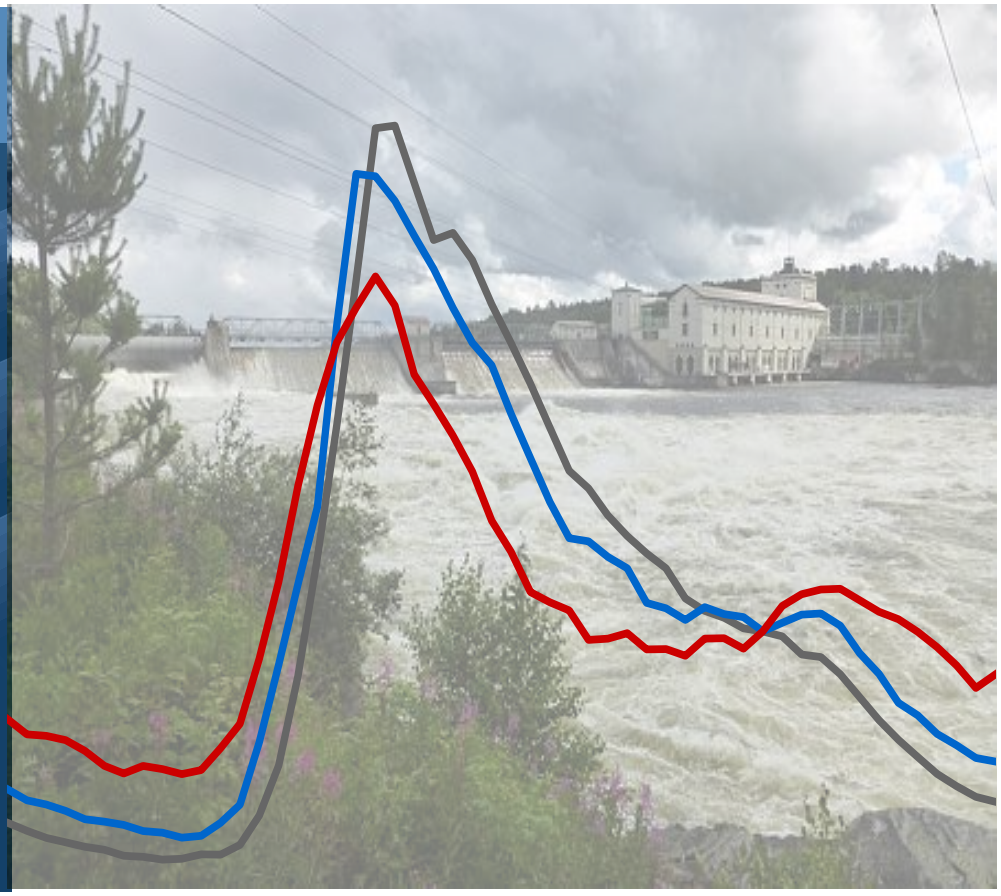
# Klimaendringer i Glommavassdraget

## - Påvirkning på kraftverk og produksjonssystemet

*Christina Stene Beisland, Valentin Johannes Koestler, Birgit Longva og Eirik Veirød Øyslebø*

29
2017



RAPPORT

# Rapport nr 29-2017
# Klimaendringer i Glommavassdraget

**Utgitt av:** Norges vassdrags- og energidirektorat

**Redaktør:** Christina Stene Beisland

**Forfattere:** Christina Stene Beisland, Valentin Johannes Koestler, Birgit Longva, Eirik Veirød Øyslebø, Gusong Ruan, Christine Birkeland og Anders Jensen Aas

**Trykk:** NVEs hustrykkeri
**Opplag:** 50
**Forsidefoto:** Rånåsfoss kraftverk. Foto: Arne T. Hamarsland
**ISBN** 978-82-410-1581-6
**ISSN** 1501-2832

**Sammendrag:** Konsekvenser av klimaendringer på produksjonssystemet i Glomma og Lågen.

**Emneord:** klimaendringer, Glomma, Gudbrandsdalslågen, 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

05.04.2017

# Innholdsfortegnelse

**1 Klimaendringer mot 2100 ..... 4**

**2 Glomma og Lågen ..... 5**

**3 Klimaendringer vil gi endrede tilsigsforhold ..... 6**

3.1 Hele vassdraget får et jevnere tilsig ..... 7

3.2 Temperaturøkning fører til bresmelting i Gudbrandsdalen ..... 8

**4 Klimaendringer vil gi økt kraftproduksjon ..... 9**

4.1 Utnyttelsesgraden øker utover århundret ..... 11

4.2 Elvekraftverkene i vassdraget har større potensiale for produksjonsøkning ..... 12

4.3 Bretilsig gir økt kraftproduksjon i Lågen mot midten av århundret ..... 12

4.4 Magasinene tappes mindre ned i våtår, men i tørrår vil de fortsatt behøves for å jevne ut kraftproduksjonen ..... 13

**Vedlegg ..... 15**

A. Forutsetninger ..... 15

i. Produksjonssystemet ..... 15

ii. Tilsig- og temperaturserier ..... 16

iii. Kraftpris ..... 18

# Forord

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 et varmere og våtere klima, og konkluderte blant annet med at det norske kraftsystemet vil påvirkes av klimaendringene i form av økt vannkraftproduksjon og økte flomtap. Men konklusjoner som gjelder for kraftsystemet som helhet gjelder ikke nødvendigvis for det enkelte vassdrag.

De nærmeste årene vil det bli behandlet flere saker om revisjon av konsesjonsvilkårene for eldre vassdragsanlegg. Det er også forventet store reinvesteringer i norske vannkraftanlegg i årene som kommer, og i stortingsmeldingen *Kraft til Endring* bebuder regjeringen en strategi for å legge til rette for at potensialet for opprusting og utvidelse av vannkraftverk kan realiseres. Med tanke på dette er det av interesse å forstå bedre hvordan produksjonssystemene i enkeltvassdrag vil håndtere fremtidig tilsig. NVE har gjort en analyse av hvordan klimaendringer vil påvirke det eksisterende produksjonssystemet i Norges største vassdrag, Glomma og Lågen.

Denne analysen har gitt oss ny kunnskap om hvordan endrede tilsigsforhold på grunn av klimaendringer kan påvirke kraftproduksjonen i de eksisterende kraftverkene i vassdraget, men er på ingen måte uttømmende. Det er grunn til å tro at klimaendringer også vil få konsekvenser som ikke er behandlet i denne rapporten. Det gjelder blant annet i hvilken grad kraftverkene er i stand til å utnytte det økte tilsiget dersom vi også får større innslag av kortvarige regnflommer. Dette kan få betydning, både for magasindisponering, fremtidig behov for magasinkapasitet og beslutninger om fremtidige opprustinger og utvidelser av vannkraftverk. I tillegg er kunnskapen om hvordan klimaendringer påvirker både kortsiktige tilsigsvariasjoner og bresmelting i stadig utvikling. Vi håper derfor at denne rapporten også gir grobunn for gode diskusjoner og videre arbeid med disse temaene.

Arbeidet hadde ikke vært mulig uten hjelpen vi har fått, både fra Glommen og Laagens Brukseierforening og Eidsiva Vannkraft. De har bidratt med nødvendig informasjon og kunnskap om produksjonsanleggene i vassdraget, og har vært gode diskusjonspartnere både i utformingen av problemstillingene og tolkingene av resultatene.

Oslo, februar 2017

Anne Vera Skrivarhaug
Avdelingsdirektør
Energiavdelingen

# Sammendrag

Et varmere og våtere klima vil påvirke det norske kraftsystemet. I denne rapporten er fokus på Norges største vassdrag, Glommavassdraget, og hvordan produksjonssystemet i vassdraget håndterer endringene i klimaet fra i dag og frem mot slutten av århundret. Dette er hovedkonklusjonene fra analysen:

- **Klimaendringer gir mindre sesongvariasjoner i tilsiget.** Økte temperaturer fører til kortere vintersesong. Nedbøren vil falle som regn lenger utover høsten og tidligere på våren, og tilsigsvariasjonen mellom sesonger vil bli mindre.
- **Utnyttelsesgraden vil øke utover århundret.** Ettersom tilsiget kommer jevnere over året vil en større andel av tilsiget nyttes til kraftproduksjon i Glommavassdraget. Kraftproduksjonen vil øke mest på høsten og vinteren, på tidspunkt det i dag er relativt lite tilsig.
- **Bretilsig gir økt kraftproduksjon i Gudbrandsdalslågen med sidevassdrag.** Av tilsigsseriene i Glommavassdraget er det kun tilsigsseriene i Lågen som er påvirket av bretilsig. Ettersom temperaturene øker vil isbreene smelte og bidra med økt tilsig i en periode. Økningen er størst fra i dag og frem mot midten av århundret. Deretter reduseres tilsiget til Gudbrandsdalslågen, ettersom brevolumet blir mindre. Effekten av bre vises tydeligst på sommeren.
- **Elvekraftverkene i vassdraget har større potensiale for produksjonsøkning.** Både magasinkraftverkene og elvekraftverkene drar nytte av at tilsiget generelt øker. Det er kraftverkene med liten reguleringsevne, altså de uten magasiner, som får størst nytte av at tilsiget kommer jevnere over året, siden dette bidrar til å redusere flomtapet.
- **Magasinene tappes mindre ned i våtår, men i tørrår vil de fortsatt behøves for å jevne ut kraftproduksjonen.** Det er stort spenn i magasindisponeringen mellom tørre og våte år mot slutten av århundret. I det våteste året er vintertilsiget høyt nok til at det nesten ikke blir noen tappesesong og magasinene tømmes dermed ikke i løpet av vinteren. Likevel vil det fortsatt finnes relativt tørre år mot slutten av århundret der hele magasinkapasiteten utnyttes for å opprettholde produksjon om vinteren.

Konklusjonene gjelder med både middels og høye klimagassutslipp, men endringene blir større med høye utslipp.

Modellen som er benyttet i analysen har ukesoppløsning. Resultatene sier dermed ikke noe om effekten av kortsiktige variasjoner som for eksempel styrtregn og kortvarige regnflommer. Dette er imidlertid viktig og kan belyses i videre arbeid om konsekvenser av klimaendringer på kraftproduksjon i Norge.

# 1 Klimaendringer mot 2100

Rapporten «Klima i Norge 2100» beskriver hvordan klimaet i Norge vil 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 tilpasset norske forhold. Hver av klimamodellene er vurdert ut fra to ulike utslippsscenarioer. Et scenario med moderate utslippsøkninger (RCP4.5), som tilsvarer en utvikling med en global temperaturøkning på rundt 2,5 °C mot år 2100, og et høyt utslippsscenario. Det høye utslippsscenarioet (RCP8.5) representerer en utvikling som følger dagens utslippsvekst, og gir en global temperaturøkning på om lag 4°C. Temperaturøkningene i de to utslippsscenarioene er i forhold til før-industriell tid.

I etterkant av «Klima i Norge 2100» ga NVE ut rapporten «Et væravhengig kraftsystem – og et klima i endring». Her ble noen av funnene fra «Klima i Norge 2100» benyttet inn i NVEs kraftmarkedsmodell for å forstå hvordan klimaendringene kan påvirke det norske kraftsystemet. Kun en av klimamodellene ble benyttet.

Denne rapporten går mer detaljert til verks enn «Et væravhengig kraftsystem – og et klima i endring». I forrige rapport var det fokus på de overordnede resultatene for landet som helhet. Nå er fokus på Norges største vassdrag; Glommavassdraget. I tillegg er antallet klimamodeller økt, slik at man nå ser på et utfallsrom basert på resultater fra fem ulike modellkombinasjoner. Disse er kjørt med begge utslippsscenarioene, slik at analysene i denne rapporten er basert på ti sett med framskrivninger for tilsig i Glommavassdraget.

Klimaframskrivningene fra de ulike klimamodellene kan ses på som like sannsynlige, men ulike beskrivelser av fremtidsklimaet. Bruk av fem ulike modeller gir et utfallsrom i resultatene, og synliggjør noe av usikkerheten i slike analyser. I denne analysen er det hovedfokus på gjennomsnittsverdier, men utfallsrommet presenteres der dette er interessant, for eksempel i tilfeller der klimamodellene ikke gir samme retning på endringene. 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.

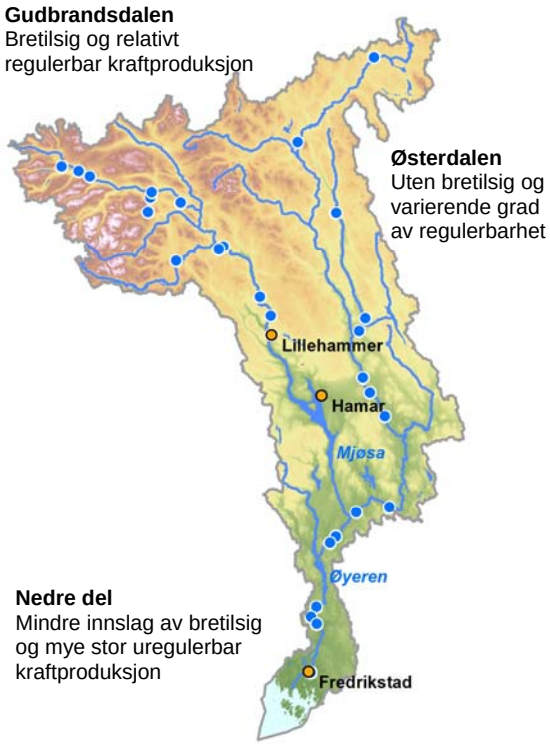
Vurderingen av hvordan klimaendringer påvirker vannkraftsystemet i Glommavassdraget er basert på analyser gjort i produksjonssystemmodellen Vansimtap. Dette er en stokastisk optimaliseringsmodell som tar hensyn til usikkerhet i tilsig. Ved hjelp av hydrologiske vannbalansemodeller er det generert tilsigsserier med utgangspunkt i resultater på temperatur- og nedbørdata fra klimamodellberegningene. Disse kan brukes direkte i Vansimtap. Det er viktig å påpeke at modellen har ukesoppløsning. Resultatene egner seg derfor ikke til å si noe om konsekvenser av kortsiktige tilsigsvariasjoner innenfor time eller døgn.

I analysen er det fokusert på 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.

# 2 Glomma og Lågen

Glommavassdraget er Norges største og lengste vassdrag, og har et nedbørfelt som dekker om lag 12 % av landets areal. Kraftverkene i vassdraget produserer totalt rundt 12 TWh i et normalår. Dette tilsvarer om lag 9 % av Norges kraftproduksjon. Vannkraftsystemet er detaljert modellert i Vansimtap med 77 moduler som representerer kraftverk, vannmagasiner og innsjøer. I modelleringen av vannkraftsystemet i Glomma og Lågen er det benyttet 14 ulike tilsigsserier. Disse kjennetegnes av at det finnes gode målinger langt tilbake i tid, og representerer ulike typer nedbørsfelt godt. Nedbørfeltet til Glommavassdraget er avbildet i Figur 1.

Glommavassdraget er delt inn i tre hoveddeler; Gudbrandsdalslågen i vest, Østerdalen i øst, og nedre deler av Glomma, som er definert fra samløpet av de to delene og ned til utløpet av Glomma. Disse tre områdene har ulike karaktertrekk, både når det kommer til topografi og kraftproduksjon. Påvirkningen av klimaendringer på produksjonssystemet varierer også i de ulike delene av vassdraget. Forskjellene handler i stor grad om høyde over havet, om det er bretilsig eller ikke, i tillegg til egenskaper ved kraftverkene i de ulike områdene. Dette er kommentert i Figur 1.




**Figur 1: Nedbørfeltet til Glommavassdraget. De blå sirklene er vannkraftverk større enn 10 MW.**

Gudbrandsdalslågen omfatter i denne analysen området fra Breidalsvatn og Aursjøen ned til samløpet med Glomma ved Vormsund. Kraftverkene i Gudbrandsdalen får sitt tilsig fra høytliggende områder, med et relativt høyt innslag av bre fra Jotunheimen, Breheimen og Reinheimen. Lågen er den mest regulerte delen av vassdraget med en reguleringsgrad på 25 prosent ved utløpet av Mjøsa[1]. De største magasinene i Lågen er Mjøsa, Bygdin og Rauddalsvatn.

Glomma løper ut fra Aursunden øverst i Østerdalen. Produksjonssystemet i Østerdalen begynner i denne analysen med kraftverkene ved Aursunden og Fundin og slutter etter Funnefoss kraftverk like før samløpet med Gudbrandsdalslågen. Kraftverkene i Østerdalen får mye av sitt tilsig fra fjellområder som har noe lavere høyde over havet enn hva som er tilfelle for Lågen, og har heller ikke tilsig fra bre. Det er en blanding av uregulerte og regulerte kraftverk i denne delen av vassdraget, og reguleringsgraden er på

[1] Reguleringsgrad her er summen av oppstrøms magasinvolum inkludert eget magasin delt på summen av midlere årstilsig til for området (Magasinvolum/Tilsig).

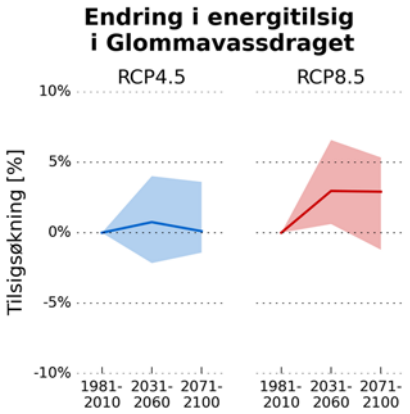
8 prosent oppstrøms Funnefoss. De største magasinene i Østerdalen er Aursunden, Storsjøen og Osensjøen.

Nedre deler av Glomma er i denne analysen definert ved kraftverkene fra Rånåsfoss til utløpet av Glomma. I nedre deler av Glomma ligger de største elvekraftverkene i landet og magasinet Øyeren. Denne delen får tilsig fra de to øvrige delene i tillegg til lokalt tilsig.

I denne analysen blir betegnelsen uregulerbare kraftverk benyttet om elvekraftverk, selv om også elvekraftverkene kan dra nytte av oppstrøms magasiner. Regulerbare kraftverk betegner magasinkraftverk. Småkraftverk har ikke vært i fokus.

# 3 Klimaendringer vil gi endrede tilsigsforhold

Endringer i tilsiget er den viktigste forklaringsfaktoren på hvordan Glommavassdraget vil bli påvirket av klimaendringer. Det er derfor viktig å forstå utviklingen i tilsiget for å forstå endringene som skjer i disponeringen av ressursene i vassdraget[2]. Med et stort geografisk område, to ulike utslippsscenarioer og fem ulike kombinasjoner av klimamodeller, vil det være et stort utfallsrom i tilsiget. Likevel er det en del fellestrekk for hvordan tilsiget vil utvikle seg frem mot år 2100, uavhengig av klimamodell og utslippsscenario.



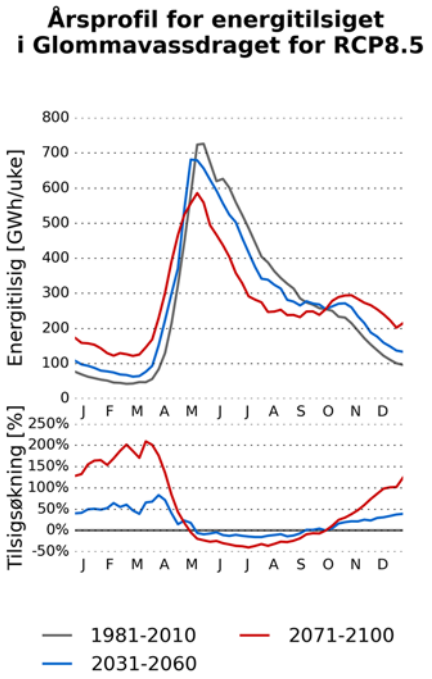

**Figur 2: Endring i energitilsig i Glommavassdraget. Det skraverte området viser utfallsrommet mellom klimamodellene som er benyttet i analysen.**

Figur 2 viser hvordan sumtilsiget i et normalår utvikler seg frem mot slutten av århundret. Utfallsrommet spennes av de ulike klimamodellene. Høyere temperatur vil med stor sannsynlighet føre til økt nedbør på Østlandet. I tillegg vil økt temperatur medføre at isbreene smelter. Dette vil trekke sumtilsiget opp.

[2] Tilsig og temperatur er det som benyttes fra resultatene fra klimamodellene. 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 A.

Økte temperaturer vil imidlertid også medføre at fordampningseffekten øker, noe som trekker sumtilsiget ned. Hvor stor denne effekten er, sammenliknet med de effektene som trekker sumtilsiget opp, er ulikt fra modell til modell. Det er også verdt å merke seg at modelleringen av fordampning er svært usikker, grunnet blant annet mangel på måledata.

Figur 3 beskriver hvordan tilsiget endrer seg i gjennomsnitt over tid innad i et normalår, over de ulike trettiårsperiodene i det høye utslippsscenarioet. Endringene er tilsvarende, men noe mindre i det moderate utslippsscenarioet.




**Figur 3: Årsprofil for sumtilsiget for Glomma og Lågen (gjennomsnitt av de ulike klimamodellene).**

Videre beskrives de viktigste endringene i tilsig, først endringer som gjelder hele vassdraget sett under ett, deretter endringer som gjelder kun deler av vassdraget. Tilsigsutviklingen i Østerdalen og nedre del av Glomma følger samme utvikling som vassdraget totalt. Gudbrandsdalslågen blir omtalt separat.

## 3.1 Hele vassdraget får et jevnere tilsig

Vinternedbøren kommer i økende grad som regn. I hvor stor grad denne effekten gjør seg gjeldende er avhengig av forventet temperaturøkning. Effekten går i samme retning i alle tilfeller. Som Figur 3 illustrerer er effekten klart størst mot slutten av århundret i det høyeste utslippsscenarioet.

Tilsiget vil komme jevnere over året. Når vinternedbøren i stadig større grad vil komme som regn, vil dette gi mindre snøpålagring, og dermed en mindre omfattende snøsmelteflom. Dette fører til at forskjellen mellom tilsiget i de tørreste og de våteste sesongene blir mindre, noe som er en stor fordel for kraftverk med begrenset mulighet for regulering.

Sommertilsiget reduseres. Dette er et resultat sammensatt av to effekter. Tidlig på sommeren vil en redusert snøsmelteflom føre til en lavere tilgang på vann i perioder der en tradisjonelt har hatt mest. I tillegg vil økte temperaturer føre til at fordampningseffekten blir mer fremtredende, og redusere det nyttbare tilsiget gjennom hele sommeren. Disse effektene vil føre til noe lavere tilsig i sommermånedene, men det vil fortsatt være en periode med tilstrekkelig tilgang på vann.

Økt sumtilsig. Som Figur 2 viser er utfallsrommet som spennes opp av de ulike klimamodellene relativt stort, og enkelte av klimamodellene gir et lavere tilsig mot slutten av århundret enn det en har i dag. Forventningsverdien, og flertallet av klimamodellene, gir imidlertid en tilsigsøkning på noen prosent over dagens nivå.

Det høyeste utslippsscenarioet (RCP8.5) gir størst økning i tilsig. Det høye utslippsscenarioet, som har størst temperatur- og nedbørøkning av de to scenarioene, gir høyest tilsigsøkning. Som vist i Figur 2, overlapper utfallsrommene for de to utslippsscenarioene, men tilsiget i det høye utslippsscenarioet ligger jevnt over høyere enn i scenarioet med moderate utslipp. Dette viser at en vil unngå de største endringene i tilsig dersom utslippsveksten reduseres.

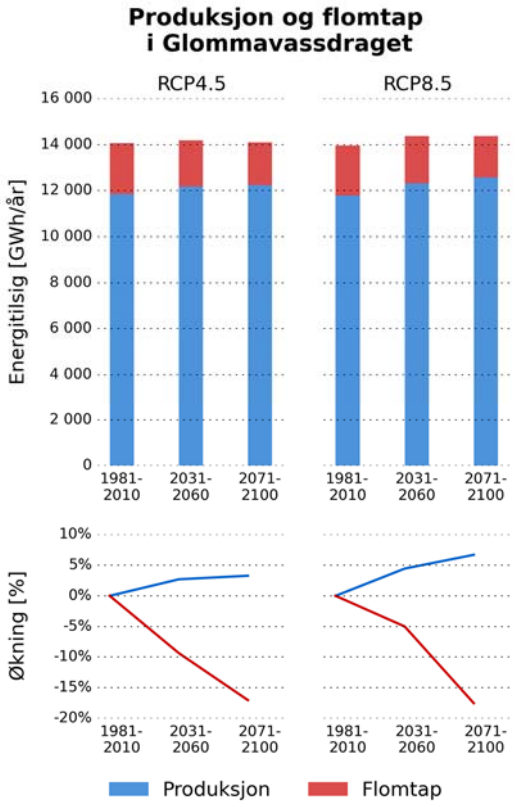
## 3.2 Temperaturøkning fører til bresmelting i Gudbrandsdalen

Tilsiget i Gudbrandsdalslågen utgjør omtrent en tredjedel av tilsiget til Glommavassdraget. Store deler av tilsiget kommer fra høytliggende fjellområder med en relativt høy andel av isbre. I tillegg til de endringene som en ser for hele vassdraget, vil en i Gudbrandsdalen også ha større endringer i tilsiget som kommer fra bredekte områder. Den økte temperaturen gjør at mengden snø som tilføres vinterstid blir stadig mindre, og smelter stadig tidligere. Dette fører til at breis blir eksponert tidligere på våren, og starter å smelte tidligere. En vil da se en økning av tilsig fra bre i midten av århundret. Dette tilsiget vil reduseres gradvis utover århundret ettersom breene blir stadig mindre. Effekten er klart størst i det høye utslippsscenarioet der temperaturøkningen er størst.

Utviklingen i bre er relativt enkelt modellert, som beskrevet i vedlegget. Det er derfor usikkerhet rundt resultatene, men hvordan breene vil utvikle seg vil ha mye å si for tilsiget til Gudbrandsdalslågen.

# 4 Klimaendringer vil gi økt kraftproduksjon

Kraftverkene i Glommavassdraget er i stor grad dimensjonert på bakgrunn av historisk tilsig. Når produksjonssystemet får endret tilsigsgrunnlag, både med tanke på profil og mengde, er spørsmålet hvordan kraftverkene vil håndtere dette. I Glomma og Lågen, som er et relativt uregulert produksjonssystem, vil endret klima bidra til en økt utnyttelse av produksjonssystemet.

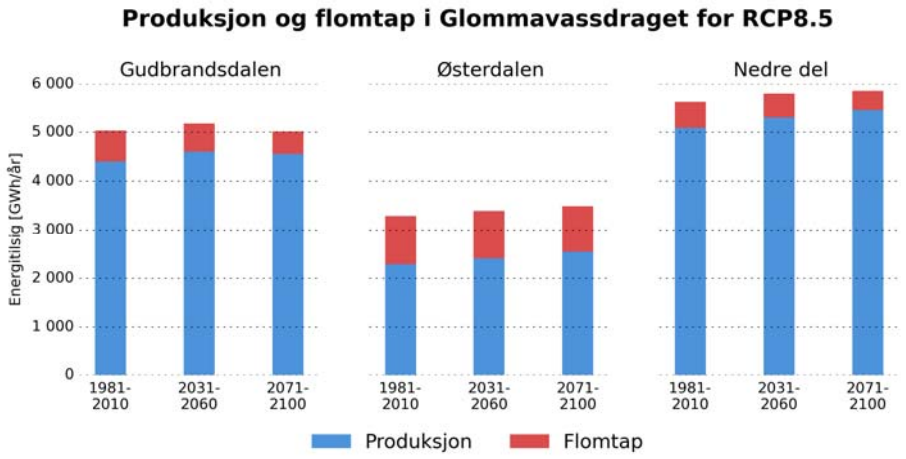



**Figur 4: Kraftproduksjon og flomtap i Glomma og Lågen for de to utslippsscenarioene. Summen gir totalt årlig tilsig. Den nederste figuren viser endringer i produksjon og flomtap sammenlignet med referanseperioden 1981-2010.**

Det er hovedsakelig to grunner til at klimaendringer fører til økt produksjon i kraftverkene i Glomma og Lågen. Produksjonen øker fordi tilsiget øker, men også fordi tilsiget kan utnyttes bedre. Når tilsiget kommer jevnere over året vil utnyttelsen av systemet øke. Mindre vann i snøsmelteperioden vil redusere flomtapet i perioder der det i dag er mer vann enn produksjonssystemet klarer å nyttiggjøre seg av. Mer tilsig på høsten og vinteren vil øke produksjonen i perioder der det i dag er lav utnyttelse av systemet. Dette gjelder særlig de uregulerbare kraftverkene.

Figur 4 viser årlig kraftproduksjon og flomtap i Glomma og Lågen. Figuren viser gjennomsnittet over de tre 30-årsperiodene av de fem klimamodellene, for hvert utslippsscenario. Summen av flomtap og kraftproduksjon gir totalt årlig tilsig i de tre periodene.

Produksjonssystemene i de forskjellige delene av vassdraget har ulike egenskaper, og har dermed ulik evne til å håndtere klimaendringene. Som Figur 5 viser, utnyttes tilsiget vesentlig bedre i Lågen og nedre deler av Glomma, sammenlignet med i Østerdalen, i alle de tre periodene og i begge utslippsscenarioer. Dette skyldes den lave reguleringsgraden til produksjonssystemet i Østerdalen, og noe av produksjonstapet kan trolig også tilskrives konsesjonsvilkårene.

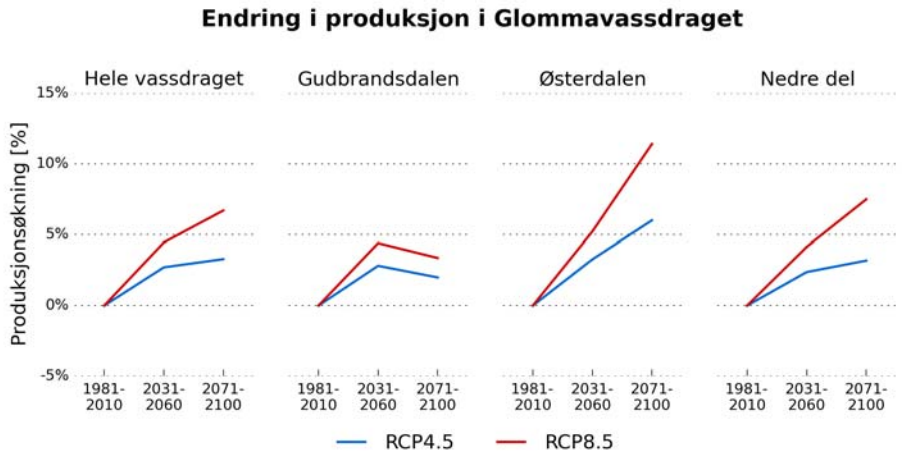



**Figur 5: Grafene viser kraftproduksjon og flomtap fordelt på deler av vassdraget for det høye utslippsscenarioet, RCP8.5. Summen gir totalt tilsig.**

Lågen er den mest regulerte delen av vassdraget og har derfor et lavt prosentvis flomtap. Innslaget av bretilsig gjør at Lågen får en utvikling i produksjonen som skiller seg fra resten av vassdraget. Produksjonen i Lågen synker fra midten til slutten av århundret fordi bretilsiget i stor grad faller bort. Dette omtales nærmere i kapittel 4.3.

Østerdalen har størst prosentvis flomtap av de tre områdene. Flomtap omfatter i denne analysen også minstevannføringer og vanntap som følge av manøvreringsreglement. Deler av det oppgitte flomtapet kan derfor være vanntap som følge av konsesjonsvilkår, som er spesifikke for denne delen av vassdraget. I tillegg er reguleringsgraden i Østerdalen lav, og det er derfor liten mulighet for lagring av vann mellom sesonger eller år. Som Figur 6 viser, er Østerdalen den delen av Glommavassdraget som får størst prosentvis produksjonsøkning som følge av at klimaet endrer seg. Denne delen har i dag størst prosentvis flomtap av de tre delvassdragene. Det har derfor større potensiale for å øke kraftproduksjonen, både som følge av å innvinne flomtap, og som følge av direkte produksjonsøkning når tilsigsgrunnlaget stiger.

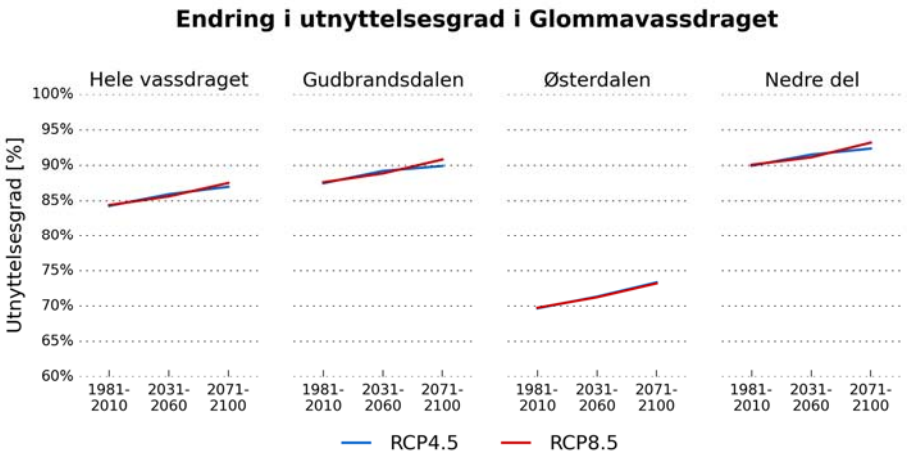
Den nedre delen av Glomma står for den største delen av kraftproduksjonen i vassdraget. Siden produksjonssystemet i denne delen stort sett består av store elvekraftverk, vil et jevnere tilsig over året øke utnyttelsen av vannet. Når klimaendringene fører til at tilsiget på høsten og vinteren øker, og tilsiget på sommeren reduseres, vil kraftproduksjonen og flomtapet følge det samme mønsteret. De nedre delene av vassdraget drar også nytte av Mjøsa og Øyeren som bidrar til flomdemping i perioder med mye vann.




**Figur 6: Grafene illustrerer endring i produksjon i hele Glommavassdraget og de tre delvassdragene for begge utslippsscenarioer.**

## 4.1 Utnyttelsesgraden øker utover århundret

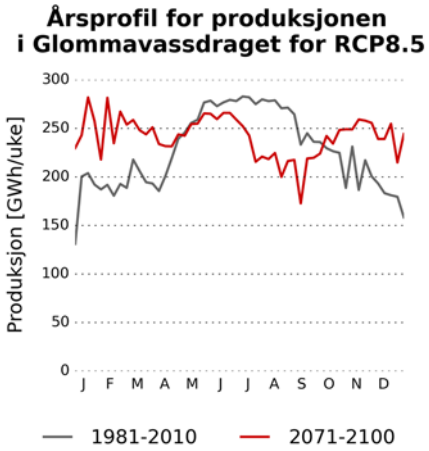
Utnyttelsesgraden er andelen av det tilgjengelige tilsiget som utnyttes til kraftproduksjon. Dersom mye av tilsiget går til flom eller vanntap som følge av minstevannføringer og manøvreringsreglement vil utnyttelsesgraden for et kraftverk være lav.



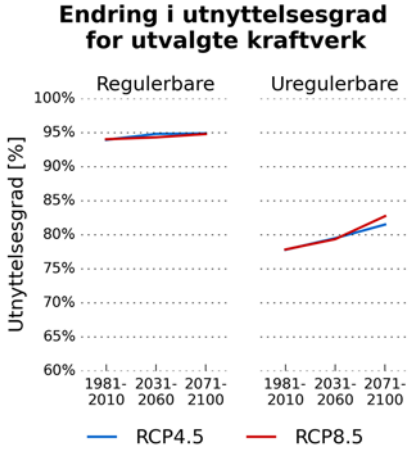

**Figur 7: Grafene viser endring i utnyttelsesgrad i Glommavassdraget, og de tre delvassdragene for de to utslippsscenarioene.**

Som vist i Figur 7 går utnyttelsesgraden for vassdraget samlet opp fra 84 til 87 prosent i det høye utslippsscenarioet. Det er omtrent samme økning i det moderate utslippsscenarioet. Som figuren viser stiger utnyttelsesgraden for alle de tre områdene av vassdraget utover århundret. Østerdalen har den laveste utnyttelsesgraden. Dette skyldes, som tidligere nevnt, flomtap i perioder med mye vann i tillegg til blant annet vilkår om minstevannføring.

Figur 8 viser årsprofilen for produksjonen i Glommavassdraget. Ettersom produksjonen blir jevnere over året utnytter man også mer av produksjonskapasiteten i vassdraget. Dette gjør at utnyttelsesgraden totalt øker.




**Figur 8: Gjennomsnittlig årsprofil for produksjonen i Glommavassdraget for RCP8.5 i periodene 1981-2010 og 2071-2100.**



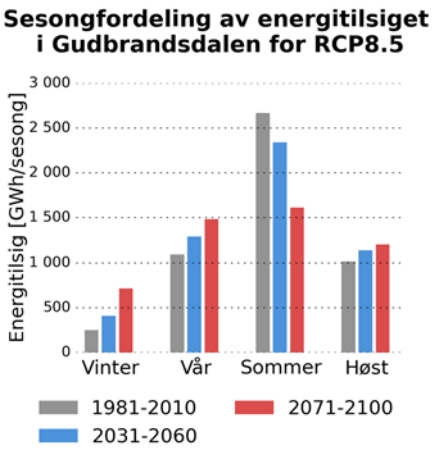

**Figur 9: Endring i utnyttelsesgrad for utvalgte kraftverk med høy og lav reguleringsgrad i Glommavassdraget for begge utslippsscenarioer.**

## 4.2 Elvekraftverkene i vassdraget har større potensiale for produksjonsøkning

Både de regulerbare og uregulerbare kraftverkene drar nytte av at tilsiget generelt øker. Det er kraftverkene med liten reguleringsevne, altså de uten magasiner, som får størst nytte av at tilsiget kommer jevnere over året, siden dette bidrar til å redusere flomtapet. Som Figur 9 viser har de regulerbare kraftverkene allerede en høy utnyttelsesgrad, og lavt flomtap, slik at de ikke i like stor grad får nytte av at tilsiget kommer jevnere over året. De uregulerte kraftverkene har dermed et større potensiale for produksjonsøkning enn de regulerte kraftverkene.

## 4.3 Bretilsig gir økt kraftproduksjon i Lågen mot midten av århundret

I overkant av 90 prosent av tilsiget til Gudbrandsdalslågen er definert av tilsigsserier med bretilsig. Breene er et engangsmagasin som med høyere temperaturer vil bidra til en ikke-fornybar tilsigsøkning i en periode. Som tidligere illustrert i Figur 6 (Gudbrandsdalen) er økningen i tilsig som kommer fra bre størst fra i dag og frem mot midten av århundret. Deretter reduseres tilsiget til Gudbrandsdalslågen, ettersom brevolumet blir mindre. Dette er spesielt tydelig i det høye utslippsscenarioet. Dette skyldes at en raskere økning i temperaturene vil medføre raskere bresmelting. En begrensning i utslipp av klimagasser vil




**Figur 10: Sesongfordeling for energitilsiget i Gudbrandsdalen for det høye utslippsscenarioet (RCP8.5).**

redusere omfanget av bresmeltingen, og dermed begrense tilsigsøkningen mot midten av århundret.

Effekten av redusert breareal viser seg tydelig på sommeren. Figur 10 illustrerer hvordan tilsiget endrer seg i Lågen. Det er en stor nedgang i sommertilsiget, spesielt i siste del av århundret. Redusert sommertilsig kan i stor grad tilskrives mer snøsmelting tidligere på året, redusert avrenning fra isbreene, i tillegg til at varmere vær bidrar til at fordampingen øker. Gjennom de andre sesongene ser vi de samme effektene som for vassdraget som helhet.

De fleste kraftverkene i Gudbrandsdalslågen som har bretilsig, har relativt høy reguleringsgrad sammenlignet med resten av vassdraget. Det er derfor vanskelig å skille ut effekten bresmelting har på kraftproduksjon og flomtap i disse kraftverkene, spesielt over året. I uregulerte kraftverk følger produksjonen i stor grad tilsiget, og produksjonen øker dermed i alle sesonger med unntak av om sommeren.

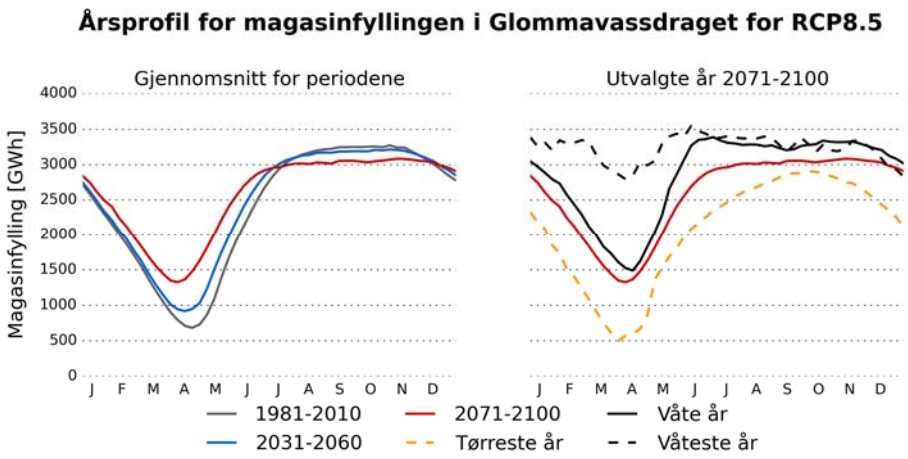
Figur 6 illustrerer effekten av klimaendringer på kraftproduksjon fra i dag og frem mot slutten av århundret. Kraftproduksjonen i Gudbrandsdalen øker mot midten av århundret, for deretter å gå noe ned igjen mot slutten. Flomtapet reduseres imidlertid både mot midten og slutten av århundret.

## 4.4 Magasinene tappes mindre ned i våtår, men i tørrår vil de fortsatt behøves for å jevne ut kraftproduksjonen.

Det er en tydelig sesongprofil på disponeringen av reguleringsmagasinene i vassdraget i referanseperioden 1981-2010. Magasinene fylles opp i vårflommen og holdes fulle på sommeren og høsten når nedbøren kommer som regn. På vinteren tappes magasinene ned. Da er behovet for strøm størst samtidig som tilsiget er lavt, siden nedbøren i stor grad faller som snø og lagres frem til snøsmeltingen om våren.

Utover århundret tappes magasinene i gjennomsnitt mindre ned i tappesesongen og fylles lavere om sommeren, som illustrert i figur 11. Dette er et resultat av at risikoen for å gå tom for vann mot slutten av vinteren reduseres når vinternedbøren i stadig større grad faller som regn. I tillegg blir snømengdene som lagres i fjellet mindre, slik at vårflommen reduseres i omfang. Dette gir mindre behov for å tappe ned magasinene i forkant av snøsmeltingen. Magasinfyllingen blir dermed flatere over året frem mot midten og slutten av århundret.

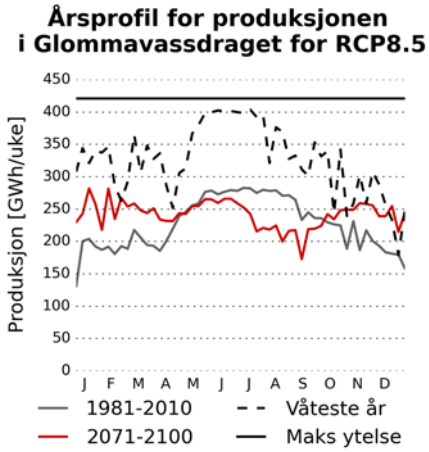
Fokuserer man på forskjellen mellom tørre og våte år mot slutten av århundret, som vist i Figur 11, er det imidlertid et stort spenn i magasindisponeringen. I det våteste året i datamaterialet som er benyttet i denne analysen er vintertilsiget høyt nok til at det nesten ikke blir noen tappesesong. Magasinene tømmes dermed ikke i løpet av vinteren. Likevel viser analysen at det fortsatt vil finnes relativt tørre år mot slutten av århundret der hele magasinkapasiteten utnyttes for å opprettholde produksjon om vinteren. Behovet for magasiner kan dermed bli mindre i våte år, men vannmagasinene vil fortsatt være viktige i tørre år.




**Figur 11: Figuren viser hvordan magasinene i vassdraget disponeres i de tre tidsperiodene. I tillegg er det våteste og det tørreste året i perioden 2071-2100 fremhevet for å vise utfallsrommet. «Våte år» er i denne sammenhengen de fem nest våteste årene.**

I tillegg til å lagre vann fra sesonger med høyt tilsig til sesonger med mindre tilgang på vann, har vannmagasinene en annen viktig rolle, og det er flomdemping. I år med periodevis meget høyt tilsig benyttes magasinene til å dempe presset på produksjonssystemet nedstrøms. Når de våteste årene blir enda våtere, vil dette kunne gi utfordringer med flomdemping i vassdraget. I våte år, der magasinene ligger nær høyeste tillatte vannstand gjennom hele året, vil man kunne miste en frihetsgrad i reguleringen. Da vil virkemidlet en har til å kunne holde igjen vann i perioder med høyt tilsig og høyt flomtap i stor grad falle bort.

Figur 12 viser produksjon i det våteste året i datagrunnlaget som ligger til grunn for denne analysen. Produksjonsapparatet leverer en høy produksjon gjennom store deler av året, også vinterstid. I dette året er tilsiget på i overkant av 22 TWh. Sammenliknet med det forventede normalårstilsiget mot slutten av århundret på ca. 14 TWh, er dette betydelig. Interessant er det da å se at vannkraftsystemet klarer å produsere 16,9 TWh, om lag 3,5 TWh over hva en produserer i et normalår. Store deler av produksjonssystemet i Glomma og Lågen kan med dagens utrustning tjene godt på økt tilsig, spesielt vinterstid. Samtidig ser man at det i våtår med fordel kunne vært behov for økte reguleringsmuligheter for å lagre vann fra sommer til vinter i våtår. Det er 5 TWh tapt vann i dette våteste året, fordelt over en relativt lang periode på vår og sommer. Når det kommer så mye vann over en lengre periode er ikke lagringsmulighetene i Glomma og Lågen tilstrekkelige.




**Figur 12: Produksjonsprofil i det våteste året i perioden 2071-2100 i Glommavassdraget.**

# Vedlegg

## A. Forutsetninger

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

- Produksjonssystemet
- Prisrekker for prisområdet NO1
- 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 Glomma og Lågen handler mot. Dette er nærmere beskrevet i fortsettelsen.

### i. Produksjonssystemet

NVE sin modell av vassdraget med kraftverk og magasiner blir brukt for å simulere produksjonssystemet. I sammenheng med dette prosjektet har vi revidert datagrunnlaget og gått gjennom alle de simulerte kraftverkene. Vi har samlet inn data fra GLB, Eidsiva og andre kraftverkseiere i regionen. Det kan være forskjeller mellom det regulanten og kraftverkseierne 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 allerede 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 frilufts- og fiskeinteresser) og at magasinene disponeres med samme mønster som historiske målinger. For Øyeren (Solbergfoss) og Mjøsa er det i tillegg lagt inn tappebegrensingskurver som begrenser hvor mye vann som kan slippes ut ved lave vannstander.

Vansimtap kan kjøres på to måter: parallellsimulering og seriesimulering. I denne analysen har vi benyttet seriesimulering. I seriesimuleringer brukes magasinfyllingen 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 magasinfyllingen er ukjent, da startpunktet i første tilsigsscenario har minimalt av betydning på de resultatene som genereres over hele trettiårsperioden. Vansimtap er en modell der en stort sett benytter seg av simuleringer på ukenivå.

### ii. Tilsig- og temperaturserier

De hydrologiske framskrivningene benytter framskrivninger av nedskalerte og biaskorrigerte data på nedbør og temperatur fra regionale klimamodeller som inngangsdata. 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 noe over togradersmålet (RCP4.5).[3] Totalt finnes det altså 20 ulike sett med framskrivninger av nedbør og temperatur, som vist i tabellen under.

**Tabell 1: 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).**

| 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 nedbørseriene er deretter brukt som inngangsdata til den hydrologiske modellen som simulerer tilsig som kan benyttes som inngangsdata i Vansimtap. I denne analysen benytter vi 10 av de 20 tilgjengelige temperatur- og tilsigsseriene fra «Klima i Norge 2100». Vi benytter de 10 seriene som starter i 1961 i tabellen over. I denne

[3] RCP står for Representative Concentration Pathway. For mer informasjon om utslippsscenarioene og klimafremskrivningene se “Klima i Norge 2100”, Hanssen-Bauer et al. (2015).

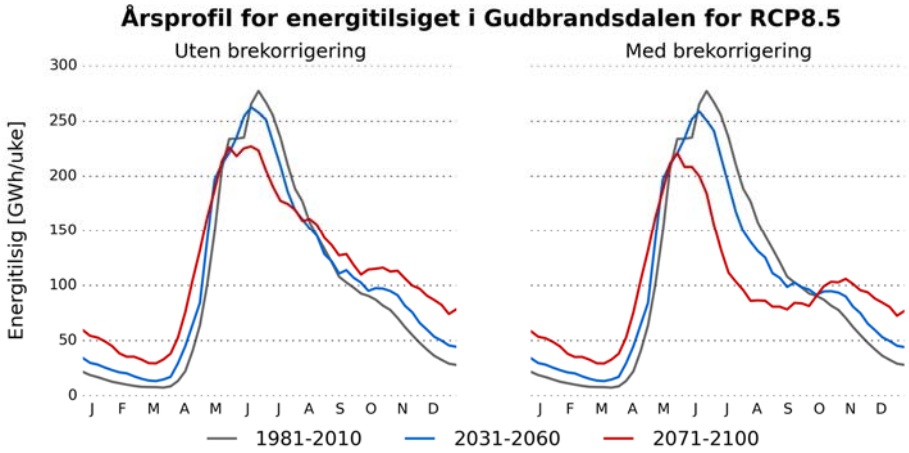
analysen benyttes altså kun resultater fra 5 av de 10 kombinasjonene av regionale og globale klimamodellene. Disse 5 kombinasjonene er kjørt med begge utslippsscenarioer, slik at det blir totalt 10 sett med temperatur- og tilsigsserier.

Seriene er korrigert for bresmelting utover århundret, siden økt temperatur vil føre til at breene minker. Andelen bre er lik i gjennom en analyseperiode, men trappes ned mellom analyseperiodene. Breandelen er redusert forskjellig avhengig av hvilket utslippsscenario som ligger til grunn, og er angitt i tabell 2.

**Tabell 2: Breareal (% av opprinnelig) i framskrivningene der breene er trinnvis redusert.**

| Tidsperiode | RCP4.5 | RCP8.5 |
|---|---|---|
| 1961-2030 | 100 | 100 |
| 2031-2070 | 80 | 70 |
| 2071-2100 | 50 | 20 |

Det er gjort modellkjøringer uten brekorrigering for å undersøke effekten på både tilsig og produksjon. Brearealet holdes da konstant over hele århundret. Som Figur 13 viser har tilsiget med brekorrigering en større nedgang på sommeren. Dette viser at arealet på breen har påvirkning på tilsigsprofilen, og viktigheten av å korrigere for bremelting i tilsigsseriene når en analyserer fremtidens kraftsystem.

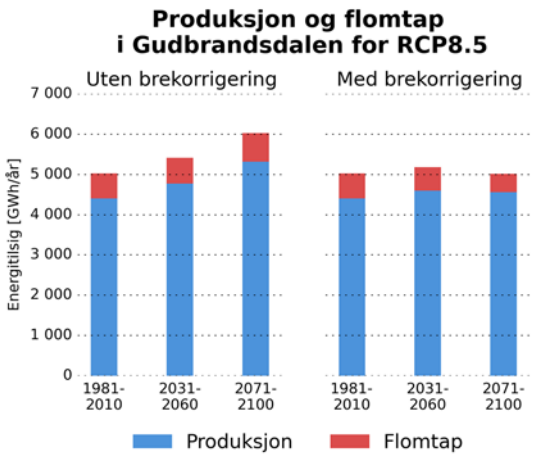



**Figur 13: Tilsigsprofil i Lågen henholdsvis uten og med brekorrigering i alle tre analyseperioder.**

Uten brekorrigering ville Lågen hatt en utvikling i tilsig og produksjon likere resten av vassdraget. Figur 14 viser tilsig, produksjon og flomtap for Lågen dersom brearealet holdes konstant over hele perioden. Brekorrigeringen gjør at Lågens produksjons- og tilsigsprofil går opp på midten av århundret for deretter å avta mot slutten. Dersom brearealet hadde vært konstant over hele århundret ville Lågen ha hatt en økning i både tilsig og produksjon over hele århundret.

### iii. Kraftpris

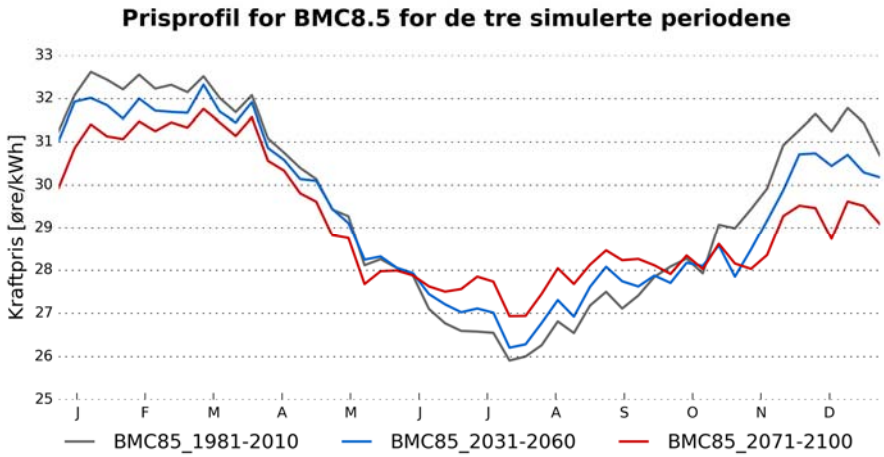
Det er viktig å understreke at prisene ikke er det vi ønsker å fokusere på i klimaanalyser. Analysene ser langt frem i tid – helt til slutten av århundret. Da vil verken produksjonssystemet, forbruksmønster eller markedsdesignet være slik det er i dag. Prisene dagens system ville gitt er derfor mindre viktig. Prisrekker er likevel nødvendig inngangsdata for å kjøre modellen, og er derfor viktig for analysen. Prisene en eksogen variabel i Vansimtap.




**Figur 14: Energitilsig, produksjon og flomtap i Gudbrandsdalen med og uten brekorrigering for det høye utslippsscenarioet.**

Nivået på nordiske kraftpriser er avhengig av termisk kraftproduksjon og landene Norden utveksler kraft med, mens variasjonen mellom år og mellom sesonger gjerne påvirkes av hydrologiske forhold. For å ta høyde for endret klima er modellerte nordiske kraftpriser for perioden 1981-2010 justert for endret klima i periodene 2031-2060 og 2071-2100 ved hjelp av statistisk regresjon.

Figur 15 viser gjennomsnittlig årsvariasjon for de regresjonsberegnede kraftprisene for en av de ti tidsseriene som er benyttet. Beregningene viser at kraftprisene bli jevnere over året mot slutten av århundret. 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 15: Gjennomsnittlig prisprofil for BMC8.5 for de tre simulerte periodene**

Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no