som historiske målinger.

Vansimtap kan kjøres på to måter: parallellsimulering og seriesimulering. I denne analysen har vi benyttet seriesimulering. I seriesimuleringer brukes magasinutfyllingen i siste uke i tilsigsscenario "t-1" som inngangsmagasin til første uke i scenario "t". Dette gjør at denne metoden er mer egnet for analyser der den innledende magasinutfyllingen er ukjent. Da har startpunktet i første tilsigsscenario minimalt av betydning på de resultatene som genereres over hele trettiårsperioden. Vansimtap er en modell der en stort sett benytter seg av simuleringer på ukensnivå.

6.1.2 Tilsig- og temperaturserier

De hydrologiske framskrivningene benytter seg av framskrivninger av nedbør og temperatur fra regionale klimamodeller. Disse benytter seg av forskjellige globale klimamodeller som rammebetingelser når de simulerer klimaet for en region. I «Klima i Norge 2100» (Hanssen-Bauer m fl., 2015) er det brukt resultater fra ti forskjellige kombinasjoner av globale og regionale klimamodeller. Alle kombinasjonene er kjørt i både et høyutslippssenario (RCP8.5) og et utslippsscenario som ligger nær togradersmålet (RCP4.5).⁹ Totalt finnes det altså 20 ulike sett med framskrivninger av nedbør og temperatur, som vist i Tabell 2.

Tabell 2: Oversikt over kombinasjonene av globale og regionale klimamodeller som ligger til grunn for framskrivningene av temperaturer og tilsig. Alle kombinasjonene er kjørt i både et høyutslippsscenario (RCP8.5) og et utslippsscenario som ligger nær togradersmålet (RCP4.5). Analysen om BKKs kraftproduksjon tar utgangspunkt i de fem kombinasjonene som begynner i 1961.

Global klimamodell	Regional klimamodell	Tidsperiode (tilsigsserier)	Institusjon
CNRM	CCLM	1961-2100	Climate Limited-area Modelling Community
CNRM	RCA	1971-2100	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
EC-EARTH	CCLM	1961-2100	Climate Limited-area Modelling Community
EC-EARTH	HIRHAM	1961-2100	Danish Meteorological Institute
EC-EARTH	RACMO	1961-2100	Royal Netherlands Meteorological Institute
EC-EARTH	RCA	1971-2100	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
HADGEM	RCA	1971-2100	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
IPSL	RCA	1971-2100	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
MPI	CCLM	1961-2100	Climate Limited-area Modelling Community
MPI	RCA	1971-2100	Swedish Meteorological and Hydrological Institute

Temperatur- og tilsigsseriene er deretter benyttet som inngangsdata til den hydrologiske modellen som simulerer tilsig som kan benyttes som inngangsdata i Vansimtap. I denne analysen brukes framskrivningene som starter i 1961 i Tabell 2. Det benyttes altså kun

⁹ RCP står for Representative Concentration Path. For mer informasjon om utslippsscenarioene og klimaframskrivningene se “Klima i Norge 2100” (Hanssen-Bauer et al. 2015)

resultater fra 5 av de 10 kombinasjonene av regionale og globale klimamodeller. Disse 5 kombinasjonene er kjørt med begge utslippsscenarioer, slik at det totalt blir 10 sett med tilsigsserier.

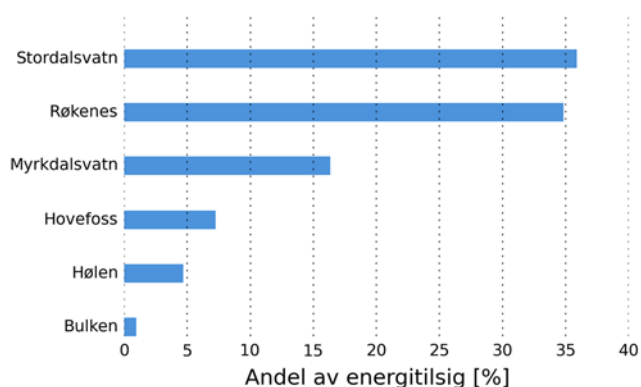
6.1.3 Tilsigsserier i Vansimtap

NVE bruker 82 tilsigsserier for å modellere tilsiget i Samkjøringsmodellen og Vansimtap. Hvilken tilsigsserie som benyttes for ulike moduler i modellen avhenger av hvilken serie som best gjenspeiler de faktiske egenskapene til nedbørsfeltet til kraftverket/magasinet. viser de geografiske egenskapene til tilsigsseriene som er brukt som grunnlag for de hydrologiske modellene i denne analysen. Figur 17 viser hvor nedbørsfeltene til tilsigsseriene ligger. Tabell 4 og Figur 16 viser andelen av tilsiget for de ulike tilsigsseriene som brukes i modellen og i de ulike vassdragene.

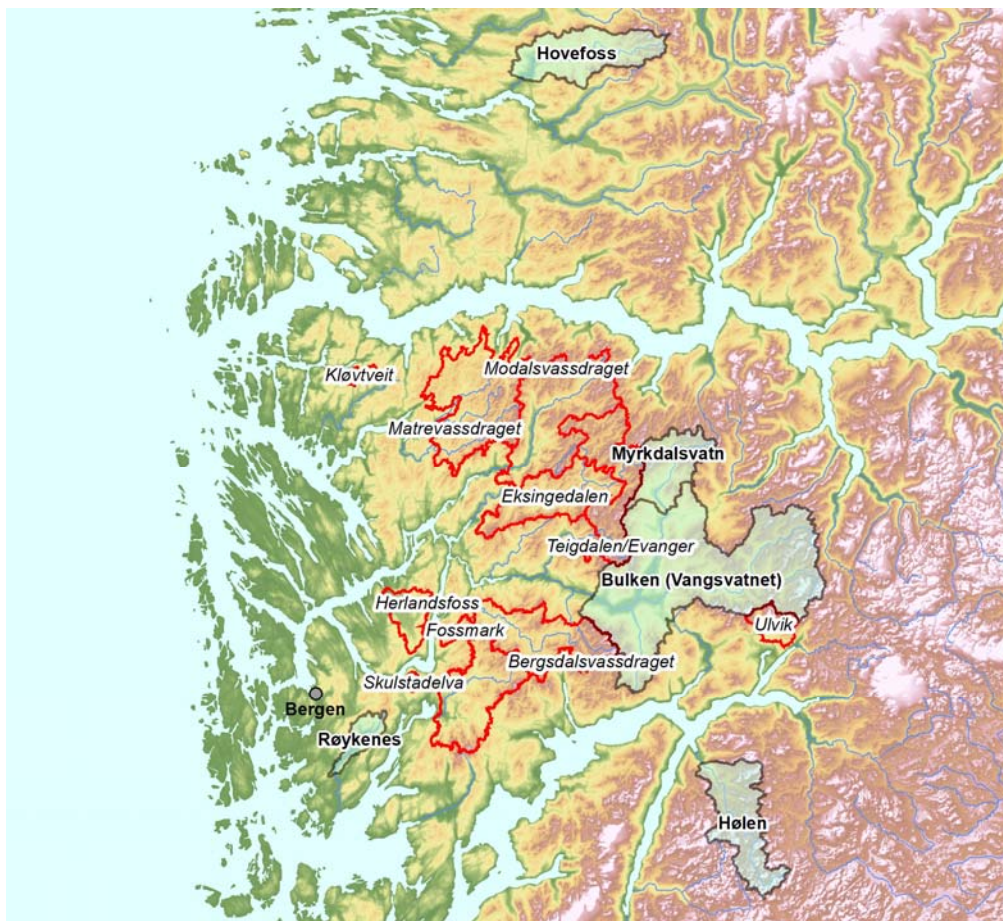
Tabell 3: Tabellen gir en oversikt over nøkkelinformasjon for de ulike tilsigsseriene som er benyttet i modelleringen av de ulike vassdragene.

Tilsigsserie	Areal (km ²)	Minimums-høyde	Middel-høyde	Maksimums-høyde	Breprosent	Sjøprosent	Avrenning, ref. 61-90 (l/s km ²)
Stordalsvatn	130,6	51	681	1294	0,00	10,6	102,7
Hølen	232,7	120	1275	1686	0,34	8,33	53,2
Bulken	1092,0	47	867	1602	0,39	3,54	64,6
Røykenes	50,1	53	307	960	0,00	3,9	100,7
Myrkdalsvatn	158,3	229	975	1431	0,00	3,68	76,3
Hovefoss	234,1	20	627	1469	0,03	4,52	88,6

Fordeling av energitilsig mellom tilsigsseriene brukt i modelleringen av BKK-området



Figur 16: Andelen av tilsiget de ulike tilsigsseriene representerer i modellen. Hovefoss er brukt for å representere profilen for 7 prosent av tilsiget i modellen, mens Stordalsvatn er benyttet for 36 prosent av tilsiget.



Figur 17: Kart som viser hvor nedbørfeltene til de ulike tilsigsseriene er geografisk plassert

Tabell 4: Følgende tilsigsserier er brukt i modelleringen av de ulike vassdragene. Vektingen viser hvor stor andel av tilsiget som er modellert etter hvilken serie, for hvert vassdrag.

Vassdragsnavn	Bulken	Hølen	Hovefoss	Myrkdals- vatn	Røykenes	Stordals- vatn
Samnangervassdraget	74 %					26 %
Modalsvassdraget			4 %	96 %		
Matre- og Haugsdalsvassdraget			99 %			1 %
Bergsdalsvassdraget	58 %	31 %				11 %
Herlandsfossvassdraget					100 %	
Eksingedals- og Teigdalsvassdraget			20 %	80 %		

6.1.4 Antagelser om kraftpris

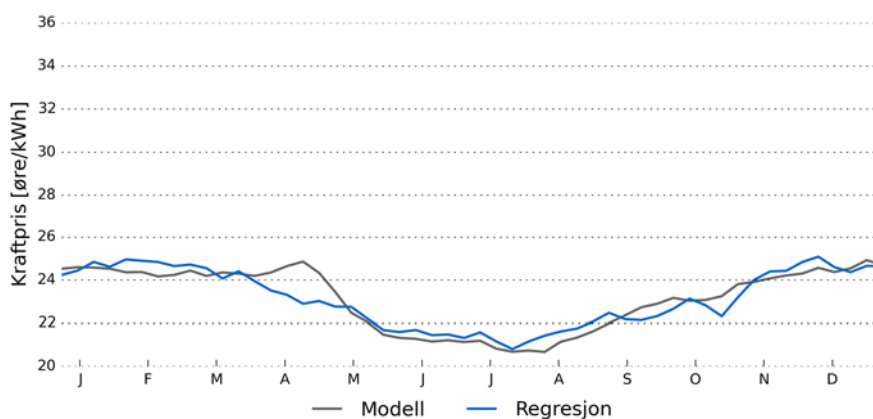
Kraftprisen er ikke det vi ønsker å fokusere på i en klimaanalyse. Vi ser langt frem i tid – helt fram til 2100. Mot slutten av analyseperioden er det vanskelig å se for seg at produksjonssystem, forbruksmønster og kraftmarkedsdesign vil være tilsvarende det vi har i dag.

Prisrekker er allikevel nødvendig inngangsdata for å kjøre Vansimtap, og er derfor viktig for analysen. Det vi ønsker å analysere er hva som skjer når tilsig og temperatur endrer seg. I motsetning til i Samkjøringsmodellen, der prisene er en endogen variabel, er prisene en eksogen variabel i Vansimtap, og må derfor legges inn som en av forutsetningene til modellen.

Nivået på nordiske kraftpriser er svært avhengig av kostnadsnivået på termisk kraftproduksjon og landene Norden utveksler kraft med. Prisstrukturen innad i døgnet og uka, og mellom sesonger, er mer avhengig av hydrologiske forhold. Vi ønsker å benytte prisrekker der endret klima er tatt høyde for, alt annet likt. Dette er gjort ved å benytte seg av modellerte nordiske kraftpriser for perioden 1981-2010, og justere denne for periodene 2031-2060 og 2071-2100 ved hjelp av statistisk regresjon.

Kraftprisen for Vestlandet antas i regresjonsmodellen å være et resultat av variasjoner i tilsig, kraftproduksjon, forbruk og kraftpriser i omkringliggende land. Sistnevnte holdes konstant over hele analyseperioden, mens de tre første varierer med hensyn på nedbør og temperatur. Verdier for tilsig, kraftproduksjon og forbruk er hentet ut fra kjøring i Samkjøringsmodellen, med NVEs Nordenmodell med de framskrevne klimaseriene mot 2100 til grunn. Figur 18 viser hvordan regresjonsmodellen gir kraftpris på Vestlandet sammenliknet med modellert kraftpris i Samkjøringsmodellen for perioden 1981-2010. Avviket i forkant av vårflommen er et resultat av ekstrempriser i ett enkelt år i Samkjøringsmodellen, som regresjonsmodellen ikke klarer å gjenskape.

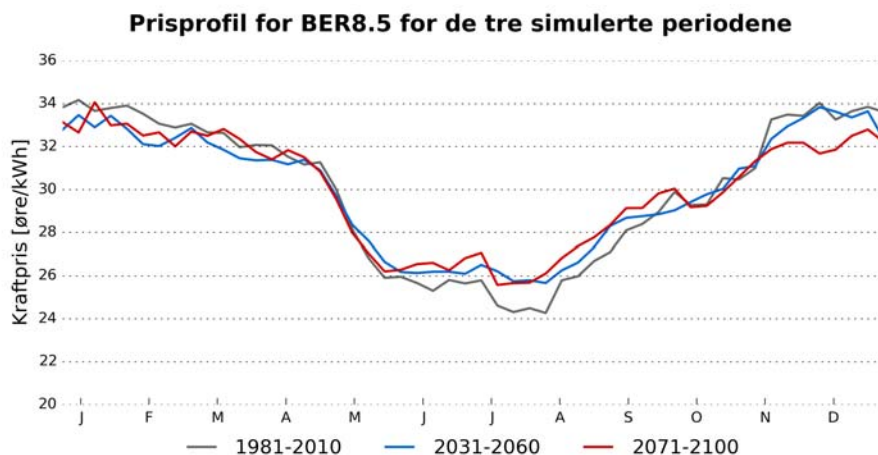
Kraftpris fra regresjonsmodell sammenlignet med modellert for 1981-2010



Figur 18: Kraftpris fra regresjonsmodell sammenlignet med modellert kraftpris i samkjøringsmodellen for perioden 1981-2010.

Figur 19 viser gjennomsnittlig årsvariasjon for de regresjonsberegnete kraftprisene for en av de ti klimaframskrivningene som er benyttet. Beregningene viser at kraftprisene blir jevnere over året mot slutten av århundret gitt dagens kraftsystem. Vi har satt gjennomsnittsprisen over året lik 30 øre i alle periodene, slik at endringer i prisnivå ikke

påvirker resultatene fra en periode til en annen. Prisrekkene beskriver hele trettiårsperioden, det er altså ikke gjennomsnittsåret i figuren under som benyttes inn i Vansimtap.



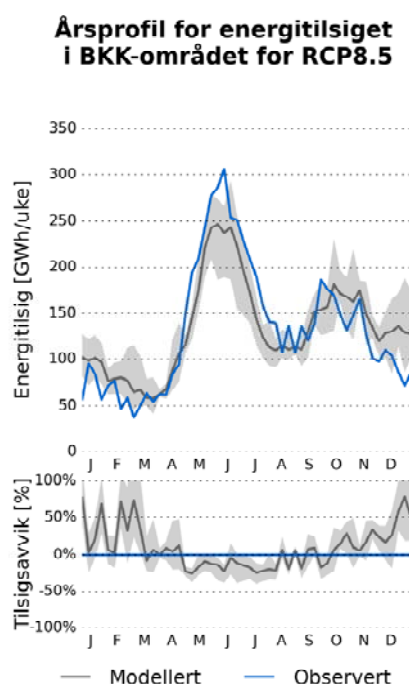
Figur 19: Gjennomsnittlig årsvariasjon for de regresjonsberegnete kraftprisene for en av de ti klimaframskrivningene som er benyttet.

6.2 Sammenligning av klimamodellert tilsig og observert tilsig

En hydrologisk vannbalansemodell (HBV-modell) beregner tilsig ut fra temperatur og nedbør. I denne analysen hentes temperatur og nedbør fra framskrivningene omtalt i Klima i Norge 2100. Figur 1 viser klimamodellert og observert historisk tilsig for perioden 1981-2010.

HBV-modellene som har generert tilsigsseriene til denne analysen er kalibrert mot utvalgte målestasjoner i Norge, der NVE har måledata langt tilbake i tid. De er ikke kalibrert mot hvert enkelt nedbørsfelt. Tilsiget blir modellert for grid-ruter på 1x1 km. Tilsiget i grid-rutene for et bestemt nedbørsfelt er deretter aggregert opp for å estimere tilsigsserien. Dette gjør at det er sannsynlig med avvik for enkelte nedbørsfelt. Tilsiget stemmer imidlertid godt for Norge som helhet.

Når vi skal analysere klimaendringenes effekt på tilsiget i et nedbørsfelt, må vi sammenligne modellert tilsig for perioden 1981-2010 med



Figur 20: Gjennomsnittet av energitilsig til BKKs områder for perioden 1981-2010. Det klimamodellerte tilsiget er snittet av alle klimakombinasjonene, og det skraverte området er forskjellen mellom kombinasjonene.

modellert tilsig for periodene 2031-2060 og 2071-2100. Dette er for at analysen skal bli konsistent.

Generelt vil HBV-modeller overestimere lave tilsig og underestimere høye tilsig. Dette er også tilfellet for tilsiget i områdene BKK har kraftproduksjon. I historisk periode er derfor høst- og vintertilsiget overestimert, mens vår- og sommertilsiget er underestimert i modelldataene, sammenlignet med observert statistikk. Vi antar at dette er tilfellet i modellen for alle periodene, og at forskjellen mellom periodene viser en riktig tendens og utvikling.



Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no