

Utfordringer og muligheter for norsk vannkraft ved integrasjon med vind- og solkraft i Europa

En oppsummering fra HydroPEAK-prosjektet

Redaktør: Ånund Killingtveit



CEDREN

Centre for Environmental Design of Renewable Energy



Utfordringer og muligheter for norsk vannkraft ved integrasjon med vind- og solkraft i Europa

En oppsummering fra HydroPEAK-prosjektet

Redaktør:

Ånund Killingtveit²⁾

Medforfattere:

Eivind Solvang¹⁾, Knut Alfredsen²⁾, Leif Lia²⁾, Nils Ruther²⁾,
Atle Harby¹⁾, Stefan Jaehnert²⁾, Eve Walseth²⁾,
Pål-Tore Storli²⁾, Kari Bråtveit²⁾, Kaspar Vereide²⁾

SINTEF Energi AS¹⁾

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU)²⁾

Killingtveit, Å. (red.). 2017. Utfordringer og muligheter for norsk vannkraft ved integrasjon med vind- og solkraft i Europa. En oppsummering fra HydroPEAK-prosjektet. – NINA Temahefte 71. 91 s.

Trondheim, mai 2017

ISSN: 0804-421X

ISBN: 978-82-426-3070-4

RETTIGHETSHAVER

© Norsk institutt for naturforskning

Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse

GRAFISK FORMGIVNING

Kari Sivertsen/NINA

OMSLAGSFOTO

Foto: Ånund Killingtveit/NTNU

OPPLAG

125



KONTAKTOPPLYSNINGER

Norsk institutt for naturforskning (NINA)

Postadresse: Postboks 5685 Sluppen,
7485 Trondheim

Besøksadresse: Høgskoleringen 9,
7034 Trondheim

Telefon: 73 80 14 00
www.nina.no

Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet (NTNU)

Postadresse: Institutt for bygg- og miljøteknikk NTNU,
7491 Trondheim

Besøksadresse: S. P. Andersens veg 5, Trondheim
Telefon: 73 59 46 40

www.ntnu.no

CEDREN - Centre for Environmental Design of Renewable Energy: Forskning for teknisk og miljøriktig utvikling av vannkraft, vindkraft, overføringslinjer og gjennomføring av miljø- og energipolitikk.

SINTEF Energi, NINA og NTNU er hovedforskningspartnere, med en rekke energiselskaper, norske og internasjonale FoU-institutter og universiteter som partnere.

Senteret finansieres av Forskningsrådet, energiselskaper og forvaltning gjennom ordningen med forskingssentre for miljøvennlig energi (FME). FME-ordningen består av tidsbegrensede forskingssentre som har en konsentrert, fokusert og langsiktig forskningsinnsats på høyt internasjonalt nivå for å løse utpekte utfordringer på energi- og miljøområdet.

Forord

Denne rapporten inneholder en oppsummering og dokumentasjon på det arbeidet som er utført i prosjektet HydroPEAK i CEDREN.

Bakgrunnen for etableringen av CEDREN var klimaforliket i Stortinget i januar 2008, som igjen førte til økt satsing på fornybar energi, og etter hvert etablering av flere forskningscenter for miljøvennlig energi (FME).

På denne tiden var det stor tro på at havvind ville bli et framtidig satseområde for Norge, og to av de sju første FME-ene var innrettet mot utvikling av vindkraft fra flytende vindkraftverk. Samtidig var det en økende forståelse for at samspillet mellom vannkraft og havvindkraft kunne gi Norge en strategisk fordel ved å balansere produksjonen av vindkraft. Dette var et viktig premiss for prioritering av vannkraft og førte til at CEDREN ble etablert som FME og kom i drift i 2009.

Erkjennelsen av at det norske vannkraftsystemet kunne få en stor betydning i et framtidig europeisk kraftsystem med store innslag av vind- og solkraft kom også fram i studier for eksempel i Tyskland, som på denne tiden hadde startet planleggingen av sin «Energiewende», en svært ambisiøs plan for å føre Tyskland over til et fornybart energisystem. Planen ble endelig utformet og vedtatt i 2010.

Det norske vannkraftsystemet er bygget ut for å levere kraft til alminnelig forsyning og til en omfattende elektrokjemisk og –metallurgisk industri, der leveringssikkerhet må være høyt prioritert. Ettersom nær 100% av norsk kraftproduksjon var og fortsatt er basert på vannkraft, måtte det

etableres magasiner for lagring av vann gjennom overskuddsperioder vår og sommer, for produksjon gjennom en lang høst og vinter. De norske magasinene kan lagre vann tilsvarende en energiproduksjon på ca 84,7 TWh. Det tilsvarer halvparten av Europas lagringskapasitet for elektrisitet. De norske magasinene utnyttet imidlertid ennå hovedsakelig på gammel måte, det vil si med en sesongmessig fylling og tømning gjennom året.

Prosjektet HydroPEAK ble etablert i 2009 for å studere hvilke utfordringer som kunne oppstå dersom det norske vannkraftsystemet også skulle samvirke med andre fornybare kraftkilder i Norge og Europa. Den store magasinkapasiteten, og muligheter for en svært rimelig utbygging av mer effekt, gir Norge helt spesielle fortrinn. Økning av effekt kan enten gjøres ved å utvide eksisterende anlegg eller ved bygging av nye kraftverk. Potensialet for utvidelse og opprustning av eksisterende kraftverk eller bygging av pumpekraftverk ble kartlagt i en tidlig fase av HydroPEAK. Det viste seg at det norske vannkraftsystemet om ønskelig kan utvides betydelig. Foreløpig har vi identifisert 20.000 MW til en kostnad som ligger betydelig lavere enn andre land i Europa.

HydroPEAK-prosjektet har fokusert hovedsakelig på tekniske utfordringer i kraftverket og i vannveiene, men har også sett på fysiske forhold i vassdraget som er påvirket av kraftverket, for eksempel erosjon, sediment-problem og isforhold.

Trondheim 28. februar 2017

Ånund Killingtveit
Prosjektleder HydroPEAK

Innhold

Forord	4
Innhold	5
1 Introduksjon	6
2 Scenarier for utvikling av kraftsystemet i Norge og Europa	10
2.1 Potensiale for mer balansekraft i det norske vannkraftsystemet	15
2.2 Sammenligning av spesifikke kostnader (kr/kW)	18
2.3 Kostnad som funksjon av installert effekt	18
2.4 Sammenligning av kostnader for norske pumpekraftverk med kostnader fra andre prosjekt i EU og USA	20
Publikasjoner fra kapittel 2	22
3 Modeller for drift og planlegging	28
3.1 Forbedring av modeller for tilsigsprognoser	28
Publikasjoner fra kapittel 3.1	34
3.2 Forbedring av markedsmodeller	36
Publikasjoner fra kapittel 3.2	40
4 Vannkraftturbiner og pumpekraftverk	42
4.1 Pumpekraftverk	42
Publikasjoner fra kapittel 4.1	45
4.2 Frekvens- og lastregulering ved økt innslag av ikke-regulerbar kraft (sol og vind)	46
Publikasjoner fra kapittel 4.2	48
5 Vannveier og svingekammer	50
5.1 Virkning av lastvariasjon i vannkrafttunneler	54
Publikasjoner fra kapittel 5.1	56
5.2 Luftpute-svingekammer for vannkraftverk	58
Publikasjoner fra kapittel 5.2	62
6 Virkning i elver og vassdrag	66
6.1 Fysiske virkninger i elver og vassdrag	66
Publikasjoner fra kapittel 6.1	71
6.2 Virkninger på isforhold i elver og vassdrag	74
Publikasjoner fra kapittel 6.2	78
7 Klimaendringer og virkning på vannkraft	80
7.1 Beregning av virkninger av klimaendringer på vannressurser	82
7.2 Noen eksempler på virkning på vannressurser og vannkraft	84
Publikasjoner fra kapittel 7	88

1 Introduksjon

HydroPEAK er et forskningsprosjekt i CEDREN om interaksjon mellom vannkraft i Norge og framtidig europeisk kraftsystem.

Hovedmålet med HydroPEAK-prosjektet har vært å studere hvordan det norske vannkraftsystemet kan brukes og utvikles for å støtte opp under et framtidig europeisk kraftsystem med stadig økende innslag av ikke-regulerbar kraft, særlig vind- og solkraft. Vi ønsket å se på samvirket mellom de norske, nordiske og europeiske kraftsystemene, og å vurdere hvilken form for tilpasning og videreutvikling av det norske vannkraftsystemet som kan være nødvendig i dag og fremover.

Det er særlig forventet at utbygging av vindkraft, på land og til havs, kan medføre behov for endringer i produksjonsmønsteret i norske vannkraftanlegg. Variasjon i produksjonen i vindkraftverk vil kunne medføre ønske om en mer variabel vannkraftproduksjon, det vil si produsere mer vannkraft når det er lite vind eller stoppe vannkraftverket når det er mye vind. Mer variabel vannkraftproduksjon vil kunne bety større og hyppigere endringer i vannføring i vannveier og kraftverk, men også i elver, innsjøer og fjorder nedstrøms for kraftverkene.

I HydroPEAK prosjektet har vi særlig fokusert på hvilke fysiske virkninger som økt variabilitet kan medføre. Videre har vi sett på hvilke tiltak som eventuelt kan bli nødvendige for å motvirke eller redusere problemer eller skader i naturen. Dette har blant annet ført til at vi i prosjektet har utviklet bedre beregningsmodeller og dimensjoneringskriterier for optimal utbygging og tilpasning av vannkraftsystemet.

Det er lagt stor vekt på å bygge opp teknologisk kompetanse for å håndtere de nye utfordringene, og dette er gjennomført ved å satse sterkt på å koble inn både master og PhD-kandidater i prosjektet. Til sammen har ti PhD-studenter, to Post Doc-forskere og 54 mastergradstudenter jobbet i eller i nær tilknytning til prosjektet, sammen med forskere fra NTNU og SINTEF.

*Parti fra Tinnelva nær Notodden
Foto: Ånund Killingtveit*



Arbeidet i HydroPEAK har vært organisert innen sju hovedområder (“Work Packages”):

- **WP1:** Scenarier for utvikling av kraftsystemet i Norge og Europa
- **WP2:** Utvikling/Forbedring av hydrologiske modeller
- **WP3:** Utvikling av modeller for bedre kobling av norsk vannkraft og kraftmarked i Europa
- **WP4:** Pumpekraftverk
- **WP5:** Frekvens- og lastregulering ved økt innslag av ikke-regulerbar vind- og solkraft
- **WP6:** Virkning av mer variabel kjøring i tunneler og vannveier
- **WP7:** Virkning av mer variabel kjøring i elver og magasiner
- **WP8:** Is-problemer i elver og vassdrag - virkning av klimaendringer

Prosjektet har hatt en ramme på 36,2 mill. kroner over seks år. I tillegg kommer en betydelig egeninnsats fra NTNU i form av veiledning av master- og PhD-studenter, tilgang til instrumenter og laboratorier, og ved finansiering av tre PhD-studenter som er blitt koblet direkte inn mot sentrale problemstillinger i prosjektet. De tre PhD-studentene har særlig arbeidet med metodeutvikling innenfor tema klimaendringer og vannkraft, et svært sentralt tema der det ikke var gitt midler under FME-bevilgningen.

Denne sammendragsrapporten har som hovedmål å dokumentere hva som er studert, hvilke publikasjoner som er produsert og noen hovedresultat.

Rapporten deles inn i seks hovedbolker som hver for seg inneholder en kort introduksjon med presentasjon av hva som er gjort, og noen av de viktigste resultatene. Deretter følger en komplett liste over publikasjoner og presentasjoner, sortert på tema og tid. Mer detaljert informasjon om publikasjonene kan finnes i databasen Cristin der dette er hentet fra. Publikasjonene er sortert i følgende hovedtyper:

- Doktorgradsavhandlinger
- Diverse rapporter fra SINTEF Energi og NTNU
- Publikasjoner i tidsskrift og bøker med fagfelle vurdering («Peer review»)
- Presentasjoner på konferanser, seminar, workshop og bransjemøter
- Medie-saker (TV, radio, aviser, internett)
- Masteroppgaver ved NTNU (MSc Thesis)

Der det er mulig har vi lagt inn klikkbare lenker, slik at leseren skal kunne klikke seg direkte videre til en artikkel, en masteroppgave eller en rapport. Dessverre er ikke dette mulig for alle referanser, enten av formelle grunner (opphavsrett) eller av praktiske grunner der publikasjonen ikke finnes på nett. De som eventuelt ønsker tilgang til slike publikasjoner kan ta kontakt med forfatter direkte og be om en kopi noe som vanligvis vil være mulig.

Tabell 1. Oppsummering – Publikasjoner produsert i HydroPEAK

Arbeidspakke	Journal Paper m/ review	PhD- Thesis	Post- Doc	Rapport	Konf. Presentasjon	Medie- bidrag	MSc Thesis	Totalt
WP0: Administration and Project Management						6		6
WP1: Utvikling av Scenarier for kraftsystemet i Norge og Europa	4			9	36	23	9	81
WP2: Utvikling/Forbedring av Hydrologiske modeller	9	1			1		4	15
WP3: Utvikling av modeller for bedre kobling mellom kort- og langtids driftsoptimalisering.	1		1		9		4	15
WP4: Pumpekraftverk	3	1			6	3	9	22
WP5: Frekvens- og lastregulering ved økt innslag av pumpekraftverk	4		1		4		2	11
WP6.1: Virkning av mer variable kjøring - tunneler og vannveier	3	1			10	2	3	19
WP6-2: Virkning av mer variable kjøring - Luftpute svingekammer	4	1			12	18	9	44
WP7: Virkning av mer variable kjøring - erosjon i elver	6	1			26		4	37
WP8: Is-problemer i elver og vassdrag - virkning av klimaendringer	8	2			12		5	27
NTNU Egeninnsats (Climate change & Hydropower)	10	3		2	20	2	7	44
Sum totalt	52	10	2	11	136	54	56	321
Typisk lengde (Antall sider/ publikasjon)	10	100		75	20	3	75	
Antall sider (ca)	520	1000		825	2720	162	4200	9427

2 Scenarier for utvikling av kraftsystemet i Norge og Europa

Allerede i 2007/2008 da aktivitetene i CEDREN ble planlagt, var det klart at det ville komme store endringer i det europeiske kraftsystemet mot 2050. Hovedårsaken var og er en politisk vilje innenfor EU til å gjennomføre nødvendige tiltak for å redusere utslipp av drivhusgasser for å motvirke framtidige klimaendringer. I 2009 ble det fastsatt et mål om at 20% av totalt energiforbruk skulle komme fra fornybare kilder innen 2020. Dette ville medføre at hele 34% av all kraftproduksjon måtte komme fra fornybare kilder innen 2020. Senere er det fastsatt mål om videre økning til 34% fornybar-andel innen 2030 (45% for kraft), og en visjon om fornybar-andel på 85-90% innen 2050 (nær 100% for kraft). Norge har gjennom tilslutning til EØS-avtalen valgt å følge disse planene, og bidra til økning i fornybarproduksjon selv om norsk kraftproduksjon allerede var nær 100% fornybar, i hovedsak som vannkraft.

Det var tidlig klart at økningen i fornybar kraftproduksjon i Europa i hovedsak ville måtte komme fra ikke-regulerbare kilder (vind og sol), siden regulerbare fornybare kilder, i hovedsak vannkraft og biokraft, langt på veg var fullt utbygd i EU-landene. En omlegging fra et i hovedsak termisk kraftsystem basert på

Rjukanfossen i Juli 2007. Foto: Ånund Killingtveit

Rjukanfossen er for noen et ikonisk bilde både på hva vannkraften har betydd industrielt og økonomisk for Norge, for andre et bilde på hva dette har kostet i form av tapte naturverdier. Fossen, som nå bare vises i svært vannrike perioder med flom fra Møsvatn, ble tillatt utbygd for vannkraft-produksjon i Vemork og Såheim kraftverk i 1911 og 1915.

I løpet av de litt over 100 år disse to kraftverkene nå har vært i drift har de produsert ca 225 TWh og gitt grunnlag for Norsk Hydro sin store industriutbygging på Rjukan og Herøya. De store magasinene i Møsvatn og Tinnsjø, med over 700 meter høydeforskjell der Rjukanfossen alene utgjør ca tredjeparten, kan kanskje gi grunnlag for framtidig utbygging av et pumpekraftverk for lagring av vindkraft og produksjon av effekt og balansekraft i et fornybart europeisk kraftsystem som vil behøve slike tjenester i stort omfang.

Kraftverkene på Rjukan ble i sin tid bygd ut med internasjonal kapital og med formål å produsere kunstgjødsel for et internasjonalt marked. Kanskje kan dette gjentas, men nå med formål å støtte overgang til et fornybart energisystem i Europa og dermed bidra til å begrense klimaendringene?

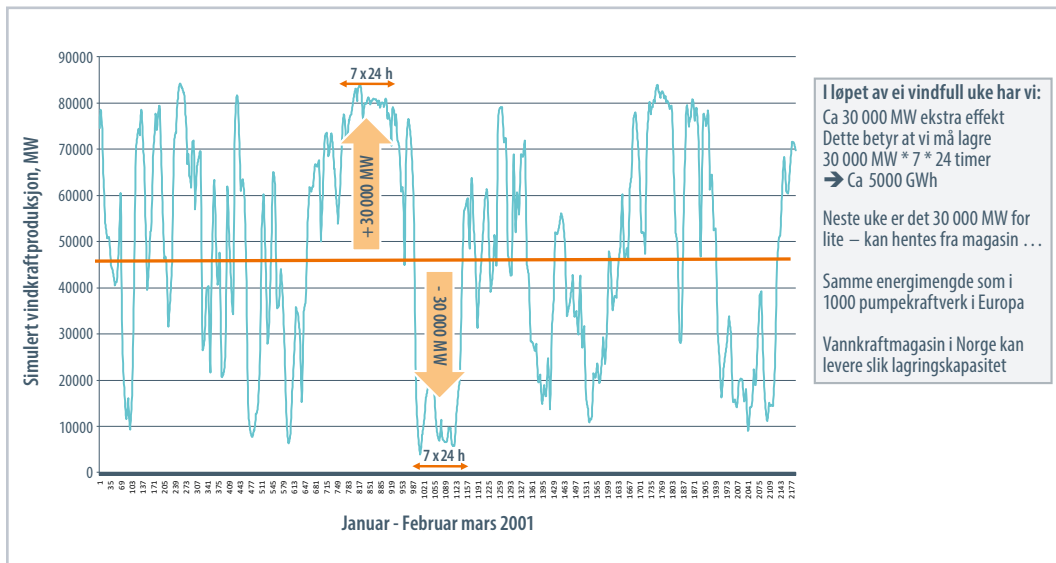


kjernekraft, kull og gass til et fornybart kraftsystem med dominerende innslag av vind og sol, ville føre til store utfordringer på grunn av liten andel regulerbar kraft [2.0], [2.1], [2.2] og [2.3]. For Norge, med sitt nesten 100% vannkraftbaserede system, ville en slik utvikling kunne føre til både nye utfordringer og nye muligheter. CEDREN valgte derfor å definere et prosjekt der en skulle studere mulige framtidige utviklingsbaner for det europeiske kraftsystemet, og hvordan disse kunne påvirke det norske systemet.

Spørsmålet om innfasing av store mengder fornybare kraft fra vind og sol ble også et stadig viktigere tema utenfor Europa, og ble grundig drøftet for eksempel i IPCC-rapporten om fornybar energi (SRREN) [7.1], [7.2], [7.3]. En hovedkonklusjon i SRREN rapporten og mange andre er at det er et økende behov for balansekraft for å fylle inn og balansere variasjonene i vind- og solkraft. Dette vil medføre sterkt økende behov for regulerbar kapasitet, lagring av energi og utbygging av kraftnettet. En illustrasjon på denne problemstillingen vises til **Figur 2.1** og **Figur 2.2**.

Figur 2.1. Beregnet (simulert) produksjon fra alle vindkraftanlegg i Nordsjø-området for en tre måneders vinterperiode i 2001. Total kapasitet er på 94 000 MW [2.0].

Figurene 2.1 og **2.2** illustrerer at det vil oppstå perioder med svært lav kraftproduksjon på grunn av lite vind og sol, og i ekstreme tilfeller som for eksempel 24. mars kl 20 i 2014 der produksjonen fra sol og vind i hele Tyskland var nesten null. Slike situasjoner inntreffer fra tid til annen og må tas med i planene når kraftsystemet skal bygges om og bli fornybart. Dette krever at det finnes



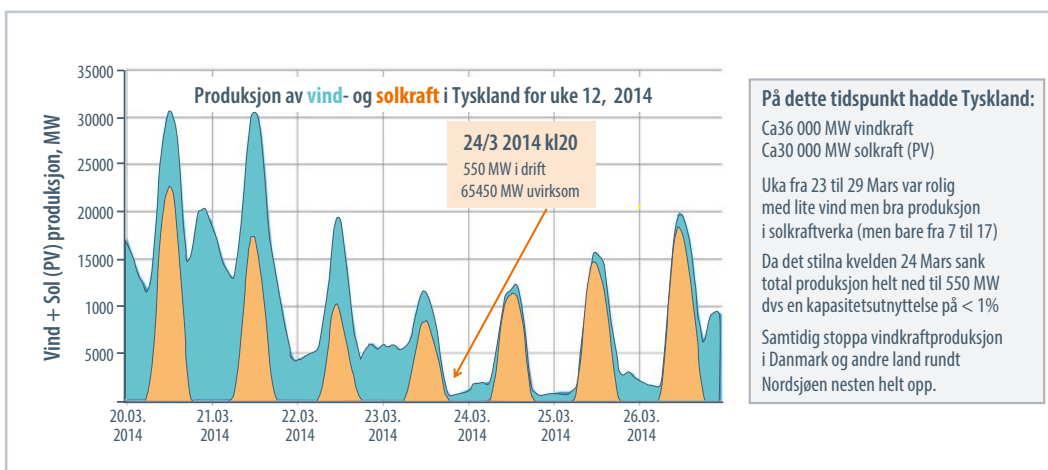
kapasitet fra andre kraftkilder som kan «steppe inn» og sikre oppdekning av produksjonen, og det må finnes lagret energi som kan produseres i tilstrekkelig mengde og lang nok tid inntil vind og sol igjen kan produsere nok.

Det er disse utfordringene som ble studert i det såkalte «Scenarieprosjektet», WP1 i HydroPEAK. Senere ble dette arbeidet utvidet, først i et eget internt prosjekt iverksatt av CEDREN-styret (HydroBalance Fase 1) og i neste omgang i det eksterne HydroBalance-prosjektet som ennå pågår og som avsluttes i 2017. I denne rapporten velger vi derfor i denne introduksjonen å oppsummere resultater bare for tema som ikke blir videreført og rapportert i HydroBalance-prosjektet. Dette gjelder i første rekke resultater fra kartlegging av potensialet og kostnader for nye effekt- og pumpekraftverk i det norske vannkraft-systemet, et tema som ikke er videreført i særlig omfang i HydroBalance-prosjektet.

Resultatet fra kartlegging av potensialet som er utført i CEDREN-regi er dokumentert i flere rapporter: [2.5] – [2.7]. I tillegg er det utført lignende undersøkelser i regi av NVE (Rapport 22/2011) og i en rekke studier utført som masteroppgaver ved NTNU. Vi har samlet sammen og systematisert disse resultatene i **Kap 2.1**.

I alle disse undersøkelsene er det kartlagt muligheter for utvidelser av kapasitet for levering av balansekraft fra det norske vannkraftsystemet. En slik leveranse skjer allerede i dag, med det eksisterende kraftsystemet, men kapasiteten er

Figur 2.2. Målt produksjon av vind- og solkraft i Tyskland for en uke i mars 2014. Total kapasitet av alle tyske vind- og solkraftverk var på denne tid ca 66 000 MW.



begrenset og dersom slik leveranse skal økes må det bygges ut mer kapasitet. Dette kan enten skje ved bygging av helt nye effekt- eller pumpekraftverk eller ved opprustning og utvidelse av eksisterende anlegg. Vi har delt inn i to hovedgrupper:

- Økning av effekt (effektkraftverk)
- Pumpekraftverk for lagring av energi

Effektkraftverk vil kjøres når det er stor etterspørsel etter kraft, for eksempel når det er for lite vind og sol. Disse må ha et stort magasin slik at kjøringen kan skje de timene eller dagene det virkelig er behov, og stoppes når det er lite kraftbehov og samle opp og lagre vannet uten tap i perioder med mye vind og sol. **Figur 2.1** viser en karakteristisk profil i produksjonen av vindkraft, den vil være svært variabel og det vil finnes lange perioder på en uke eller to med ekstra mye eller ekstra lite vind. Det vil derfor være behov for midlertidig lagring av store energimengder (mange TWh) over tidsrom på dager og opp til et par uker. Slik lagring kan i dag i praksis bare kan skje ved lagring av potensiell energi i form av vann i reguleringsmagasin, fordi det ikke finnes batterier som kan lagre slike mengder strøm. Det må være betydelig volum i magasinet slik at kraftverket kan kjøres i lengre perioder. Vi har i alle disse tre studiene bare vurdert å bruke kraftverk med utløp i sjø eller i store innsjøer/magasin, for å unngår store vannføringsendringer og miljøproblem i elver nedstrøms utløpet.

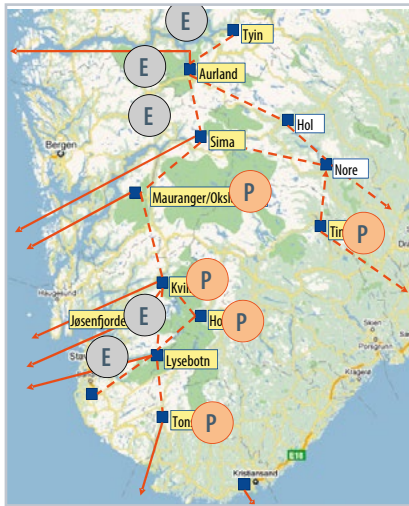
Pumpekraftverk krever to magasin, ett nedstrøms og ett oppstrøms, helst med stor høydeforskjell imellom. Energimengden som kan lagres i magasinene vil være direkte proporsjonal med høydeforskjell og reguleringsvolum. Begge magasin bør ha stort volum slik at en kan pumpe opp og lagre store energimengder når det er overskudd på vind og sol, og produsere balansekraft i perioder når det er lite vind og sol som vist på **Figur 2.1** og **2.2**. Pumpekraftverk er mer fleksible enn effektkraftverk, fordi de både kan bidra med å skape etterspørsel i overskudds-perioder, og produsere kraft i underskuddsperioder.

Merk at i alle de studiene som er gjennomført ved CEDREN, NVE og NTNU er det bare sett på prosjekt der en allerede har eksisterende magasin, og disse er forutsatt brukt innenfor eksisterende reguleringsgrenser og manøvreringsreglement.

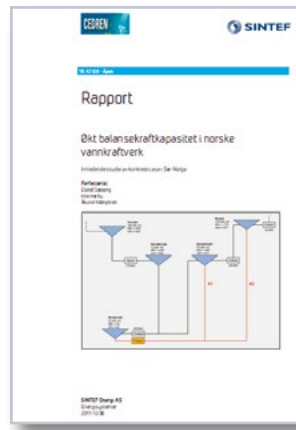
2.1 Potensiale for mer balansekraft i det norske vannkraftsystemet

CEDREN-prosjekter

Studiene som er gjennomført ved CEDREN ble konsentrert til områder sørvest i landet, der det er liten avstand til kontinentet og til eksisterende eller planlagte kabler over Nordsjøen. Til sammen undersøkte vi 22 ulike prosjektalternativ fordelt på ni ulike område, se **Figur 2.3** og **Tabell 2.1**.



HydroPeak - Scenarier
HydroBalance - Fase 1



Figur 2.3. Lokalisering av 12 kraftverksprosjekt som er studert i CEDREN-regi [2.5]. E betyr effektkraftverk og P betyr pumpekraftverk.

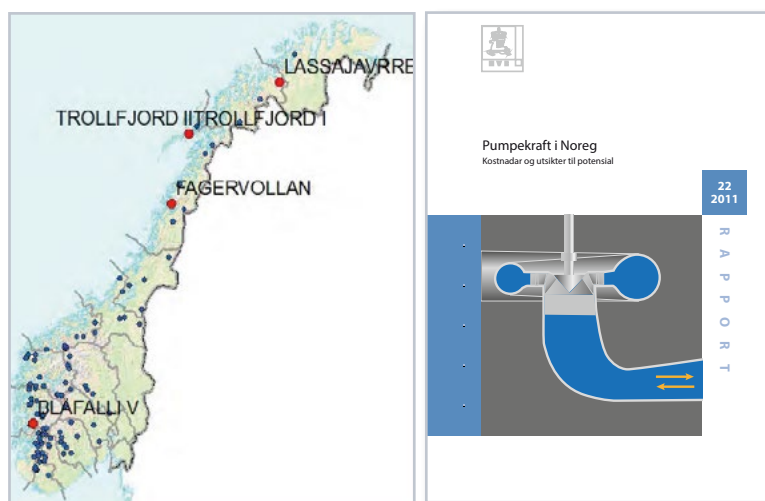
Tabell. 2.1. Noen hoveddata for 12 prosjekter som ble studert i CEDREN-regi [2.5].

Project alternative	Scenario nr			Reservoirs		Average Head (m)
	1	2	3	Upper	Lower	
Tonstad pumped storage power station	1400	1400	1400	Nesjen	Sirdalsvatn	654
Holen pumped storage power station	700	1000	1000	Urarvatn	Bossvatn	631
Kvilldal pumped storage power station	1400	2400	2400	Blåsjø	Suldalsvatn	945
Tyso pumped storage power station	700		1000	Langevatn	Ringedalsvatn	745
Tinnsjø pumped storage power station (C1/C2)	1000	2000	2000	Møsvatn	Tinnsjø	723
Tinnsjø pumped storage power station (C3)		2400	2400	Kallhovd	Tinnsjø	893
Jøsenfjorden hydro storage power station	1400	2400	2400	Blåsjø	Sjø	1013
Lysebotn hydro storage power station	1400	2000	1800	Lyngsvatn	Sjø	669
Mauranger hydro storage power station	400		400	Juklavatn	Sjø	1023
Oksla hydro storage power station	700		700	Ringedalsvatn	Sjø	415
Sy-Sima hydro storage power station	700		1000	Sysenvatn	Sjø	918
Aurland hydro storage power station	700		700	Viddalsvatn	Sjø	909
Tyin hydro storage power station	700		1000	Tyin	Årdalsvatn	1078
Sum Pumped storage	5200	9200	10200			
Sum Storage hydropower	6000	4400	8000			
Sum total capacity increase	11200	13600	18200			

NVE-prosjekter

NVE gjennomførte i 2011 en studie av mulige pumpekraft-prosjekt i Norge, og fant hele 17 steder der en hadde to magasin hvert med volum > 100 Mill.m³ med stor høydeforskjell og liten avstand mellom. Noen av disse var de samme som CEDREN hadde studert.

NVE gjennomførte deretter en detaljert studie med kostnadsberegning for fire mulige prosjekt, tre i Nord-Norge og ett på Vestlandet, se **Figur 2.4**. Kartet til venstre på figuren viser hvor prosjektene var lokalisert.

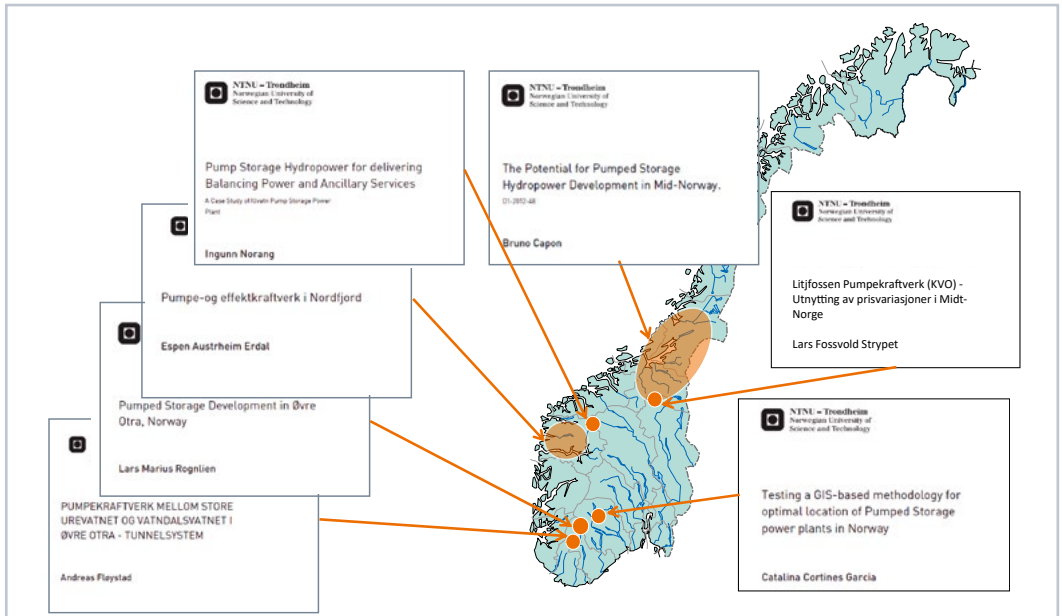


Figur 2.4. Plassering av pumpekraftverk studert av NVE gjengitt i rapport NVE 22/2011: «Pumpekraft i Norge – Kostnader og utsikt til potensial».

NTNU-prosjekter

Et stort antall pumpekraft-prosjekt er studert gjennom masteroppgaver ved NTNU. Noen av disse er utført som enkle overslagsberegninger, andre med komplett kostnadskalkyle omtrent på samme nivå som i NVEs undersøkelse. Et utvalg på til sammen 23 prosjekt ble valgt ut for sammenligning med CEDREN og NVE sine studier, i hovedsak for å kunne sammenligne spesifikke kostnader (kr/kW) for et bredt utvalg av prosjekt, fra svært små (20 MW) og opp til svært store (2400 MW). Plasseringen av disse prosjektene er vist på **Fig 2.5**.

Et eksempel på en typisk lokalitet for et mulig pumpekraftverk er vist på **Figur 2.6**. [2.72].



Figur 2.5. Studier av pumpekraftverk utført som masteroppgaver ved NTNU.



Figur 2.6. Eksempel på et mulig prosjekt mellom to eksisterende store magasin. Pumpekraftverk mellom Vatndalsvatnet og Store Urevatn i Øvre Otra [2.72].

Tabell 2.3 Sammendrag: Noen hovedresultat fra studiene ved CEDREN, NVE og NTNU.

Institusjon	Prosjekt	Alternativ	Fall (m)	Effekt MW	Kostnad, kr/kW
NVE	Fagervollan	Fagervollan V1	290	1200	3930
NVE		Fagervollan V2	290	485	3740
NVE		Fagervollan V3	260	62	7064
NVE	Lassajavvre	Lassajavvre V1	145	1200	3985
NVE		Lassajavrre V2	145	400	4680
NVE		Lassajavrre V2.1	145	400	5045
NVE		Lassajavrre V3	145	20	19800
NVE	Trollfjord	Trollfjord V1	265	50	15120
NVE		Trollfjord V1.1	265	104	8970
NVE		Trollfjord V1.2	285	460	5210
NVE		Trollfjord V2	265	36	15940
NVE	Blåfalli	Blåfalli V1	120	960	4350
NVE		Blåfalli V2	120	340	5029
NVE		Blåfalli V3	120	16	20190
CEDREN	Sira-Kvina (Tonstad)	A2 Tonstad (Nesjen-Sirdalsvann)	654	1400	3200
CEDREN	Øvre Otra	B3 Holen (Urevatn-Botsvatn)	631	700	2763
CEDREN		B3b	631	1000	
CEDREN	Ulla-Førre (Kvilldal)	B6a Kvilldal (Blåsjø-Suldalsvatn)	945	1400	2771
CEDREN		B6b	945	2400	
CEDREN	Tinnsjø/Rjukanverkene	C1 Tinnsjø (Møsvatn-Tinnsjø)	723	1000	3627
CEDREN		C2 Tinnsjø (Møsvatn – Tinnsjø)	723	2000	
CEDREN		C3 Tinnsjø (Kallhovd-Tinnsjø)	893	2400	
CEDREN	Tysso	E3 Tysso (Langevatn-Ringedalsvatn)	745	700	2063
CEDREN		E3b	745	1000	
NTNU	Fløystad (2012)	Urevatn/Vatnedalsv.	425	1600	2350
NTNU	Austrheim Erdal (2012)	Isavatn	485	50	6200
NTNU		Isavatn	485	100	4600
NTNU		Isavatn	485	200	3650
NTNU		Svartevatn	290	50	5800
NTNU		Svartevatn	290	100	5000
NTNU		Svartevatn	290	200	4100
NTNU	Rognlien (2012)	Botsvatn/Urevatn	624	500	5200
NTNU		Botsvatn/Urevatn	624	1000	4300
NTNU		Botsvatn/Urevatn	624	1500	3730
NTNU	Capon (2012)	Limingen/Tunnsjø	65	1038	1943
NTNU		Bogna 1	294	1103	1865
NTNU		Bogna 2	294	1109	1632
NTNU		Slind/Julskaret	304	432	2688
NTNU		Vessingfoss	71	547	1836
NTNU		Stugusjø/Nesjø	130	1001	1763
NTNU		Sylsjø/Nesjø	145	384	2278
NTNU		Nesjø/Selbusjø	574	1020	2128
NTNU		Sørungen/Selbusjø	304	487	1696
NTNU	Catalina-Cortines (2013)	Songa/Totak	287	1200	2108
NTNU	Norang (2015)	Ilvatn/Fivlemyr	330	48	12700
NTNU		Ilvatn/Fivlemyr	330	48	13395
NTNU		Ilvatn/Fivlemyr	330	75	9333

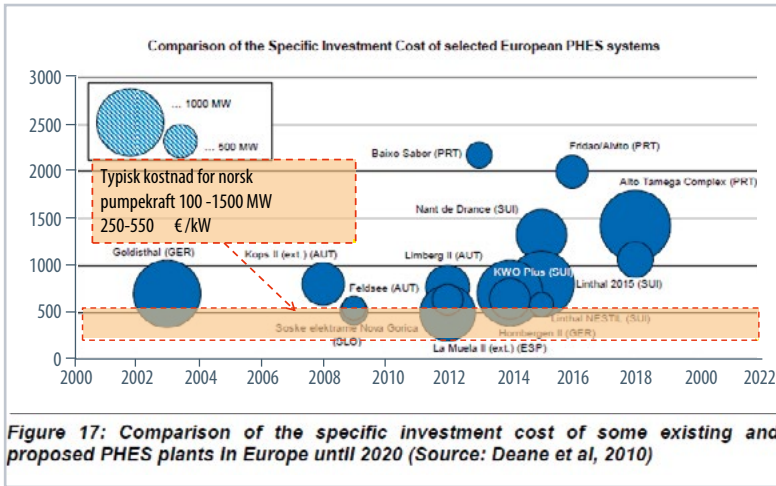
2.4 Sammenligning av kostnader for norske pumpekraftverk med kostnader fra andre prosjekt i EU og USA

Typiske kostnader for norske pumpekraftverk vist i **Figur 2.8** ligger i området 2500 - 5000 kr/kW over et bredt område, fra ca 100 MW og opp til ca 1500 MW. Omregnet blir dette en typisk kostnad på 250 - 550 €/kW. Det kan være interessant å sammenligne dette med kostnader i andre land.

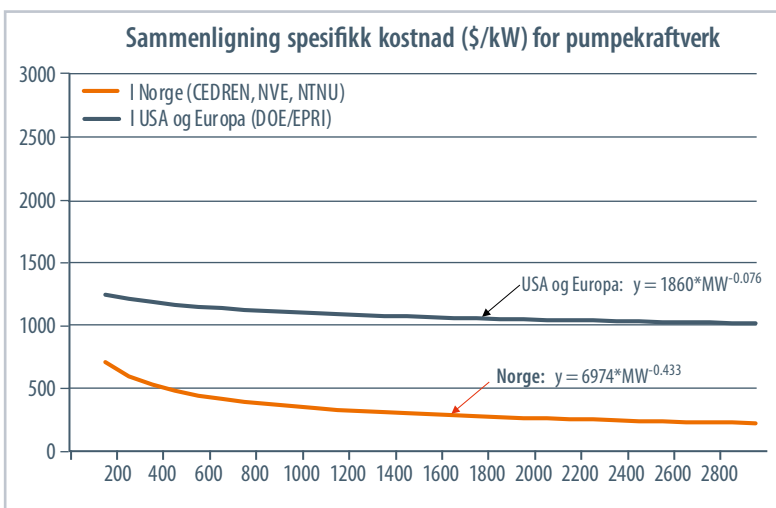
Figur 2.9 viser en slik sammenligning der kostnader (€/kW) er vist for en rekke pumpekraftverk i Europa og USA, bygget i tidsrommet fra 2000 opp til ca 2015 og videre for kjente anlegg under planlegging eller bygging fram mot 2018.

Hver av de blå sirklene representerer ett anlegg, posisjonen (senter) viser når det er eller planlegges bygget, og spesifikk kostnad (€/kW). Størrelsen på sirkelelen viser installert effekt, vi ser at dette stort sett er anlegg fra ca 500 og opp mot ca 1000 MW.

Til sammenligning ligger kostnadene for norske anlegg i det området som er merket gult. Vi ser at kostnadene for de norske anleggene ligger lavere og til dels betydelig lavere enn for andre pumpekraftanlegg. En viktig grunn er selvsagt at alle de norske anleggene kan bruke eksisterende magasin. Det utgjør en betydelig kostnad for de fleste andre anlegg. I tillegg vil miljøkonsekvenser og motstand mot bygging for det meste være knyttet til magasinene. Ved å bruke allerede eksisterende magasin vil norske pumpekraftverk kunne ha en betydelig fordel, også miljømessig, fordi en unngår å demme ned nye områder.



Figur 2.9. Sammenligning mellom typiske kostnader for pumpekraftverk i Europa og USA (blå sirkler) med kostnad for undersøkte norske anlegg (i det gule området). Figur 2.10 viser en tilsvarende sammenligning mellom våre tall for Norge og kostnader oppgitt i en rapport utgitt i USA i 2013. Data for de enkelte prosjektene rapporten bygger på er vist i bakgrunnen, mens trendlinjer er vist foran, enhet er her \$/kW for begge. Både Figur 2.9 og Figur 2.10 viser klart at norske pumpekraftverk mellom eksisterende magasin kan bygges til langt lavere kostnad enn i andre land.



Publikasjoner fra kapittel 2

Fagfellevurderte publikasjoner

[2.0] Killingtveit, Ånund.

On the Transition from Fossil to Renewable Energy in Europe - How can Norway Contribute? I: Norwegian Energy Policy in Context of the Global Energy Situation. Novus Forlag 2012 ISBN 978-82-7099-705-3. s. 55-83

<http://www.ntva.no/wp-content/uploads/2014/01/norwenergyglobalcontext.pdf>

[2.1] Harby, Atle; Sauterleute, Julian; Korpås, Magnus; Killingtveit, Ånund; Solvang, Eivind; Nielsen, Torbjørn Kristian.

Pumped Storage Hydropower. I: Transition to Renewable Energy Systems. Wiley-VCH Verlagsgesellschaft 2013 ISBN 978-3-527-33239-7. s. 597-617

<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-3527332391.html>

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783527673872.ch20/summary>

[2.2] Killingtveit, Ånund.

Hydroelectric Power. I: Future Energy - Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet. Elsevier 2013 ISBN 978-0-08-099424-6. s. 453-470

<https://www.elsevier.com/books/future-energy/lletcher/978-0-08-099424-6>

[2.3] Killingtveit, Ånund.

Hydropower. I: Transition to Renewable Energy Systems. Wiley-VCH Verlagsgesellschaft 2013 ISBN 978-3-527-33239-7. s. 381-401

<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-3527332391.html>

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783527673872.ch29/summary>

Rapporter

- [2.4] **Grøv, Eivind; Bruland, Amund; Nilsen, Bjørn; Panthi, Krishna; Lu, Ming.**
Developing future 20 000 MW hydroelectric power in Norway. Possible concepts and need of resources. SINTEF Building and Infrastructure SBF2011A0021. ISBN: 978-82-14-05151-3
<http://cedren.nina.no/Portals/Cedren/Scenario/Developing%20future%2020000MW%20hydro%20electric%20power%20in%20Norway.pdf>
- [2.5] **Solvang, Eivind; Harby, Atle; Killingtveit, Ånund.**
Økt balansekraftkapasitet i norske vannkraftverk Innledende studie av konkrete case i Sør-Norge. Trondheim: SINTEF Energi AS 2011 (ISBN 978-82-594-3491-3) 84 s.
- [2.6] **Solvang, Eivind; Harby, Atle; Killingtveit, Ånund.**
Increasing balance power capacity in Norwegian hydroelectric power stations. : SINTEF Energi AS 2012 (ISBN 9788259435194) 86 s. SINTEF Energi. Rapport(TR A7195)
<http://www.cedren.no/Portals/Cedren/Pdf/HydroBalance/TR%20A7195%20Increasing%20balance%20power.pdf?ver=2013-04-26-083814-697>
- [2.7] **Solvang, Eivind; Harby, Atle; Killingtveit, Ånund.**
Økt balansekraftkapasitet i norske vannkraftverk SINTEF Energi AS 2012 (ISBN 9788259434913) 84 s. SINTEF Energi. Rapport(TR A7126)
<http://www.cedren.no/Portals/Cedren/Pdf/TR%20A7126%20%C3%98kt%20balansekraftkapasitet%20i%20norske%20vannkraftverk.pdf?ver=2013-04-26-084155-157>
- [2.8] **Gabrielsen, Roy H.; Aam, Sverre; Bendiksen, Kjell Hugo; Faanes, Hans Haakon; Hope, Einar; Rytter, Erling; Åm, Knut; Killingtveit, Ånund; Johnson, Hein.**
A National Energy Strategy 1913-1917. Oslo: Norwegian Academy of Technological Sciences (NTVA) 2013 11 s.
http://www.ntva.no/wp-content/uploads/2013/12/energistrategi_engelsk.pdf
- [2.9] **Killingtveit, Ånund; Grøv, Eivind; Nilsen, Bjørn.**
Underground Works and Clean Energy in Indonesia. Trondheim: NTNU 2014 (ISBN 978-82-995162-4-2) 85 s.
- [2.10] **Solvang, Eivind; Charmasson, Julie; Sauterlaute, Julian; Harby, Atle; Killingtveit, Ånund; Egeland, Helene; Andersen, Oddgeir; Ruud, Øystein; Aas, Øystein.**
Norwegian hydropower for large scale electricity balancing needs. Pilot study of technical, environmental and social challenges. Trondheim: SINTEF Energy research 2014 (ISBN 978-82-594-3524-8) 100 s.
<http://hdl.handle.net/11250/2384337>
- [2.11] **Killingtveit, Ånund; Grøv, Eivind; Nilsen, Bjørn.**
Underground Works and Clean Energy in Indonesia - Report from Workshop in Trondheim 10-12 February. Trondheim: NTNU 2015 (ISBN 978-82-7598-090-6) 288 s.
- [2.12] **Nie, Linmei; Chang, Tong; Zhengping, Zhang; Killingtveit, Ånund.**
Simulating potentials of using hydro and pumped storage hydropower to balancing the grid system demand in China. A case study in Baishan and Hongshi hybrid pumped storage hydropower station, Northeast, China. Oslo: CSDI WaterTech- Centre for Sustainable Development and Innovation of Water Technology 2016 53 s.

Konferanser og seminar

- [2.13] **Killingtveit, Ånund.**
Om CEDREN - Et forskningsssenter for miljøvennlig energi (Behov for tunneler og fjellrom ved utbygging av 20 000 MW ny vannkraft i Norge). NFF "Professormøte" i Trondheim; 2011-03-21 - 2011-03-21
- [2.14] **Catrinu, Maria; Solvang, Eivind; Korpås, Magnus; Killingtveit, Ånund.**
Perspectives on hydropower's role to balance non-regulated renewable power production in Northern and Western Europe. HYDRO 2011; 2011-10-17 - 2011-10-20
- [2.15] **Killingtveit, Ånund.**
Norge som Europas grønne strømleverandør/batteri - Muligheter og utfordringer. Faggruppe for Energi, Industri og miljø (FEIM); 2011-11-09 - 2011-11-09
- [2.16] **Killingtveit, Ånund.**
Design of Future Pumped Storage Hydropower in Norway. German Norwegian Seminar on Hydropower; 2011-11-16 - 2011-11-16
- [2.17] **Alfredsen, Knut; Killingtveit, Ånund.**
Utilizing hydropower for load balancing non-storable renewable energy sources – technical and environmental challenges. AGU Fall Meeting 2011; 2011-12-05 - 2011-12-09
- [2.18] **Harby, Atle; Killingtveit, Ånund; Solvang, Eivind; Korpås, Magnus.**
Opportunities and challenges for hydropower development in the high north. Polar Might - Energies of the High North; 2012-01-22 - 2012-01-27
- [2.19] **Killingtveit, Ånund.**
Omlagging til fornybar energi i Europa - Norges rolle? Norsk Energipolitikk i lys av den globale energisituasjonen; NAVF/NTVA/NFR møte, Oslo 2012-02-01 - 2012-02-01
- [2.20] **Harby, Atle; Killingtveit, Ånund; Belsnes, Michael Martin; Charmasson, Julie; Egeland, Helene; Ruud, Audun; Sauterleute, Julian; Solvang, Eivind.**
Opportunities and challenges for hydro-balancing from Norwegian reservoirs. TECHNOPORT 2012 and RERC 2012; 2012-04-16 - 2012-04-18
- [2.21] **Sauterleute, Julian; Charmasson, Julie; Killingtveit, Ånund; Harby, Atle; Solvang, Eivind.**
Simulating Pumped Storage Operation in Reservoirs Used for Balancing of Wind Power. TECHNOPORT 2012 and RERC 2012; 2012-04-16 - 2012-04-18
- [2.22] **Killingtveit, Ånund.**
Storskala balansekraftutveksling mellom norsk vannkraft og europeisk vindkraft - muligheter og utfordringer. Markedskraft 20 Year Anniversary Conference; 2012-09-06 - 2012-09-06
- [2.23] **Harby, Atle; Sauterleute, Julian; Korpås, Magnus; Killingtveit, Ånund; Solvang, Eivind; Nielsen, Torbjørn Kristian.**
Pumped Storage Hydropower. 3rd International Conference on Energy Process Engineering; 2013-06-04 - 2013-06-06
- [2.24] **Sauterleute, Julian; Harby, Atle; Killingtveit, Ånund; Solvang, Eivind; Korpås, Magnus; Charmasson, Julie.**
Pumped storage hydropower in Norway - Flexible generation and storage to balance variable renewable energy. DTU International Energy Conference 2013; 2013-09-10 - 2013-09-12
- [2.25] **Sauterleute, Julian; Harby, Atle; Killingtveit, Ånund; Solvang, Eivind; Korpås, Magnus; Charmasson, Julie.**
Hydro and balancing - Flexible generation and storage from Norwegian hydropower to balance variable renewable energy. 6. Niedersächsische Energietage; 2013-10-16 - 2013-10-17
- [2.26] **Killingtveit, Ånund.**
Hva skjer når vinden stilner i Europa? Behovet for energifleksibilitet og kapasitetsmarkeder i det Nord-Europeiske kraftmarkedet. Vannkraft som balansekraft. Energiewende – Tysk gjennomføringskraft?; 2014-02-26 - 2014-02-26
- [2.27] **Killingtveit, Ånund.**
Hydropeaking - Ei utfordring for norske vannvegar?. Produksjonsteknisk konferanse 2014 (PTK 2014); 2014-03-03 - 2014-03-05
- [2.28] **Sauterleute, Julian Friedrich; Harby, Atle; Killingtveit, Ånund; Solvang, Eivind; Charmasson, Julie.**
Flexible generation and energy storage by Norwegian hydropower to balance variable renewable energy. Energy Storage 2014; 2014-05-14 - 2014-05-15
- [2.29] **Sauterleute, Julian Friedrich; Harby, Atle; Killingtveit, Ånund; Solvang, Eivind; Charmasson, Julie.**
Flexible generation and energy storage by Norwegian hydropower to balance variable renewable energy. Energy Storage 2014; 2014-05-14 - 2014-05-15

Konferanser og seminar (forts.)

- [2.30] Harby, Atle; Sauterleute, Julian; Killingtveit, Ånund; Solvang, Eivind.
Mechanical Energy Storage - Status and future development. RERC 2014; 2014-06-16 - 2014-06-17
- [2.31] Zinke, Peggy; Sauterleute, Julian Friedrich; Harby, Atle; Solvang, Eivind; Charmasson, Julie; Killingtveit, Ånund; Arnesen, Fredrik.
Assessment and mapping of increasing balance power capacity in Norwegian hydroelectric power stations. 10th International Symposium on Ecohydraulics (ISE2014), China Special Session; 2014-06-23 - 2014-06-27
- [2.32] Killingtveit, Ånund; Gurmessa Amenu, Tolawak.
Integration of wind and hydro power in Ethiopia: Large opportunities for a developing country. World Water Week in Stockholm - Water as energy storage for better integration of renewables; 2014-09-04 - 2014-09-04
- [2.33] Harby, Atle; Sauterleute, Julian Friedrich; Killingtveit, Ånund; Solvang, Eivind.
HYDROPOWER FOR ENERGY STORAGE AND BALANCING RENEWABLES. International Conference on Hydropower for Sustainable Development; 2015-02-05 - 2015-02-07
- [2.34] Killingtveit, Ånund.
Norge som Europas billigste batteri?. Eiermøte for Agder Energi; 2015-02-20 - 2015-02-20
- [2.35] Killingtveit, Ånund.
Vind og vann - Hand i hand?. Fornybarseminar i Trondheim; 2015-04-21 - 2015-04-21
- [2.36] Killingtveit, Ånund.
Norge som Europas billigste batteri. Høstmøte i Stavanger Næringsforening; 2015-10-22 - 2015-10-22
- [2.37] Lia, Leif; Aas, Mikal Naug, Killingtveit, Ånund.
Possible 6 – 60% increased generation from upgrading and extension projects. HYDRO2015; 2015-10-26 - 2015-10-28
- [2.38] Norang, Ingunn; Killingtveit, Ånund.
Pumped-storage hydropower for delivering balancing power and ancillary services: A case study in Fortun hydropower system. HYDRO2015; 2015-10-26 - 2015-10-28
- [2.39] Killingtveit, Ånund.
Tekniske utfordringer for mer fleksibel vannkraft. Noen utvalgte resultater fra prosjektet HydroPEAK. Seminar for NVE/OED/DN CEDREN - Status og resultater; 2016-01-19 - 2016-01-19
- [2.40] Killingtveit, Ånund; Harby, Atle.
The need for flexibility and energy storage. Hydropower and its future role; JRC-CEDREN Seminar Istanbul 2016-01-21 - 2016-01-22
- [2.41] Killingtveit, Ånund; Harby, Atle; Bakken, Tor Haakon.
Vannkraftens rolle i et globalt energiperspektiv – status, utviklingstrekk og prognoser for utviklingen mot 2050. Produksjonsteknisk konferanse 2016 (PTK2016); 2016-03-07 - 2016-03-09
- [2.42] Killingtveit, Ånund; Harby, Atle; Korpås, Magnus.
Norge som leverandør av balansekraft. Produksjonsteknisk konferanse 2016 (PTK2016); 2016-03-07 - 2016-03-09
- [2.43] Killingtveit, Ånund.
Energiutbygging - hjelper det klimaet?. SRN-Seminar: Natur, klima og energi; 2016-04-29 - 2016-04-29
- [2.44] Killingtveit, Ånund.
Energi og teknologi: Hva står til rådighet; fordeler og ulemper - Vannkraft. Energiseminar 24. mai 2016. Mot fornybar kraft og "det grønne skiftet": Norges energipolitiske muligheter. Refleksjoner omkring regjeringens energimelding; 2016-05-24 - 2016-05-24
- [2.45] Killingtveit, Ånund.
Norway as a green battery to Europe (hydropower balancing mechanism). NorRen Summer School 2016: The Norwegian sustainable energy system; 2016-08-08 - 2016-08-13
- [2.46] Killingtveit, Ånund.
Teknologi for fleksibel vannkraft. CEDREN avslutningsseminar; 2016-10-25 - 2016-10-26
- [2.47] Killingtveit, Ånund.
Norges ressurser/muligheter, magasiner, pumpekraft etc. NTVA møte -Norge som Europas grønne batteri - Visjoner og realiteter; 2016-11-16 - 2016-11-16
- [2.48] Killingtveit, Ånund.
Norge som leverandør av balansekraft. Internt seminar hos OED; 2016-12-19 - 2016-12-19

Mediaomtale

- [2.49] **Killingtveit, Ånund.**
Om IPCC rapport for "Renewable Energy". NRK P1 program "Verdt å vite" [Radio] 2009-09-02
- [2.50] **Killingtveit, Ånund.**
Vi kan bli Norges grønne batteri. Adresseavisen [Avis] 2009-10-13
- [2.51] **Killingtveit, Ånund; Harby, Atle.**
Grenzenloses Kabelnetz - Durchbruch für Ökostrom?. Bayerische Rundfunk [TV] 2010-05-16
- [2.52] **Doorman, Gerard L.; Killingtveit, Ånund; Nielsen, Torbjørn Kristian.**
Norsk vannkraft og klimatrusselen. Adresseavisen 2010 s. 43-43
- [2.53] **Olsen, Claude R; Killingtveit, Ånund.**
Overgangen til fornybar setter kraftsystemet på prøve. Forskningsrådet - RENERGI sidene [Internett] 2010-10-11
- [2.54] **Grøv, Eivind; Killingtveit, Ånund.**
Megautfordringer for tunnelbransjen. Byggeindustrien 2011 ;Volum 8. s. 108-110
- [2.55] **Killingtveit, Ånund.**
Norsk pumpekraft gir tysk balanse. VOLT 2011 ;Volum 8.(6) s. 18-23
- [2.56] **Killingtveit, Ånund.**
Pumpekraftverk lagrer mest. VOLT 2011 ;Volum 8.(6) s. 24-27
- [2.57] **Killingtveit, Ånund; Abelsen, Atle.**
Nå er det opp til politikerene. Energiteknikk [Avis] 2011-05-31
- [2.58] **Killingtveit, Ånund.**
Håper på vind og vann. Dagens Næringsliv [Avis] 2012-01-25
- [2.59] **Killingtveit, Ånund; Eliseussen, Gunn-Mari.**
Om energi i nordområdene. NRK Troms [Radio] 2012-01-24
- [2.60] **Killingtveit, Ånund.**
Omlegging til fornybar energi i Europa: Norges rolle. <http://energiogklima.no/kommentar/omlegging-til-fornybar-ene> [Internett] 2012-02-13
- [2.61] **Killingtveit, Ånund; Haugan, Idun.**
Klimakampen. Gemini [Internett] 2013-09-27
- [2.62] **Killingtveit, Ånund; Haugan, Idun.**
Klimakrigen. Forskning.no [Internett] 2013-09-27
- [2.63] **Killingtveit, Ånund; Fairley, Peter.**
Norway Wants to Be Europe's Battery. A new HVDC line will let Europe store more wind energy in Norway's hydropower system. IEEE Spectrum [Internett] 2014-10-21
- [2.64] **Lie, Øyvind; Vereide, Kaspar; Killingtveit, Ånund; Bråtveit, Kari.**
Effektkjøring gir fare for turbinhavari. Teknisk Ukeblad 2014 ;Volum 161.(4) s. 62-63
- [2.65] **Reynolds, Patrick; Killingtveit, Ånund.**
Pumped storage: underground challenges. Water Power and Dam Construction [Internett] 2014-07-02
- [2.66] **Sampson, Ben; Killingtveit, Ånund.**
Engineering Europe's 'green battery' How Norway is tapping into its hydroelectric resources to store renewable power. <http://www.imeche.org/news/engineering/engineering-europe-s-> [Internett] 2015-07-31
- [2.67] **Korpås, Magnus; Killingtveit, Ånund.**
Viktig rolle i et utvidet Europa. Adresseavisen 2015 s. 33-33
- [2.68] **Barstad, Haakon; Killingtveit, Ånund; Vereide, Kaspar.**
Her forberedes pumpekraften. Europower [Fagblad] 2015-10-16
- [2.69] **Bjartnes, Anders; Killingtveit, Ånund.**
Mer kraft i vannet. 2 grader C ISSN 1893-7829 [Fagblad] 2015-11-18
- [2.70] **Knight, Helen; Killingtveit, Ånund.**
Breathing new life into hydroelectrics. New Engineer [Tidsskrift] 2016-04-22
- [2.71] **Killingtveit, Ånund.**
Saltstraumen - minutt for minutt - Energipotensialet. NRK 1 [TV] 2016-05-07

Masteroppgaver (“Diplomoppgaver”) ved NTNU

[2.72] Andreas Fløystad (2012)

Pumpekraftverk mellom Store Urevatnet og Vatndalsvatnet i Øvre Otra – tunnelsystem

Veiledere: Leif Lia og Ånund Killingtveit

<http://hdl.handle.net/11250/242303>

[2.73] Espen Austrheim Erdal (2012)

Pumpe- og effektkraftverk i Nordfjord

Veiledere: Leif Lia og Ånund Killingtveit

<http://hdl.handle.net/11250/242309>

[2.74] Birgit Longva (2012)

Nytteverdien av å etablere pumpe i et eksisterende vannkraftsystem

Veiledere: Torbjørn Nielsen og Knut Solnørdal

[2.75] Lars Marius Rognlien (2012)

Pumped storage development in Øvre Otra, Norway

Veileder: Ånund Killingtveit

<http://hdl.handle.net/11250/242244>

[2.76] Bruno Capon (2012)

The potential for Pumped Storage hydropower development in Mid-Norway.

Veiledere: Ånund Killingtveit og Leif Lia

<http://hdl.handle.net/11250/242255>

[2.77] Ingunn Norang (2015)

Pump Storage Hydropower for delivering Balancing Power and Ancillary Services – A Case Study of Illvatn Pump Storage Power Plant

Veiledere: Ånund Killingtveit og Leif Lia

<http://hdl.handle.net/11250/2350526>

[2.78] Mikal Naug Aas (2015)

Opprustning og utviding av kraftverk (O/U) – Potensiale.

Veiledere: Leif Lia og Ånund Killingtveit

[2.79] Florence Gimbo (2015)

Verification of a GIS-based system for identification of potential hydro power plant sites in Uganda. Veiledere: Ånund Killingtveit Emmanuel Jjunju

<http://hdl.handle.net/11250/2350523>

[2.80] Lars Fossvold Strypet (2016)

Litjofossen Pumpekraftverk (KVO) - Utnytting av prisvariasjoner i Midt-Norge

Veileder: Leif Lia

<http://hdl.handle.net/11250/2408867>

[2.81] Catalina Cortines Garcia (2013)

Testing a GIS-based methodology for optimal location of Pumped Storage power plants in Norway.

Veileder: Ånund Killingtveit

<http://hdl.handle.net/11250/242424>

3 Modeller for drift og planlegging

3.1 Forbedring av modeller for tilsigsprognoser

Hydrologiske modeller for prognosering av tilsig fra et område (nedbørfelt) til et vannkraftverk har blitt et viktig verktøy for å optimalisere produksjonen siden slike modeller ble introdusert i Norge på midten av 70-tallet. Den mest brukte modellen, HBV-modellen, brukes i dag til å optimalisere drift for praktisk talt alle norske kraftverk. I tillegg er modellen brukt for flomvarsling og drift av vannforsyning. Modellen må kalibreres, dvs tilpasses til hvert felt, basert på målt vannføring eller tilsig gjennom en periode på noen år, typisk fem år eller mer. Modellen brukes i hovedsak med tidsoppløsning én dag, men finnes og brukes også for kortere tidsoppløsning, ned mot én time.

I et framtidig kraftsystem med økende andel ikke-regulerbar vind- og solkraft er det ventet at vannkraftsystemet må kunne reguleres oftere og raskere for å kompensere for svingningene i de andre fornybare (sol og vind). Dette vil trolig medføre økt krav til bedre tilsigsprognoser, også for felt der det i dag ikke er mulig å kalibrere HBV-modeller, enten fordi det mangler observasjoner av tilsig eller fordi tidsoppløsning er for dårlig. Det er derfor stor interesse for å lage bedre prognosemodeller og det er spesielt det som kalles «respons-rutine» som må forbedres. Dette er den delen av modellen som beregner hvordan tilsiget endrer seg over tid og styrer selve tidsforløpet. Målsetningen er å kunne kalibrere modellene slik at parametrene gjelder for flere vassdrag i en region, ikke bare for et enkelt felt. Det vil da være mulig å sette opp modeller også for umålte felt, basert disse regionale parametre.



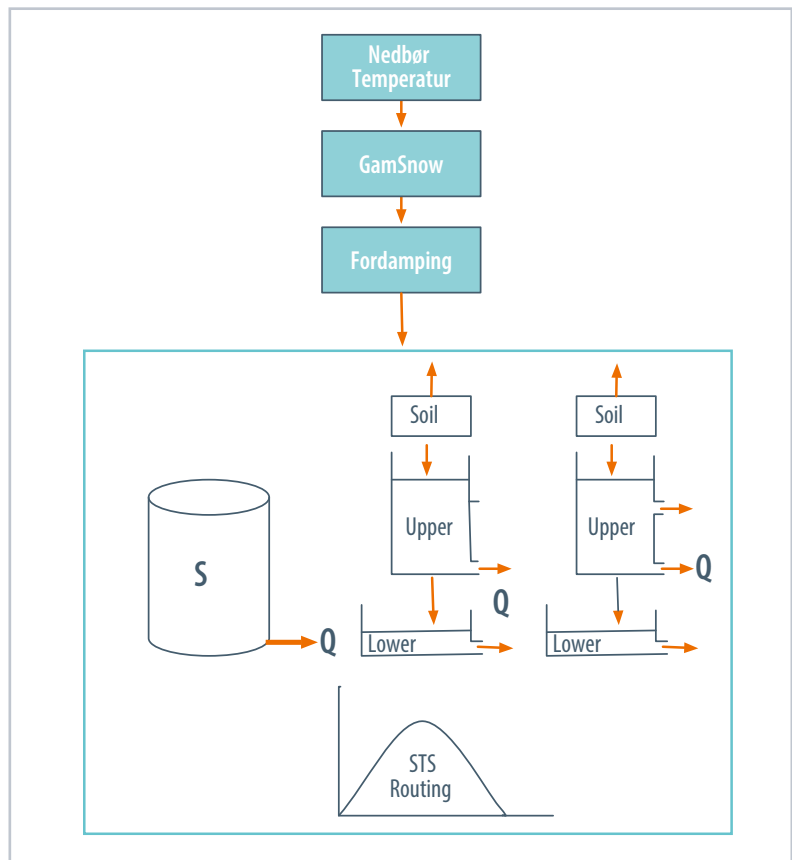
Hokfossen målestasjon i Sagelva-feltet. Foto: Ånund Killingtveit

Utvikling av databaserte hydrologiske modeller startet i USA omkring 1960. I Norge og Sverige kom utviklingen for alvor i gang i 1972, og formålet var i hovedsak å lage prognoser for å forbedre drift av vannkraftverkene. Et samarbeid mellom NTH, SINTEF og Trondheim Elektrisitetsverk (TEV) førte til utvikling av den første modellen i 1972, for beregning av tilsig til denne målestasjonen i NTHs hydrologiske forskningsfelt ved Jonsvatnet utenfor Trondheim.

Sagelva-feltet var et norsk bidrag til den Internasjonale Hydrologiske Dekade (IHD) fra 1965–1974. Feltet ble utstyrt med moderne måleutstyr for å kartlegge alle komponenter i vannbalansen, noe som raskt viste seg å være svært viktig for utvikling av hydrologiske modeller. Data som er samlet inn her er viktige for studier av hydrologiske prosesser og utvikling av nye modelltyper, blant annet i CEDREN regi.

Hovedmålsetning for PhD-prosjektet kan oppsummeres i tre hovedpunkter:

- 1 Å utvikle rutiner for å simulere avrenning med kort tidsoppløsning:
 - Utprøving av ulike avløpsmodeller
 - Modellopløsning
 - Krav til data
 - Teste ulike kalibreringsmetoder
 - Implementering i ENKI- rammeverket
- 2 Forsøk med både lokal og regional kalibrering og evaluering
- 3 Bruke regional metode for å simulere avrenning i umålte felt



Figur 3.1. Modellstruktur med tre alternative respons-rutiner.

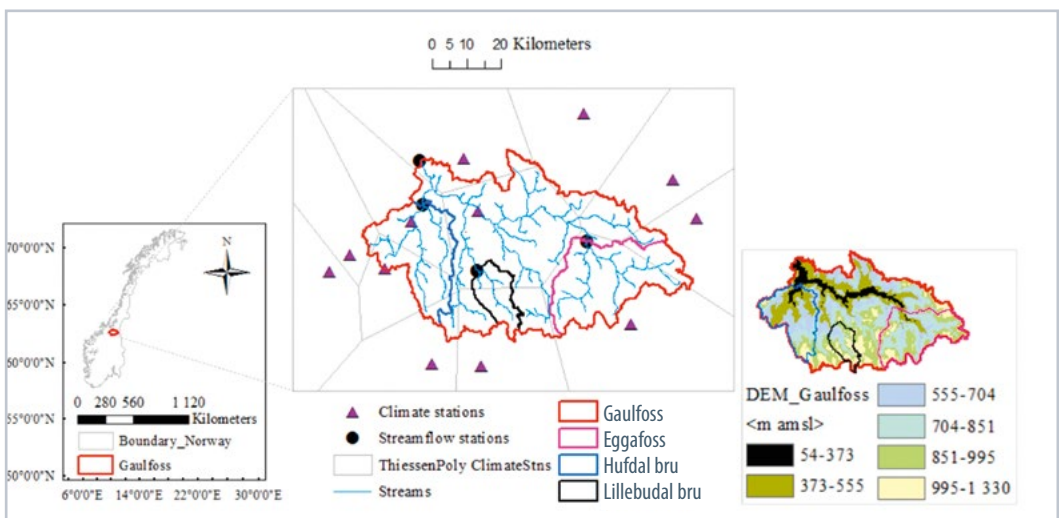
Uttesting av alternative responsrutiner

Forsøk med bruk av alternative respons-rutiner er illustrert på **Figur 3.1**. Alle modell-varianter ble etablert innenfor ENKI-rammeverket. På figuren er vist tre eksempel på respons-rutiner som alle er i bruk i hydrologiske modeller for å beregne avløp (Q):

- Kirchner (venstre)
- HBV-ulineær (midten)
- HBV-lineær (høyre)

Input til disse tre ulike responsfunksjonene er den samme, og beregnes fra nedbør og temperatur, snøakkumulering og avsmelting samt fordampning. De tre ulike responsfunksjonene gir noe ulikt resultat og ved å sammenligne simulert avløp med observert avløp kan en vurdere hvilken variant som er best. I denne sammenligningen bør det også tas hensyn til at det er ulik kompleksitet og antall parametere i responsrutinene, en enklere modell er alltid å foretrekke hvis den gir samme resultat som en mer kompleks modell. Uttesting av modellen er i hovedsak utført i Gaula-vassdraget i Sør-Trøndelag, **Figur 3.2**. Testingen ble utført både for totalfeltet (Gaulfoss) og for utvalgte delfelt der det fantes målestasjoner og data for avløp (Eggafoss, Hufdal bru og Lillebudal bru). For totalfeltet viser figuren til høyre at høyden varierer fra 54 og opp til 1330 moh.

Figur 3.2. Gaula-vassdraget med delfelt og målestasjoner.



Det ble også kjørt forsøk med ulik romlig oppløsning i modellene for å studere hvilken innvirkning dette hadde på nøyaktighet i simuleringen.

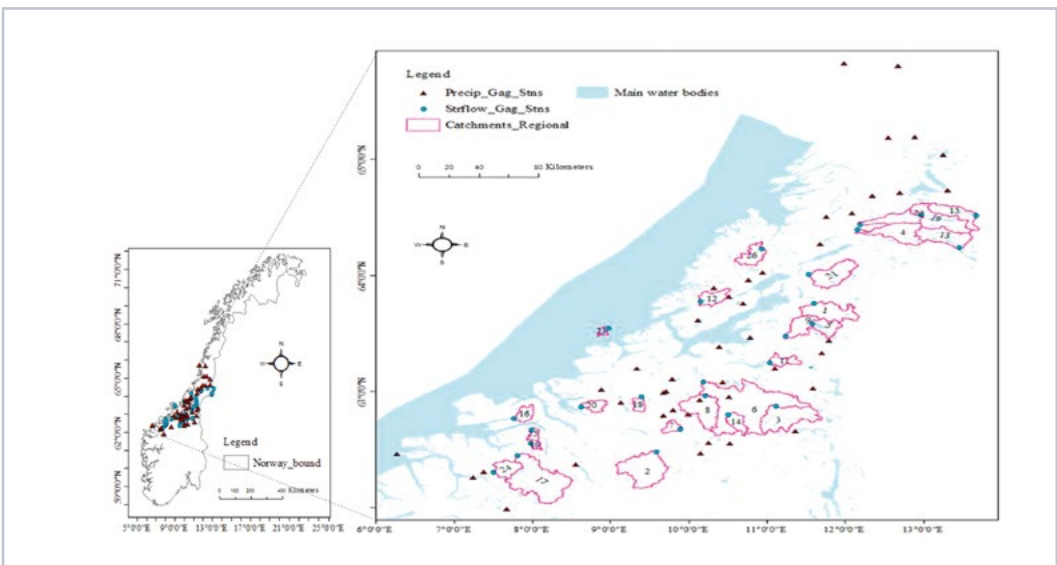
Regional kalibrering

Et mål med regional kalibrering er å kunne simulere avrenning i umålte felt, noe som er en stor utfordring både for forskning og praktisk anvendelse av hydrologi. Dette er også en utfordring ved evaluering av reguleringseffekter i vassdrag, da det ofte ikke er data tilgjengelig fra før reguleringen ble satt i drift. Gjennom den regionale kalibreringen finner vi et parametersett for modellen som er gyldig for en hel region. Vi kan dermed bruke dette til å simulere også de nedbørfeltene som ikke har vannføringsmålinger. Ved å bruke modellene som er utviklet i doktorgradsprosjektet har vi laget et opplegg for å finne den naturlige vannføringen i vassdraget før reguleringen. Disse dataene kan vi videre bruke til å regne ut måltall for endring i vannføring gjennom å bruke indekser for hydraulisk variasjon. Dette er testet ut i doktorgradsprosjektet og brukt videre i andre prosjekt i CEDREN

Forsøk på regional kalibrering ble utført ved å bruke 26 felt i regionen, **Figur 3.3**.

Figur 3.3. Plassering av felt («Catchments_Regional») og målestasjoner for nedbør (trekant) og avløp (sirkel) brukt i regional analyse.

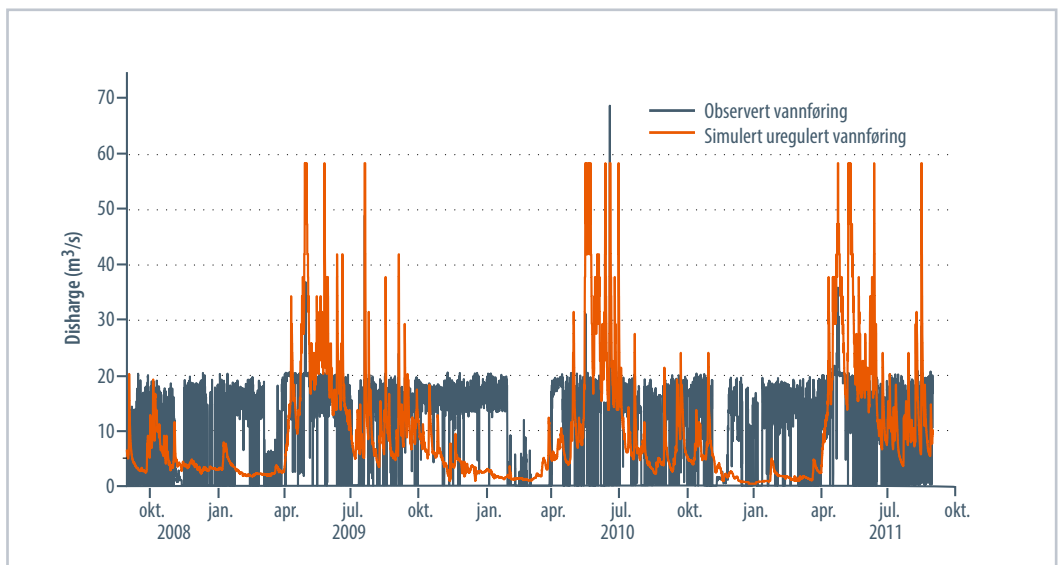
Resultater og konklusjoner finnes i PhD-avhandlingen [3.0] og i en rekke publikasjoner [3.1] - [3.9].



Bruk av regional metode for å simulere avrenning i umålte felt

I doktorgradsprosjektet er det vurdert metoder for å finne avrenning fra umålte felt, og da med spesielt fokus mot å rekonstruere uregulert vannføring i regulerte felt der det finnes lite eller ingen data fra før reguleringen. Dette er gjort både gjennom bruk av den regionale hydrologiske modellen og ved å bruke kvantilregresjon der dette gir bedre resultat. I elven Lundesokna finnes det lite med målinger av vannføring fra før reguleringen, og siden elven har raskt varierende vannføring er det nødvendig å rekonstruere naturlig vannføring på timesbasis (Figur 3.4).

Figur 3.4. Observert regulert vannføring i Lundesokna (svart kurve) og beregnet uregulert vannføring (rød kurve) for samme periode.



Publikasjoner fra kapittel 3.1

Monografier (doktorgrader)

[3.0] Hailegeorgis, Teklu T. (2015)

Identification of spatially distributed Precipitation–Runoff response routines for hourly simulation in gauged and ungauged basins

NTNU PhD 2015:6

ISBN 978-82-326-0674-5 NTNU

<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/283321>

Fagfellevurderte publikasjoner

[3.1] Hailegeorgis, Teklu Tesfaye; Abdella, Yisak Sultan; Alfredsén, Knut; Kolberg, S.

Evaluation of Regionalization Methods for Hourly Continuous Streamflow Simulation Using Distributed Models in Boreal Catchments. *Journal of hydrologic engineering* 2015 Volum 20.(11)

<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001218>

[3.2] Hailegeorgis, Teklu Tesfaye; Alfredsén, Knut.

Comparative evaluation of performances of different conceptualisations of distributed HBV runoff response routines for prediction of hourly streamflow in boreal mountainous catchments. *Hydrology Research* 2015 ;Volum 46.(4) s. 607-628

<http://hr.iwaponline.com/content/46/4/607>

[3.3] Hailegeorgis, Teklu Tesfaye; Alfredsén, Knut.

Multi-basin and regional calibration based identification of distributed precipitation–runoff models for hourly runoff simulation: calibration and transfer of full and partial parameters. *Hydrology Research* 2016 ;Volum 47.(2) s. 239-259

<http://hr.iwaponline.com/content/early/2015/10/24/nh.2015.174>

[3.4] Hailegeorgis, Teklu Tesfaye; Alfredsén, Knut.

Regional Statistical and Precipitation–Runoff Modelling for Ecological Applications: Prediction of Hourly Streamflow in Regulated Rivers and Ungauged Basins. *Rivers Research and Applications: an international journal devoted to river research and management* 2016

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rra.3006/full>

[3.5] Hailegeorgis, Teklu Tesfaye; Alfredsén, Knut; Abdella, Yisak Sultan; Kolberg, Sjur.

Evaluation of different parameterizations of the spatial heterogeneity of subsurface storage capacity for hourly runoff simulation in boreal mountainous watershed. *Journal of Hydrology* 2015 ;Volum 522. s. 522-533

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415000104>

[3.6] Hailegeorgis, Teklu Tesfaye; Alfredsén, Knut; Abdella, Yisak Sultan; Kolberg, Sjur.

Evaluation of storage–discharge relationships and recession analysis-based distributed hourly runoff simulation in large-scale, mountainous and snow- influenced catchment. *Hydrological Sciences Journal* 2016 ;Volum 61.(16) s. 2872-2886

<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2016.1170939>

Fagfelleverderte publikasjoner (forts)

[3.7] Hailegeorgis, Teklu Tesfaye; Thorolfsson, Sveinn T; Alfredsén, Knut.

Regional Frequency Analysis of Extreme Precipitation with Consideration of Uncertainties to Update IDF Curves for the City of Trondheim. *Journal of Hydrology* 2013 ;Volum 498. s. 305-318
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413004629>

[3.8] Khanal, Anup; Timalisina, Netra Prasad; Alfredsén, Knut.

Runoff Forecasting and its Application in Reservoir Operation and Flood Warnings in Nepal. *Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment* 2014 ;Vol15 s. 23-29
<http://www.nepjol.info/index.php/HN/article/viewFile/11288/9145>

[3.9] Shresta, Jayandra Prasad; Alfredsén, Knut; Timalisina, Netra Prasad.

Regional Modeling for Estimation of Runoff from Ungauged Catchments: Case Study of the Saptakoshi Basin, Nepal. *Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment* 2014; Volum 14. s. 65-73
<http://media-energy.com.np/wp-content/uploads/2015/01/13.jayandra-P-Shrestha-Knut-Alfredsen-Netra-Timalisina.compressed.pdf>

Konferanser og seminar

[3.10] Hailegeorgis, Teklu Tesfaye; Alfredsén, Knut.

Regional statistical and precipitation-runoff modelling for ecological applications: Prediction of hourly streamflow in regulated rivers and basins. 10th International Conference on Ecohydraulics, Trondheim 2014.

Masteroppgaver (“Diplomoppgaver”)

[3.11] Sigrí Scott Bale (2012)

Nedbørfelt som enkle, dynamiske system. Bruk av Kirchner (2009) si responsrutine i ein fordelt hydrologisk modell
Veileder: Knut Alfredsén og Yisak Sultan Abdella
<http://hdl.handle.net/11250/242230>

[3.12] Antoine Joquet (2015)

Regional Forecasting of Inflow and Generation for Small Hydropower Plants.
Veileder: Ånund Killingtveit og Gerard Doorman

[3.13] Jayanda Shresta (2012)

Regional modelling for estimation of runoff from ungauged catchment, case study of the Saptakoshi basin, Nepal
Veileder Knut Alfredsén og Netra Timalisina
<http://hdl.handle.net/11250/242227>

[3.14] Anup Khanal (2013)

Inflow Forecasting for Nepalese Catchments
Veileder Knut Alfredsén og Netra Timalisina
<http://hdl.handle.net/11250/242431>

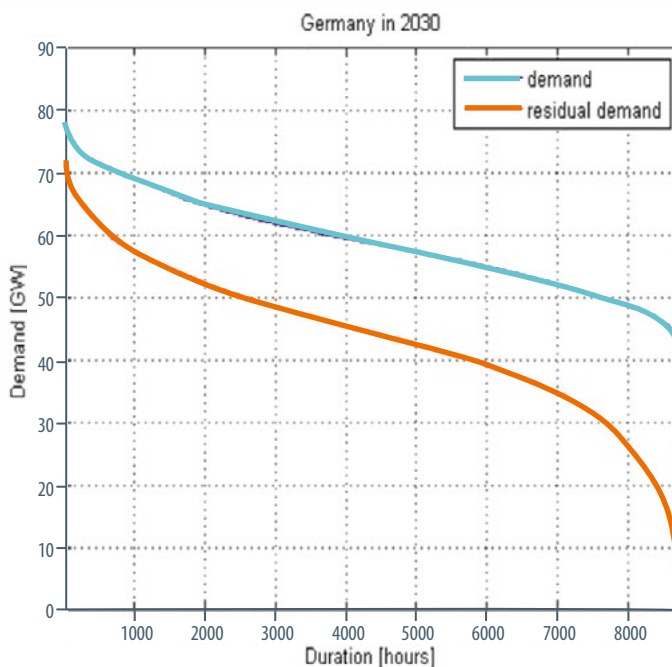
3.2 Forbedring av markedsmodeller

Post Doc-prosjekt: "Assessing capacity mechanisms in the European power system and their impact on Norwegian hydropower"

I tillegg til tradisjonelle investeringssyklusler i kraftsystemet, vil integrasjonen av store mengder nye fornybare energikilder, som vind og sol, utfordre stabiliteten til det fremtidige europeiske kraftsystemet.

Vindkraft og solkraft har veldig lave marginalkostnader når de først er bygget og satt i drift. De vil derfor redusere de økonomiske marginene for konvensjonell produksjonskapasitet og til sist fortrenge den. Men på grunn av den store variabiliteten, kreves det fortsatt en betydelig mengde med back-up produksjonskapasitet.

Figur 3.5 viser den forventede forskjellen mellom total last (demand) og residuallast (total minus produksjon av vind- og solenergi) i Tyskland for horisonten 2030. Det viser seg at produksjon av vind- og solenergi ikke vil bidra så mye til å dekke opp den høyeste lasten i systemet. Det betyr at det fortsatt



Figur 3.5. Forventet last og residuallast (last minus vind og sol) for Tyskland i 2030. For å sikre at nok produksjonskapasitet blir installert i kraftsystemet er såkalte kapasitetsmekanismer (Capacity Remuneration Mechanisms - CRM) diskutert og delvis implementert i hele Europa.

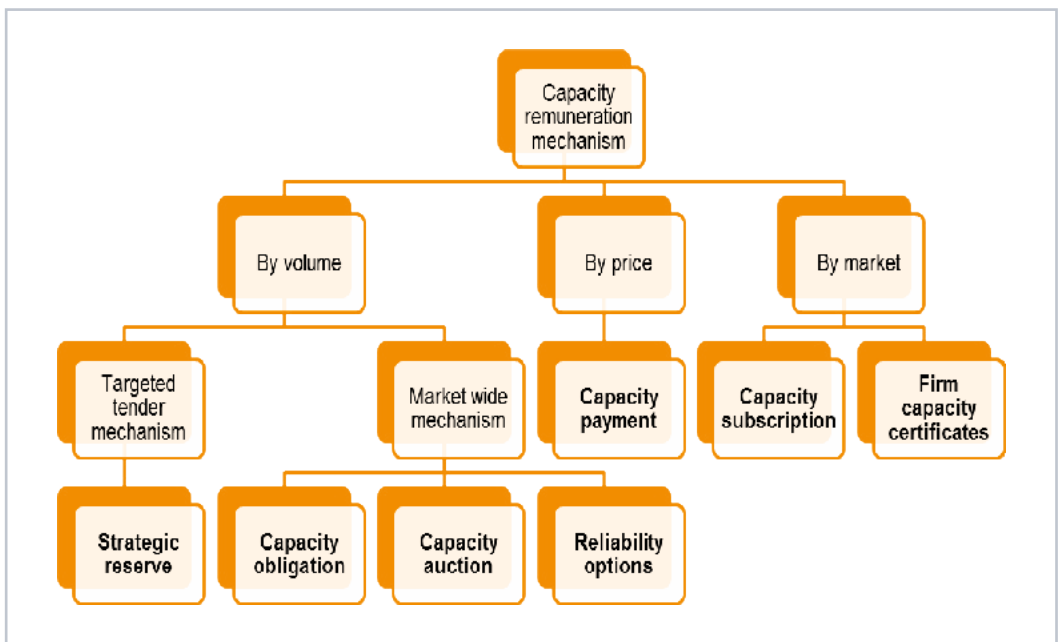
kreves nesten 100% back-up produksjonskapasitet eller andre typer fleksibilitet til å nå langtidsbalanse mellom produksjon og forbruk.

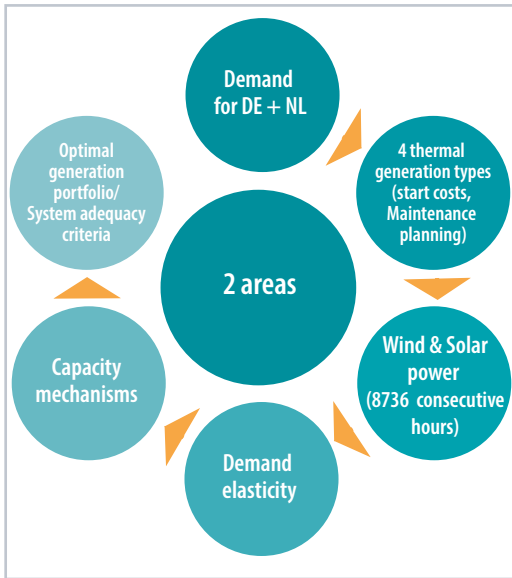
Disse mekanismene skal gi et ekstra incentiv for å sikre tilstrekkelig produksjonskapasitet. Som grafen i **Figur 3.6.** viser, finnes det mange forskjellige typer mekanismer, som i hovedsak kan klassifiseres som pris-, volum- og markedbasert. Hver av mekanismene har fordeler og ulemper og vil derfor være mer eller mindre enkle å implementere i det eksisterende kraftmarkedet. I tillegg er det et spørsmål om hvor mye en slik mekanisme vil kunne forstyrre velfungerende kraftmarkeder for energi.

Målet som ble definert for PostDoc-prosjektet var å utvikle en forståelse av kapasitetsmekanismer generelt og hvordan forskjellige typer kapasitetsmekanismer er bygget opp og fungerer. Spesielt er det viktig å forstå virkningen av å introdusere denne type mekanismer med norsk vannkraft som mulig kapasitetsleverandør. To hovedtyper av metodikk ble brukt i arbeidet:

- 1 generelle analyser basert på en forenklet modell
- 2 detaljerte analyser basert på en kompleks modell med et detaljert datasett

Figur 3.6. Skjematisk oversikt over kapasitetsmekanismer.





Figur 3.7. Beskrivelse av forenklet modell.

3.2.1 Forenklet modell

Et forenklet modell for et kraftmarked ble utviklet og implementert for å analysere den optimale kraftverksportfolien og investeringer i forskjellige typer kraftverk med og uten kapasitetsmekanismer. Modellen er implementert som et lineært problem i programsystemet AMPL (<http://ampl.com/>). En oversikt over modellegenskaper er vist i **Figur 3.7**.

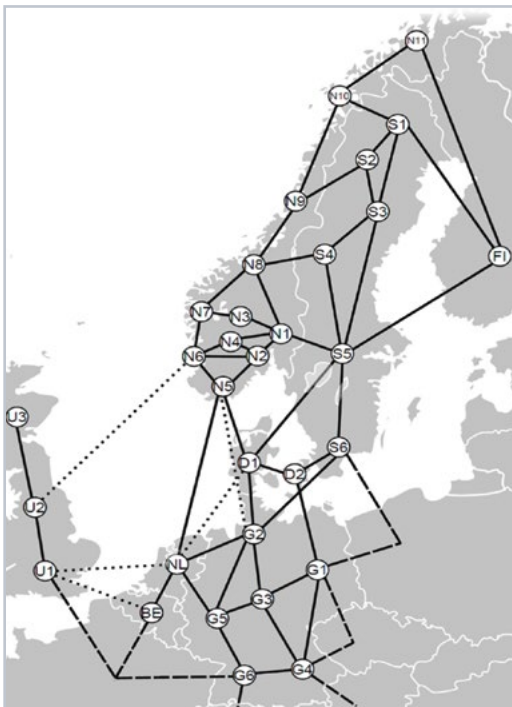
Modellen er brukt til forskjellige sensitivitetsanalyser, for eksempel til å analysere effekten av fornybarandel på kapasitetsmarginen eller effekten av forbruksfleksibiliteten på marginen. Analysene er gjort med og uten kapasitetsmekanismer. I tillegg er effekten på nabolandet analysert, gitt at en mekanisme er implementert i ett land og ikke i det andre.

3.2.2 Detaljert modell

Samkjøringsmodellen (EMPS modell, <http://www.sintef.no/en/software/emps-multi-area-power-market-simulator/>) er brukt i de detaljerte studiene. Den avanserte modellen gjør det mulig å oppnå realistiske resultater basert på et detaljert datasett for Norden og Nord-Europa, se Figur 3.8. Resultatene inkluderer detaljerte økonomiske resultater for norsk vannkraft.

Studiene inneholder:

- Analyser med fokus på langtids-/ årsvariabilitet i produksjonen fra sol og vind
- Utfallsanalyse av HVDC- kabler mellom Norden og Europa til evaluering av muligheten for å tilby back-up kapasitet fra Norden
- Investerings-/utbyggingsanalyse med og uten kapasitetskrav basert på kapasitetskravmetodikk som har blitt implementert i modellen



Figur 3.8. Oversikt over kraftmarkedsmodell for Norden.

3.2.3 Noen konklusjoner

Målet med prosjektet var å undersøke betydningen av implementasjonen av kapasitetsmekanismer for norsk vannkraft. Modellutvikling og analyser er gjort for å se på variabiliteten av vind og sol og effekten på lønnsomheten i kraftsystemet. Videre så prosjektet på effekten av utfall av HVDC-kabler på leveransen av effekt til Europa og effekten av kapasitetsmekanismer på produksjonsportfolien i det europeiske kraftsystemet.

Noen hovedkonklusjoner fra arbeidet er:

- Fornybare energikilder har en betydelig reduserende effekt på lønnsomheten av konvensjonelle kraftverk. Men i tillegg til reduksjonen er det også en økt variabilitet i lønnsomheten, grunnet stor forskjell i årsproduksjonen for de nye fornybare kildene (sol og vind). Variabiliteten i lønnsomheten forårsaker en ekstra risiko for investeringer, da spesielt år med lav fornybar produksjon og høye priser er sjeldne
- Implementasjonen av en kapasitetsmekanisme vil redusere variabilitet i priser og lønnsomhet, noe som gir en redusert investeringsrisiko
- En justering av den høyeste tillatte budprisen og økt forbruksfleksibilitet fører til økt leveringssikkerhet i kraftsystemet
- Implementasjonen av kapasitetsmekanismer i et land for å forhindre lastreduksjon kan ha en betydelig effekt på nabolandet
- Analysen av samfunnsoverskuddet viser at en integrert kapasitetsmekanisme koster mindre enn to separate mekanismer i to naboland.
- Et kabelutfall har betraktelige økonomiske konsekvenser for konsumenter i Kontinentaleuropa, når utfallet oppstår i perioder med kapasitetsmangel. Konsekvensene er ikke så avhengig av utfallslengden, men mer av kraftmarked-situasjon i utfallstidspunktet.
- Et kabelutfall har identiske konsekvenser som en utfall av termisk produksjonskapasitet i Kontinentaleuropa. Derfor er det anbefalt å ta med ressurser via HVDC-kabler inn i europeiske kapasitetsmekanismer.

3.2.4 Videre arbeid

Ettersom Post Doc-prosjektet var begrenset i tid, så gjenstår det en god del videre arbeid. Den forenklede modellen er allerede brukt som basis for utviklingen av en ekvilibrium-modell for det europeiske kraftsystemet. Det gir en god mulighet til å analysere mer komplekse mekanismer. I tillegg er det planlagt til å bruke metodikken for kapasitetskravet i Samkjøringsmodellen i fremtidige analyseprosjekter for norsk vannkraft.

Publikasjoner fra kapittel 3.2

Fagfellevurderte publikasjoner/

- [3.11] **Mocholí Montañés, Rubén; Korpås, Magnus; Nord, Lars O.; Jaehnert, Stefan.**
Identifying operational requirements for flexible CCS plant in future energy systems.
Energy Procedia 2016 ;Volum 86. s. 22-31
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216000059>

Konferanser og seminar

- [3.12] **Gebrekiros, Yonas Tesfay; Doorman, Gerard L.; Jaehnert, Stefan.**
DCOPF based optimal transmission capacity reservation for FRR exchange using implicit and sequential market clearance. I: 12th International conference on the European Energy Market, EEM 2015. IEEE Press 2015 ISBN 978-1-4673-6691-5.
- [3.13] **Jaehnert, Stefan; Doorman, Gerard L.**
Analysing the generation adequacy in power markets with renewable energy sources. I: European Energy Markets (EEM 14) Conference. IEEE conference proceedings 2014 ISBN 978-1-4799-6094-1. s. 1-6
- [3.14] **Jaehnert, Stefan; Korpås, Magnus; Doorman, Gerard L.; Hyldebakk, Ingri M.**
On the profit variability of power plants in a system with large-scale renewable energy sources. I: 12th International conference on the European Energy Market, EEM 2015. IEEE Press 2015 ISBN 978-1-4673-6691-5.
- [3.15] **Jaehnert, Stefan; Melaaen, Christian S.; Korpås, Magnus.**
Assessing the economic impacts for outages of HVDC-cables connecting the Nordic area and continental Europe. I: 2016 13th International Conference on the European Energy Market : EEM2016. IEEE conference proceedings 2016 ISBN 978-1-5090-1298-5.
- [3.16] **Jaehnert, Stefan; Wolfgang, Ove; Doorman, Gerard L.**
A methodology to assess the impact of capacity remuneration mechanisms in a detailed power system model. I: 12th International conference on the European Energy Market, EEM 2015. IEEE Press 2015 ISBN 978-1-4673-6691-5.
- [3.17] **Jaehnert, Stefan**
"Capacity remuneration mechanisms", Elkraft Miniseminar, NTNU, Trondheim, 08.11.2013
- [3.18] **Jaehnert, Stefan.**
"Market Integration, regulatory framework and capacity markets", CEDREN/CenSES Energy Storage Seminar, Trondheim, 21.10.2014
- [3.19] **Jaehnert, Stefan.**
"Balancing Wind Power Production with Nordic Hydro Resources", ERA-Net Workshop, Stavanger, 09.10.2013
- [3.20] **Jaehnert, Stefan.**
Storage market integration, regulatory framework, capacity markets", Hydro Balance User Meeting, Trondheim, 18.11.2014

Masteroppgaver (“Diplomoppgaver”)

[3.21] Arild Lote Henden (2014)

Storskala pumpekraft

Veileder: Gerard Doorman

<http://hdl.handle.net/11250/2378577>

[3.22] Ingri Marie Hyldbakk (2014)

Lønnsomhet i produksjon i et system med en stor andel fornybar energi

Veiledere: Gerard Doorman, Magnus Korpås, Stefan Jaehnert

<http://hdl.handle.net/11250/257759>

[3.23] Christian Sørum Melaaen (2015)

The impact of outages on the profitability of HVDC-cables between the Nordic area and the continent using the EMPS model

Veiledere: Magnus Korpås og Stefan Jaehnert

<http://hdl.handle.net/11250/2368088>

[3.24] Astrid Karsrud (2015)

Framtidig utvikling og sikring av tilstrekkelig rotasjonsenergi i det nordiske kraftsystemet

Veiledere: Magnus Korpås og Stefan Jaehnert

<http://hdl.handle.net/11250/2390466>

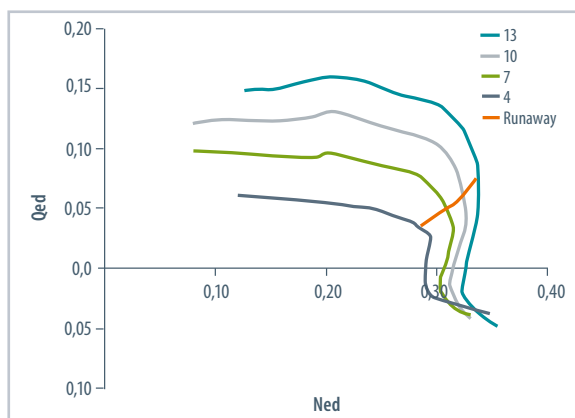
4 Vannkraftturbiner og pumpekraftverk

Økt etterspørsel etter regulering- og balansekraft har medført endrede kjøremønstre for vannkraftverkene med hyppigere opp- og nedreguleringer. Tøffere kjøremønstre fører til større slitasje og redusert levetid for turbiner og pumper, som i utgangspunktet er designet for et helt annet driftsregime. Samtidig utfordrer det nye regimet dynamikken i kraftverkssystemet. Det blir dermed viktig å forstå hvilke muligheter og begrensninger som finnes i eksisterende maskiner, og hvor grensene for stabilitet og driftssikkerhet går.

4.1 Pumpekraftverk

Økt etterspørsel etter regulering- og balansekraft, spesielt sett i lys av økende mengder ikke-regulerbar kraft som vind og sol, har medført et nytt fokus på pumpekraftverk. Kraftoverskudd fra ikke-regulerbare kilder kan benyttes til å pumpe vann i et magasin for lagring. Dette vannet kan igjen benyttes til produksjon når kraftunderskuddet melder seg. Det finnes grovt sett to typer pumpekraftverk, de som har separat pumpe og turbin installert, og de som benytter reversible pumpeturbiner. Sistnevnte er en kostnadseffektiv løsning der man har pumpe og turbin i en og samme maskin. Denne kombinasjonen medfører en utfordring ofte omtalt som s-formede turbinkarakteristikk, se **Figur 4.1**. Disse karakteristikkene kan i kombinasjon med et vannveissytem blant annet resultere i ustabilitet under oppstart og ved lastavslag.

Figur 4.1. Eksempel på s-formet pumpeturbin-karakteristikk, Olimstad/NTNU.





Hohenwarte II pumpekraftverk i Saale i Tyskland eies av Vattenfall. Det har vært i drift siden 1966. Med sine 8 pumpeturbiner er dette det sjette største pumpekraftverket i Tyskland.

Det har en midlere fallhøyde på 302 m og en maksimal effekt på 320 MW. Øvre magasin er minst med 3,28 mill. m³, tilsvarende 2,1 GWh. Hvis det pumpes for fullt med 134 m³/s vil dette fylles på 6-7 timer.

Kraftverket er laget for å jevne ut variasjon i forbruk over døgnet og sikre stabilitet i nettet, men er alt for lite til å fungere som lagringsmagasin for vind- eller solkraft. Det finnes bare fire pumpekraftverk med større lagringsvolum i Tyskland, disse har en samlet lagringskapasitet på 22 GWh. Det største av disse er Goldsisthal med 8 GWh. Foto: Vattenfall

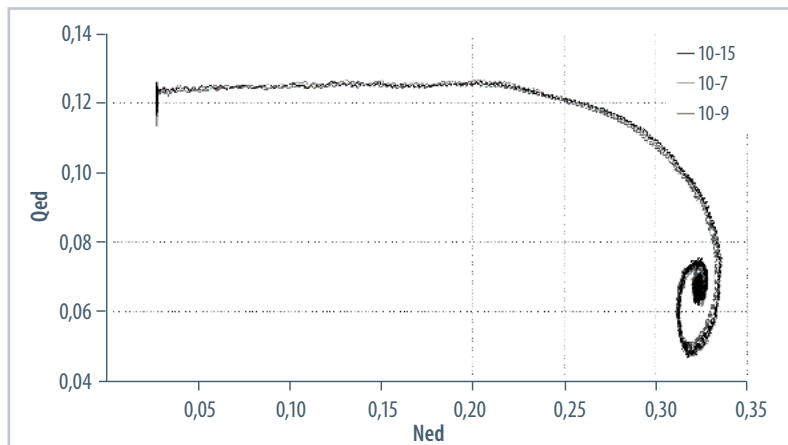
Arbeidspakke fire i HydroPEAK (WP4) hadde som hovedmål å øke kunnskapen om den dynamiske oppførselen av reversible pumpeturbiner i turbindrift. Arbeidet ble delt inn i tre delmål:

- Undersøke og verifisere stabilitetskriteriet for hydrauliske system med reversible pumpeturbiner. Resultatene er presentert i publikasjon [4.0], [4.1], [4.2] og [4.7].
- Undersøke effekten av pumpeturbin karakteristikk på transientene i et system.
- Resultatene er presentert i publikasjon [4.0], [4.3] og [4.8].
- Forbedre og verifisere en analytisk endimensjonal pumpeturbinmodell for transiente beregninger. Resultatene er presentert i publikasjon [4.0], [4.1], [4.7] og [4.9].

I WP4 ble det benyttet både felt- og laboratoriemålinger kombinert med transiente beregningsverktøy. Arbeidet har bidratt til å øke kunnskapen rundt dynamikk i pumpekraftverk med reversible pumpeturbiner:

- Det har blitt gjennomført og presentert laboratoriemålinger av dynamisk karakteristikk til en reversibel pumpeturbin, se **Figur 4.2**.
- Stabilitetskriterier for hydrauliske system med pumpeturbiner har blitt utledet og delvis verifisert.
- Kombinasjonen av feltmålinger fra prototyp og transiente beregninger har slått fast at pumpeturbin karakteristikkene er den største bidragsyteren til transientene i systemet.
- En forbedret analytisk pumpeturbinmodell for bruk i transiente beregninger er presentert og verifisert.

Figur 4.2. Dynamisk karakteristikk til en reversibel pumpeturbin, Walseth/NTNU.



Publikasjoner fra kapittel 4.1

Monografier (doktorgrader)

[4.0] Walseth, Eve Cathrin (2016)

Dynamic behavior of Reversible Pump-Turbines in Turbine Mode of Operation

NTNU PhD 2016:202

ISBN 978-82-326-1742-5 NTNU

<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2427513>

Artikler med fagfellevurdering

[4.1] Walseth, Eve Cathrin; Nielsen, Torbjørn Kristian; Svingen, Bjørnar.

Measuring the dynamic characteristics of a low specific speed pump-Turbine model. *Energies* 2016 Volume 9.(3)

<http://www.mdpi.com/1996-1073/9/3/199>

[4.2] Walseth, Eve Cathrin; Nielsen, Torbjørn Kristian; Svingen, Bjørnar.

Investigation of Stability Criteria for Reversible Pump-Turbines with Laboratory and Prototype Measurements. Submitted

[4.3] Walseth, Eve Cathrin; Nielsen, Torbjørn Kristian; Svingen, Bjørnar.

Prototype Study on the Effect of Reversible Pump-Turbine Characteristics on System Transients. Submitted

Mediebidrag

[4.10] Abelsen, Atle; Walseth, Eve Cathrin.

Raskere pumpekraft. CEDREN nyhetsbrev [Internett] 2010-12-01

[4.11] Bakken, Stein Arne; Walseth, Eve Cathrin.

Raskere pumpekraft. *Energiteknikk* [Avis] 2010-08-01

[4.12] Bråtveit, Kari; Walseth, Eve Cathrin.

CEDREN forskerar vitjar Nant de Drance-Sveits sitt største pumpekraftverk under bygging.

Konferansebidrag

[4.4] Walseth, Eve Cathrin.

Pumped Storage Plants - Benefits and Challenges. Pump Storage - Enabling New Renewables and Mitigating Climate Change; 2011-05-03

[4.5] Walseth, Eve Cathrin.

Reversible Pump Turbines. *Energilagring i vand*; 2010-09-28 - 2010-09-29

[4.6] Walseth, Eve Cathrin; Nielsen, Torbjørn Kristian.

Reversible Pumped Hydro-Benefits and Challenges. Renewable Energy Research Conference; 2010-06-07 - 2010-06-08

[4.7] Walseth, Eve Cathrin; Svingen, Bjørnar; Nielsen, Torbjørn Kristian.

Comprehensive experimental study of instability in a reversible pump-turbine model at no-load operation. *Hydro* 2012; 2012-10-29 - 2012-10-31

[4.8] Walseth, Eve Cathrin; Svingen, Bjørnar; Nielsen, Torbjørn Kristian.

Investigating the effect of turbine characteristics on the pressure response of a system. IAHR 4th international conference on cavitation and dynamic problems in hydraulic machinery and systems; 2011-10-26 - 2011-10-28

[4.9] Walseth, Eve Cathrin; Svingen, Bjørnar; Nielsen, Torbjørn Kristian.

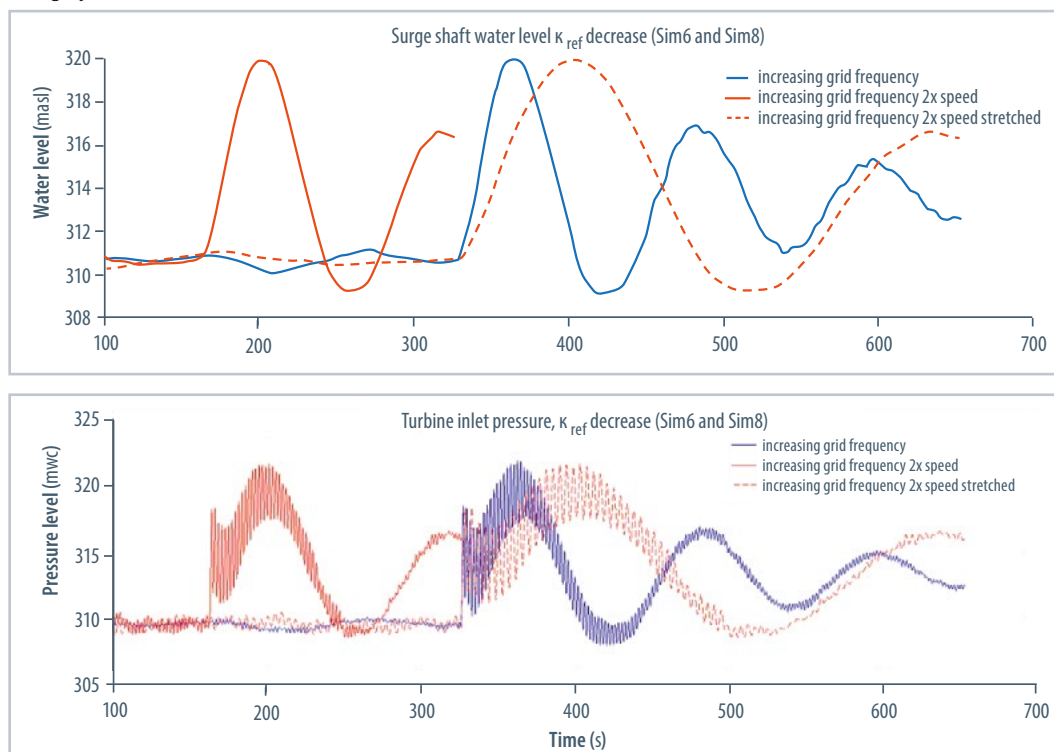
Investigation of a 1D-model for simulating the characteristics of a high head Francis turbine. 14th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. ISROMAC-14; 2012-02-27 - 2012-03-02

4.2 Frekvens- og lastregulering ved økt innslag av ikke-regulerbar kraft (sol og vind)

Tema som det ble jobbet med i WP5 var i hovedsak lastregulering som konsekvens av frekvensvariasjon i elektrisitetsnettet (også kalt permanent statikk). Når mengden roterende masse (synkrongeneratorer i momentan drift) i nettet går ned samt at mengden uregulert kraft går opp, vil frekvensendringene skje oftere og hurtigere. Med dette som bakgrunn ble det valgt å se på forskjellige elementer som er viktig for eksisterende vannkraftverk; dynamiske laster og systemdynamikk. De dynamiske laster omhandles av publikasjonene [4.13], [4.14] og [4.16] i listen over publikasjoner, systemdynamikken omhandles i publikasjon [4.19], som **Figur 4.3** og **Figur 4.4** er hentet fra.

Figur 4.3. Eksempel på simuleringsresultat for systemdynamikk (svingesjaktnivå), fra [4.19].

Mye arbeid er lagt ned i produksjon og utvikling av programvaren som er benyttet til simuleringer presentert i publikasjonene [4.16] og [4.19], et egenutviklet skript som er kalt MOCPOW, som kjøres i Matlab. Det baserer seg på Karakteristikkmetoden, og simulerer i tidsplanet.



Figur 4.4. Eksempel på simuleringsresultat for systemdynamikk (trykk foran turbin), fra [4.19].



Tverrslagspropp sandfang, Tonstad kraftverk. Foto: Kai-Wilhelm Nessler

Oppsummering og konklusjoner

Eksisterende vannkraftverk ser ut til å takle en mer volatil nettfrekvens godt. Dynamiske laster grunnet dette er ikke store, og mest sannsynlig vil disse tas høyde for av sikkerhetsfaktorer og marginer innebygd i eksisterende og fremtidig design av løpehjul.

Når det gjelder veldig mye raskere endringer i nettfrekvensen enn i dagens system, ser det også ut til at kraftverkene vil tåle dette godt, basert på trykkstigninger og nivå i svingesjakter, etc. Det som derimot må sjekkes mer nøye og ved hjelp av mer detaljerte analysemetoder er lokale effekter slik som tømning av sandfang grunnet mer voldsomme endringer i trykk og volumstrøm enn i dagens system. Denne problemstillingen og utvikling av nye beregningsmetoder er omtalt i **Kapittel 5**.

Publikasjoner fra kapittel 4.2

Artikler med fagfellevurdering

[4.13] Ellingsen, Raket; Storli, Pål-Tore Selbo.

Simulations of the dynamic load in a Francis runner based on measurements of grid frequency variations. *International Journal of Fluid Machinery and Systems* 2015 ;Volum 8.(2) s. 102-112

https://www.jstage.jst.go.jp/article/ijfms/8/2/8_102/_article

[4.14] Nielsen, Torbjørn Kristian; Storli, Pål-Tore Selbo.

Measurements and simulations of turbines on common grid. *IOP Conference Series: Earth and Environment* 2014 ;Volum 22.(4)

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/22/4/042018>

[4.15] Storli, Pål-Tore Selbo.

Closure to "Transient Friction in Pressurized Pipes. III: Investigation of the EIT Model Based on Position-Dependent Coefficient Approach in MIAB Model" by Pål-Tore Storli and Torbjørn K. Nielsen. *Journal of Hydraulic Engineering* 2013 ;Volum 139.(5) s. 567-568

[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000623](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000623)

[4.16] Storli, Pål-Tore Selbo; Nielsen, Torbjørn Kristian.

Dynamic load on a Francis turbine runner from simulations based on measurements. *IOP Conference Series: Earth and Environment* 2014 ;Volum 22.(3)

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/22/3/032056>

Konferansebidrag

[4.17] Storli, Pål-Tore Selbo.

A novel concept to increase the flexibility at powerplants with outlets to the river. *Hydro2016*; 2016-10-10 - 2016-10-12

[4.18] Storli, Pål-Tore Selbo.

Novel concepts of increasing energy storage capacity at Pumped Storage Power plants. 28th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems; 2016-07-04 - 2016-07-08

[4.19] Storli, Pål-Tore Selbo.

Simulations of operation and transients at a hydro power plant caused by a large amount of wind energy. *Hydro2016*; 2016-10-10 - 2016-10-12

[4.20] Storli, Pål-Tore Selbo; Nielsen, Torbjørn Kristian.

The quality of Norwegian grid frequency and the consequences for pumped storage. *Pumped Storage Powerplants*; 2011-11-23 - 2011-11-24

Masteroppgaver (“Diplomoppgaver”)

[4.21] Birgit Longva (2012)

Nytteverdien av å etablere pumpe i et eksisterende vannkraftsystem

Veiledere: Torbjørn Nielsen og Knut Solnørdal

<http://hdl.handle.net/11250/234836>

[4.22] Even Lillefoss Haugen (2013)

Verification of simulation program for high head hydro power plant with air cushion

Veileder: Torbjørn Nielsen

<http://hdl.handle.net/11250/257580>

[4.23] Julie Marie Hovland (2013)

Pressure pulsations and stress in a high head Francis model turbine

Veiledere: Torbjørn Nielsen

<http://hdl.handle.net/11250/235227>

[4.24] Ingeborg Lassen Bue (2013)

Pressure pulsations and stress in a high head turbine, comparison between model and geometrically similar prototype

Veiledere: Torbjørn Nielsen

<http://hdl.handle.net/11250/235231>

[4.25] Øystein S. Hveem (2013)

Testing av regulator for små turbiner

Veiledere: Torbjørn Nielsen

<http://hdl.handle.net/11250/2353728>

[4.26] Mons Ole Dyvik Sellevold (2013)

Demping av U-røyrsvingingar i vasskraftverk

Veiledere: Torbjørn Nielsen og Pål-Tore Storli

<http://hdl.handle.net/11250/257574>

[4.27] Kristin Tessem Kolsaker (2013)

Evaluering av modulert kavitasjon i vannkraftturbiner

Veiledere: Torbjørn Nielsen

<http://hdl.handle.net/11250/257577>

[4.28] Magni Fjørtoft Svarstad (2014)

Pumpe- og turbinkarakteristikker i fire kvadranter

Veiledere: Torbjørn Nielsen og Ole Gunnar Dahlhaug

<http://hdl.handle.net/11250/257830>

[4.29] Rakel Ellingsen (2014)

Stability Criteria of Reversible Pump Turbines

Veiledere: Torbjørn Nielsen og Pål Tore Storli

<http://hdl.handle.net/11250/257826>

[4.30] Sigurd Tangerud Haga (2014)

Dynamic load on High Head Francis turbines during start/stop

Veiledere: Torbjørn Nielsen

<http://hdl.handle.net/11250/235602>

[4.31] Kjetil Guddal Ruud (2014)

Continuous Measurements for Detection of Cavitation Caused by Transients in Hydropower Plants and Fluid Transport Systems.

Veiledere: Torbjørn Nielsen og Morten Kjeldsen

<http://hdl.handle.net/11250/257819>

5 Vannveier og svingekammer

Vannkrafttunneler og fjellrom slik som kraftstasjonshall, inntak, svingekammer og sandfang er viktige tekniske komponenter og representerer typisk omtrent 50% av kostnadene i norske vannkraftverk. Det er hittil bygget over 3500 km med vannkraft-tunneler, hovedmengden i de 30 årene mellom 1960 og 1990, **Figur 5.1**.

De komponentene som utgjør selve vannveien, det vil si inntak, tilløpstunnel, sandfang, svingesjakt/-kammer, trykksjakt og avløpstunnel, utgjør et integrert hydraulisk system som er optimalisert for å transportere vannet fram til turbinene og derfra videre til utløp i nedstrøms elv, magasin/innsjø eller ut i havet. Ved dimensjonering av vannveien blir det funnet en balanse mellom kostnader og dimensjoner, der viktige hensyn er krav til sikkerhet og stabilitet under drift og oppstart/avslag og minimalisering av energitap (falltap). De viktigste komponentene er vist på **Figur 5.2**.

Driftsmønster og krav til responstid ved start/stopp gir føringer for dimensjoneringen. Dersom disse endres, for eksempel på grunn av økende krav til å bruke vannkraft for balansering av vind- og solkraft, kan en få problemer med økt falltap, erosjon i tunnelsåle og ras inn i tunnelen. Luft som rives med inn i inntak kan også skape problemer, både i form av luftlommer som øker falltaket og risiko for farlige utblåsninger, og biologiske virkninger fordi overmetning av nitrogen kan være skadelig for fisk i vassdraget nedstrøms.

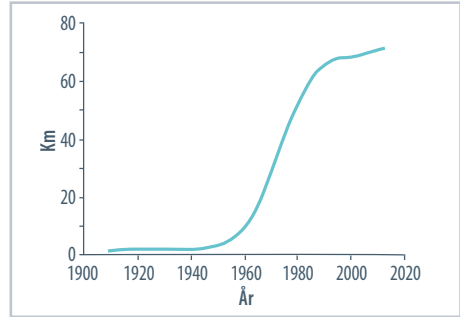
Vannkraftanlegg i Norge har gått gjennom en gradvis endring i takt med utvikling av teknologi for fjellsprenning, slik som illustrert på **Figur 5.3**. I en tidlig periode, typisk før 1950, ble tunneler under lavt trykk brukt for å transportere vann fra inntak i magasin eller elv og fram til toppen på en trykksjakt. En trykksjakt av stålrør ute i det fri førte vannet ned til kraftverket som var plassert i en bygning, med avløp direkte ut i elv eller magasin. Et klassisk eksempel på denne typen er Nore kraftverk.

Fra omtrent 1950 førte forbedret teknologi til at en kunne flytte både trykksjakt og kraftstasjon inn i fjellet, men på grunn av vanntrykket ble hele eller i hvert fall nedre deler av trykksjakten fortsatt laget som et stålrør inne i en tunnel, enten som et frittliggende rør eller med betong-utforing mot fjellet. Det ble nødvendig å lage adkomst-tunnel, kabeltunnel og avløpstunnel ut i

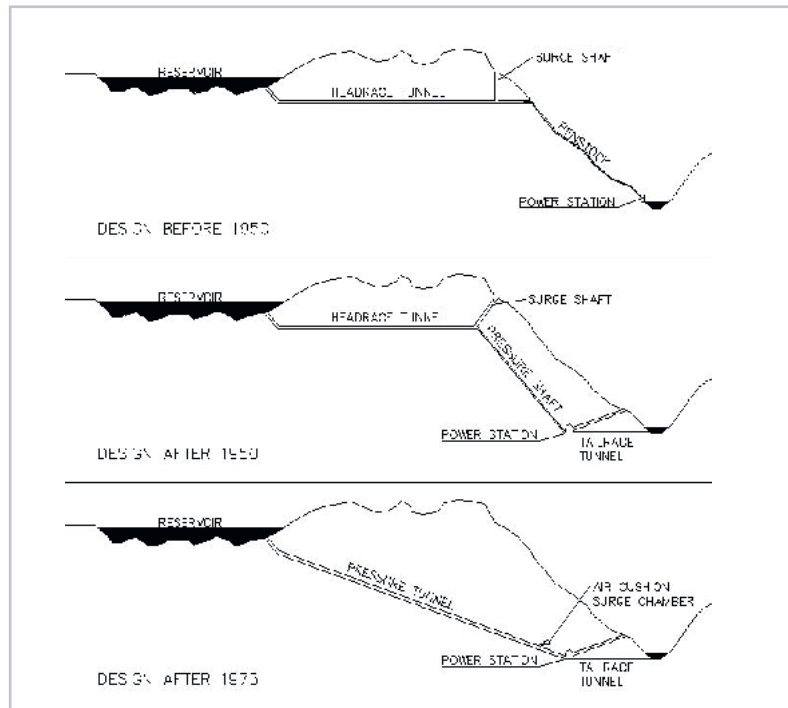
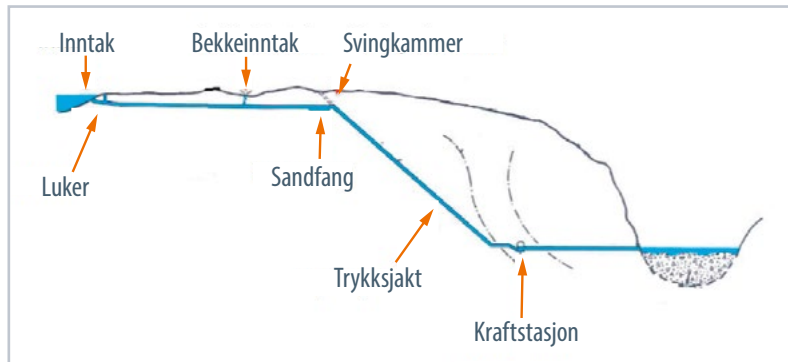


Løsmasser i tunnelsystemet, Tonstad kraftverk. Foto: Kai-Wilhelm Nessler

Figur 5.1. Historisk utvikling i bygging av vannkrafttunneler i Norge [5.0]



Figur 5.2. De viktigste komponentene i vannvegen i et undergrunns vannkraftanlegg.



Figur 5.3. Utvikling i design for undergrunns vannkraftanlegg i Norge.

det fri. Denne løsningen ga mye større frihet i plassering av kraftstasjonen og kunne føre til at hele anlegget fra inntak til utløp var i fjell.

Den tredje og mest fleksible utformingen kom rundt 1975, ved innføring av trykkluft svinge-kammer (luftputekammer), som kunne plasseres der det er mest funksjonelt, nær turbinen. Med denne løsningen lages en skrånende trykk-tunnel som fører vannet direkte fra inntak til turbinen, og en får mye større frihet i forhold til topografi og geologiske forhold. Eksempel på slike typer anlegg er Driva kraftverk som var det første (1973), Brattset kraftverk i Orkla (1982) og Torpa kraftverk (1989) som er det nyeste av sitt slag i Norge.

I HydroPEAK prosjektet ble det gjennomført to studier med spesiell fokus på vannveiene, den ene [5.0] hadde fokus på å måle og modellere selve tunnel-systemet, for å skaffe mer nøyaktig data og modeller for beregning av strømningsbildet i ulike driftssituasjoner, og hvordan dette kunne påvirke erosjon og føre til uønsket transport fra tunnel-sålen og inn til turbinene. Når slike modeller er verifisert, kan vi regne mer nøyaktig på virkningen av økt lastvariasjon og endret driftsmønster, finne ut hvor mye som tåles før det blir problemer i et eksisterende anlegg og hvordan vi skal designe nye framtidige anlegg på en optimal måte.

Den andre studien [5.20] fokuserte på å bedre den teoretiske forståelsen av hva som skjer rent fysisk i et slikt luftputekammer, samt å lage laboratorie- og data-modeller som kan brukes for å verifisere teorier og i neste omgang for å designe nye luftputekammer i anlegg som skal bygges. En bedre teoretisk forståelse og verifisering av modeller og beregningsmetoder vil også være viktig for å fremme tillit til denne typen anlegg, og danne grunnlag for økt bruk også ute i verden.



*Fjellrom med vannspeil i bunnen. Omtrent slik ser det ut inne i et luftputekammer.
Foto: Ånund Killingtveit*

5.1 Virkning av lastvariasjon i vannkrafttunneler

Bråtveit [5.0] beskriver fire hoved-utfordringer for vannveiene knyttet til en pålitelig drift av vannkraftverk. Alle kan sies å være koblet opp mot hastighet og strømningsmønster i tunnel-systemet:

- Hydrauliske transienter skapt av brå endringer i vannføring, kan medføre trykkstøt og skader på maskiner og konstruksjoner. Disse må kontrolleres og begrenses, her har svingekammeret en sentral funksjon. Videre må en sikre at inntaksluker plasseres og opereres slik at tunnelsystemet alltid har overtrykk.
- Sedimenter i vannveien kan skade mekaniske komponenter og må holdes under kontroll. Sedimentene kan enten stamme fra vegbanen i tunnelen eller komme inn gjennom inntak eller ved ras inne i tunnelen. Ras i magasiner kan også være en kilde. Transporten av sedimenter og eventuelt erosjon av vegbanen øker raskt med vannhastigheten, og kan være følsom selv for mindre endringer i kjøremønsteret.
- Ras og nedfall i tunnelen. I verste fall kan raset blokkere tunnelen og stanse kraftverket, men vanligvis ser vi bare en delvis blokkering. Dette kan gi økt falltap og kan være vanskelig å oppdage. Inspeksjoner krever tømning av vannvegen og gjøres derfor sjelden slik at det kan gå lang tid før problemet oppdages og korrigeres. Et bedre alternativ er derfor å modellere og overvåke falltapedet nøye, men dette krever gode data både for tunnelsystemet og nøyaktig vannføringsmåling dersom en skal oppdage mindre endringer tidlig.
- Luftmedrivning inn i tunnelsystemet kan føre til at det dannes luftlommer i høybrekk og økt falltap på grunn av mindre strømningsareal. Slike luftlommer kan senere rives løs og forårsake utblåsning i inntak, med store skadevirkninger. Luft som blandes inn under sterk turbulens kan også gi nitrogen-overmetning som er skadelig for fisk i vassdraget nedenfor utløpet.

Alle disse problemene er knyttet opp mot hydrodynamiske forhold i vannveiene og er en funksjon av kjøremønster i turbinene. Tradisjonelt har en ved design og optimalisering av vannveiene antatt en enkel beskrivelse basert på teoretisk tverrsnitt i tunnelene og modeller som opererer med idealiserte forutsetninger om hastighetsfordelingen.

For å kunne studere mer nøyaktig hastighetsfordeling, for eksempel for å se på mulig erosjon av vegbane og fare for utrasing, er det brukt en avansert

tredimensjonal strømningsmodell (STAR CCM+) som kan regne detaljert på hastighet i hele tverrsnittet og identifisere parti med høyere strømhastighet. Modellen kan også regne på dynamiske forløp og transienter ved av- og påslag, og har gitt gode resultater som er dokumentert i publikasjonene. [5.14]

En viktig forutsetning for en slik 3D modellering er at geometrien er nøyaktig bestemt. Den faktisk utsprengte geometrien kan være forskjellig fra det teoretiske tverrsnittet, og for å få full nytte av mer avanserte strømningsmodeller er en avhengig av mer nøyaktige data for geometrien. Tradisjonell måleteknikk er tidkrevende, kostbar og noen ganger farefull, og i dette prosjektet har vi derfor utviklet og testet nye målemetoder basert på laser-skanning. Målinger utført i tilløpstunnelen i Tonstad kraftverk viser at laser-skanning kan være et meget godt alternativ og produserer svært nøyaktige data både for geometrien og ruhet i fjellveggen, noe som er viktig for å bestemme falltapet. [5.1]

For å verifisere at modellene regner riktig er det også nødvendig å skaffe mer nøyaktige data for faktiske hastigheter og hastighetsfordeling. Dette er gjort, også i Tonstad kraftverk, ved å montere inn målere basert på å sende lydbølger inn i vannstrømmen, såkalt «Acoustic Doppler Current Profiler» (ADCP). Disse målerne kan måle hastighet i hele tverrsnittet med stor nøyaktighet og kan derfor brukes for å sjekke og verifisere modellberegninger i det samme tverrsnittet. ADCP målere kan også tenkes brukt til kontinuerlig overvåkning og sammen med målinger av effekt og trykkforhold gi en indikasjon på endringer i falltap på grunn av ras eller virkningsgrad i turbinen på grunn av slitasje og skader, for eksempel fra sedimenter. [5.2]

For å kartlegge ras og nedfall i kraftverkstunneler er det foreløpig nødvendig å tømme tunnelen og gjøre en manuell kartlegging ved å gå gjennom tunnelen. Et interessant spørsmål er om endring i kjøremønsteret med mer effektkjøring og flere av/påslag kan påvirke fare for økning i ras og nedfall. Dette ble undersøkt ved inspeksjon av et antall vannkrafttunneler og der ble det konkludert med at mengde og hyppighet av «rock fall» økte når tunnelene var brukt til effektkjøring. Dette ble forklart med at slike nedfall trolig kunne trigges av hyppigere endring i kjøring og større svingninger i internt vanntrykk i fjellmassene rundt tunnelen. [5.3]

Publikasjoner fra kapittel 5.1

Monografier publisert (doktorgrader)

[5.0] Bråtveit, Kari (2015)

Effects of load fluctuations on hydropower tunnels
NTNU PhD 2015:280
ISBN 978-82-326-1216-1, ISSN 1503:8181 NTNU Trondheim
<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2364838>

Artikler med fagfellevurdering

[5.1] Bråtveit, Kari; Lia, Leif; Olsen, Nils Reidar Bøe.

An Efficient Method to Describe the Geometry and the Roughness of an Existing Unlined Hydro Power Tunnel. Energy Procedia 2012 ;Volum 20. s. 200-206
<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.020>

[5.2] Bråtveit, Kari; Olsen, Nils Reidar Bøe.

Calibration of Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler by three dimensional CFD simulations. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics 2015 ;Volum 9.(1) s. 41-49
<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/19942060.2015.1004807>

[5.3] Bråtveit, Kari; Bruland, Amund; Breivik, Oddmund.

Rock falls in selected Norwegian hydropower tunnels subjected to HydroPEAKing. Tunnelling and Underground Space Technology 2016 ;Volum 52. s. 202-207
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2015.10.003>

Masteroppgaver («Diplomoppgaver»)

[5.17] Carl Martin R. Klæth (2012)

Tyin kraftverk - Analyse av trykk- og hastighetsforhold i tunnelsystemet
Veileder: Leif Lia

[5.18] Simen Anthon Bjøringsøy (2012)

Falltap i tunneler: Sprøytebetong og ruhet
Veileder: Leif Lia
<http://hdl.handle.net/11250/232351>

[5.19] Oddmund Brevik (2013)

3D numerisk modellering av deler av vannvegen til Tonstad kraftverk
Veileder: Nils Reidar Bøe Olsen og Kari Bråtveit
<http://hdl.handle.net/11250/232572>

Konferansebidrag

[5.5] Bråtveit, Kari.

Describe the geometry and roughness of an existing unlined hydro power tunnel. Technoport Trondheim; 2012-04-16 - 2012-04-18

[5.6] Bråtveit, Kari.

Discharge measurement in a pressurized hydro power tunnel performed by an ADCP. ADCP in action; 2013-09-30 - 2013-10-03

[5.7] Bråtveit, Kari.

Inspeksjon av driftstunnelar. Produksjonsteknisk konferanse; 2012-03-06 - 2012-03-07

[5.8] Bråtveit, Kari.

Lastvariasjonar i vassvegen. Vassdragsteknisk forum; 2011-01-25

[5.9] Bråtveit, Kari.

Singel og sand. Produksjonsteknisk konferanse 2013; 2013-03-04 - 2013-03-06

[5.10] Bråtveit, Kari.

Strømning i tunnelar og vannveg ved endra kjøremønster. CEDREN årsmøte; 2012-04-25 - 2012-04-26

[5.11] Bråtveit, Kari.

Strømningsmønster i råprengte vannkrafttunnelar - konsekvensar av effektkjøring?. Produksjonsteknisk konferanse 2013; 2013-03-04 - 2013-03-06

[5.12] Bråtveit, Kari; Olsen, Nils Reidar Bøe.

Design of sand traps in hydropower system. Third Nordic Seminar on Hydropower and Sediment Transport; 2013-05-29 - 2013-05-30

[5.13] Bråtveit, Kari; Olsen, Nils Reidar Bøe.

Roughness analysis of an existing unlined hydro power tunnel based on data from a terrestrial laser scanner. Hydraulic Measurements and Experimental Methods; 2012-08-13 - 2012-08-16

[5.14] Bråtveit, Kari; Olsen, Nils Reidar Bøe; Brevik, Oddmund.

Three Dimensional Numerical Study of an Unlined Pressurized Rock-Blasted Sand Trap. I: Proceedings of the 35th IAHR World Congress. China: Tsinghua University Press 2013 ISBN 978-7-89414-588-8.

Mediebidrag

[5.15] Bråtveit, Kari; Walseth, Eve Cathrin.

CEDREN forskarar vitjar Nant de Drance-Sveits sitt største pumpekraftverk under bygging.

[5.16] Lie, Øyvind; Vereide, Kaspar; Killingtveit, Ånund; Bråtveit, Kari.

Effektkjøring gir fare for turbinhavari. Teknisk Ukeblad 2014 ;Volum 161.(4) s. 62-63

5.2 Luftpute-svingekammer for vannkraftverk

I store vannkraftverk med lange vannveier (tunneler og rør) er det store vannmengder i bevegelse på veg fra inntaket fram til turbinen. Ved plutselig stans av kraftverket (avslag) må store vannmengder bremses opp, og dette krever store motkrefter som kan medfører at en får trykkstøt i vannveien. Dette kan skape skader på maskiner og konstruksjoner, og det er nødvendig å treffe tiltak for å redusere trykkstøtet dersom dette blir for stort. Løsningen på problemet er å etablere et rom med fri vannflate så nær turbinen som mulig, et svingekammer.

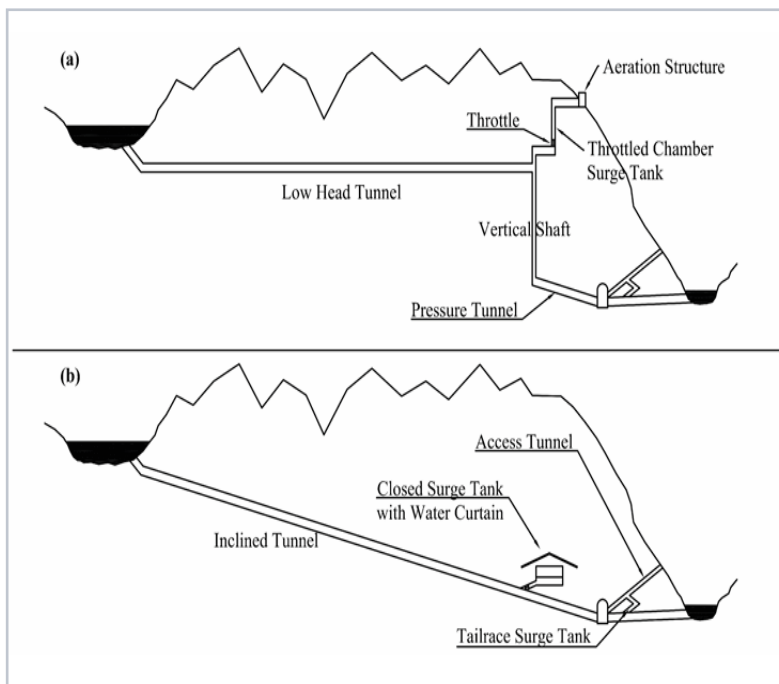
Tradisjonelle svingekammer er utformet som et rom eller en sjakt som vannet kan strømme inn i ved avslag, og der vannstanden vil øke raskt og skape et mottrykk som gradvis bremses opp vannmengdene som er i bevegelse og til slutt stopper vannstrømmen. På grunn av massetreghet vil da trykket i svingekammeret være større enn trykket fra magasinet, og vannet vil begynne å strømme ut av svingekammeret og tilbake mot magasinet. Når nivået i svingekammeret blir lavt nok vil vannet igjen strømme fra magasinet og tilbake i svingekammeret igjen og dermed skapt såkalte u-rørsvingninger i systemet. Svingningene vil etter hvert avta og til slutt dempes helt på grunn av friksjonstap i tunnelen.

Tilsvarende vil en ved start av turbinen og økende pådrag trenge tid til å akselerere vannet i vannveien og dette kan begrense hvor raskt det er mulig å starte opp produksjonen. Med et svingekammer nær turbinen kan vannføringen i starten hentes fra dette, vannstanden synker og det oppstår en trykk-gradient fra inntaket og fram til svingekammeret som akselererer vannet i vannveien inntil det er balanse. Også her kan det oppstå u-rørsvingninger som gradvis dempes ut av friksjonen.

Utforming og dimensjonering av svingekammer er viktig for å oppnå stabil drift i kraftverket, og for å kunne variere kjøringen raskt nok i forhold til behovet. Ved utforming av svingekammeret er målet å oppnå stabile massesvingninger som dempes raskt. En ulempe med tradisjonelle svingekammer som har fri overflate mot atmosfæren er at de må plasseres så høyt i terrenget at vannspeilet når over inntakshøyden i magasinet. I praksis vil det oftest plasseres nær overgang fra råsprengt tunnel til trykksjakt. Kravet om fritt vannspeil i svingekammeret gir føring og begrensninger for hvordan vannvei og kraftverk må plasseres i forhold til terrenget, og avstanden mellom fri vannflate og turbinen kan fort bli så lang at det gir begrensninger med hensyn på hvor raskt opp- og nedregulering kan skje.

Med økende krav til raskere og hyppigere regulering på grunn av økt innslag av vindkraft stilles nå enda større krav til funksjonen av svingekammeret. En lovende teknologi for dette er såkalt Luftpute-kammer, en type som ble utviklet og tatt i bruk i Norge på 70-tallet, denne typen svingekammer har lenge vært unik for Norge. I dag finnes det ti kraftverk med luftpute-kammer i drift i Norge og et par utenfor Norge, men det er ikke bygge noen nye luftpute-kammer i Norge de siste 20 årene, og det er derfor utført lite forskning. En sammenligning mellom vannkraftverk med tradisjonelt svingekammer og luftpute-kammer er vist på **Figur 5.3 og 5.4**.

Luftpute-kammeret er basert på at en pute med trykkluft balanserer vanntrykket inne i kammeret. Ved avslag vil vann strømme inn og gi stigende vannstand som komprimerer luften og gir trykkstigning. Akkurat som i et tradisjonelt system vil det oppstå massesvingninger som gradvis dempes ut, og det er viktig å designe kammeret stort nok til at en får kontroll på disse og sikrer stabilitet. En komplikasjon ved beregning er at trykkstigning og komprimering



Figur 5.4. Utforming av et høytrykk vannkraftverk med tradisjonelt (åpent) svingekammer (øverst) og lukket luftpute svingekammer (nederst). Fra [5.20].

også fører til økt temperatur i luftputa. Ved raskt pådrag vil luftputa utvide seg og bli avkjølt. Termodynamikken har vært lite utforsket i tidligere studier, og en ønsket derfor å få fram bedre forståelse, regnemetoder og fysisk modellering for å inkludere både hydrauliske og termodynamiske effekter i luftputa.

Hovedresultatene fra forskningsarbeidet kan oppsummeres slik det er gjort av Vereide i PhD-avhandlingen [5.20] og er kort gjengitt nedenfor. I tillegg er det bygget opp både en fysisk modell i laboratoriet og numeriske modeller som er innbyrdes avstemt og verifisert mot målinger i felt. Begge disse kan brukes ved design og optimalisering av nye anlegg av denne typen.

Noen hovedresultater:

- C1: En oversikt over fordeler og utfordringer med bruk av luftputekammer, sammenlignet med tradisjonelle åpne svingekammer
- C2: En ny metodikk for å skalere og representere tunnelsystemet i et vannkraftverk med luftputekammer i en fysisk hydraulisk modell i laboratoriet
- C3: Klarlegging av nøyaktighet i resultatene ved bruk av en fysisk hydraulisk modell for å representere et vannkraftverk med luftputekammer
- C4: En modifisert metode ("Modified Rational Heat Transfer», MRHT) for å beregne termodynamiske forhold i luftputekammeret og varmeutveksling med omgivelsene
- C5: En metodikk for å evaluere virkningen av å strupe innløpet til luftputekammeret
- C6: En undersøkelse av hvordan struping av innløpet påvirker reguleringsstabilitet og funksjon av et vannkraftverk med luftputekammer

Resultater er vist i detalj i PhD-avhandlingen [5.20] og i fire publiserte fagfellevurderte artikler [5.21] – [5.24]. I tillegg er resultater formidlet til det vitenskapelige miljøet gjennom konferansebidrag, til bransjen ved presentasjon på fagmøter og seminar [5.25] – [5.36], og til alminnelig folkeopplysning ved presentasjoner i ulike typer media [5.37] – [5.54]. Ni masterstudenter ved NTNU [5.55] – [5.63] har bidratt i forskningen, noe som også er et viktig bidrag til formidling av resultater ved at disse tar med seg denne kunnskapen når de går ut i arbeidslivet.



Brattset kraftverk – Maskinsal. Foto: Ånund Killingtveit

Brattset kraftverk ligger i Orkla-vassdraget som ble bygd ut for vannkraftproduksjon i årene fra 1978 til 1985. Brattset kraftverk utnytter fallet på 273 meter mellom Storfoss-magasinet og Brattset ved Berkåk.

Tilløpstunnelen er på 16 km, av dette er 12 km fullprofilboret. På grunn av topografien med jevnt skrånende terreng var det vanskelig å bruke et vanlig svingekammer, og løsningen ble å bruke luftputekammer.

Dette er en utsprengt hall i fjellet på 10x10x100 meter (10 000 m³) som ligger ved tilløpstunnelen bare 300 meter fra kraftstasjonen, bak veggen til venstre på bildet. Brattset var den andre kraftstasjonen i verden som ble bygget med svingekammer av denne typen. Driftserfaringene etter snart 35 års drift er gode.

Publikasjoner fra kapittel 5.2

Monografier publisert (doktorgrader)

[5.20] Vereide, Kaspar (2016)

Hydraulics and Thermodynamics of Closed Surge Tanks for Hydropower Plants
NTNU PhD 2016:20
ISBN 978-82-326-1386-1, ISSN 1503:8181 NTNU
<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2385993>

Artikler med fagfelleevaluering

[5.21] Vereide, Kaspar; Lia, Leif; Nielsen, Torbjørn Kristian.

Hydraulic scale modelling and thermodynamics of mass oscillations in closed surge tanks. *Journal of Hydraulic Research* 2015 ;Volum 53.(4) s. 519-524
<http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2015.1050077>

[5.22] Vereide, Kaspar; Lia, Leif; Ødegård, Lars Øyvind.

Monte Carlo Simulation for Economic Analysis of Hydropower Pumped Storage in Nepal. *Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment* 2013 ;Volum 12. s. 39-44
<http://www.nepjol.info/index.php/HN/article/view/9031>

[5.23] Vereide, Kaspar; Richter, Wolfgang; Zenz, Gerald; Lia, Leif.

Surge Tank Research in Austria and Norway. *Wasserwirtschaft* 2015; Volum 105.(1) s. 58-62
<https://www.springerprofessional.de/surge-tank-research-in-austria-and-norway/6109798>

[5.24] Vereide, Kaspar; Tekle, Torbjørn; Nielsen, Torbjørn Kristian.

Thermodynamic Behaviour and Heat Transfer in Closed Surge Tanks for Hydropower Plants. *Journal of Hydraulic Engineering* 2015 ;Volum 141.(6)
<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0000995>

Konferansebidrag

- [5.25] Richter, Wolfgang; Vereide, Kaspar; Schneider, Josef; Knoblauch, Helmut; Lia, Leif; Zenz, Gerald.
Druckluftwasserschlosser für alpine Hochdruckwasserkraftanlagen. Wasserbau Symposium 2014: Wasser- und Flussbau im Alpenraum; 2014-06-25 - 2014-06-27
- [5.26] Richter, Wolfgang; Vereide, Kaspar; Zenz, Gerald.
Hydraulic design and modelling of large surge tanks. 12th International Conference on Pressure Surge, Fluid Transients and Water Hammer; 2015-11-18 - 2015-11-20
https://www.researchgate.net/publication/284714987_Hydraulic_design_and_modelling_of_large_surge_tanks
- [5.27] Vereide, Kaspar.
Air Cushion Surge Chambers. Surge Chamber Workshop; 2013-02-27 - 2013-02-27
- [5.28] Vereide, Kaspar.
Design of Air Cushion Chambers. CEDREN user meeting; 2013-10-29 - 2014-08-30
- [5.29] Vereide, Kaspar.
Det grønne batteriet. EFIKS; 2015-10-13
- [5.30] Vereide, Kaspar.
For svarte svingende. Produksjonsteknisk konferanse; 2015-03-02 - 2015-03-04
- [5.31] Vereide, Kaspar.
Introduksjon til vannkraftprosjekter og risiko. Seminar om vannkraftprosjekter og risiko; 2013-09-10 - 2013-09-10
- [5.32] Vereide, Kaspar.
Surge Chambers for Hydropower Pumped Storage Plants. Norsk Vannkraftsenter Seminar; 2014-12-17 - 2014-12-17
- [5.33] Vereide, Kaspar.
Svingekammeret - Nøkkelen til stabil vannvei. Produksjonsteknisk konferanse (PTK); 2014-03-03 - 2014-03-05
- [5.34] Vereide, Kaspar; Lia, Leif; Nielsen, Torbjørn Kristian.
Physical Modelling of Hydropower Waterway with Air Cushion Surge Chamber (ISBN 9781742721156). 5th International Symposium on Hydraulic Structures; 2014-06-25 - 2014-06-25
- [5.35] Vereide, Kaspar; Richter, Wolfgang; Lia, Leif.
Benefits of the Air Cushion Surge Chamber for Alpine Hydropower Plants. I: 18th International Seminar on Hydropower Plants. Horn: Berger 2014 ISBN 978-3-9501937-9-4. s. 823-832
- [5.36] Vereide, Kaspar; Svingen, Bjørnar; Guddal, Rolv.
Case study: Damaging effects of increasing the installed capacity in an existing hydropower plant. 12th International Conference on Pressure Surge, Fluid Transients and Water Hammer; 2015-11-18 - 2015-11-20

Mediebidrag

- [5.37] **Bakken, Stein Arne; Vereide, Kaspar.**
Strupning av vannvei for økt effektkjøring.
Energiteknikk : fagbladet for energibransjen 2015 (3) s. 11-11
- [5.38] **Bakken, Stein Arne; Vereide, Kaspar.**
Verdens første. Energiteknikk : fagbladet for energibransjen 2014 (2) s. 24-25
- [5.39] **Barstad, Haakon; Killingtveit, Ånund; Vereide, Kaspar.**
Her forberedes pumpekraften. Europower [Fagblad] 2015-10-16
- [5.40] **Falkum, Vidar; Vereide, Kaspar.**
Mener Sirdal er første kraftbrikke. Lister24 [Avis] 2015-11-18
- [5.41] **Gullberg, Anne Therese; Vereide, Kaspar.**
Grønt batteri er utopi. Dagens Næringsliv [Avis] 2015-10-09
- [5.42] **Haudemann-Andersen, Jørn; Vereide, Kaspar.**
Forskerpraten. NRK Trøndelag [Radio] 2015-06-01
- [5.43] **Haugan, Idun; Vereide, Kaspar.**
Norge kan bli Europas grønne batteri. Gemini.no [Internett] 2015-05-29
- [5.44] **Haugan, Idun; Vereide, Kaspar.**
Norske vannkraftverk kan bli Europas grønne batteri. Forskning.no [Internett] 2015-05-29
- [5.45] **Haugan, Idun; Vereide, Kaspar.**
Ombygging til batteri. Dagens Næringsliv [Avis] 2015-05-29
- [5.46] **Hirth, Martin Larsen; Vereide, Kaspar.**
Podcast - Norge som grønnt batteri. Sysla postcasts [Internett] 2015-11-04
- [5.47] **Hjetland, Geir Bjarte; Vereide, Kaspar.**
Vil gjere Norge til eit grønnt batteri for Europa. NRK Sogn og Fjordane [Radio] 2015-06-02
- [5.48] **Hjetland, Geir Bjarte; Vereide, Kaspar.**
Vil ha fortgang i grønn krafteksport med ny teknologi. NRK Sogn og Fjordane [Internett] 2015-06-02
- [5.49] **Korpås, Magnus; Vereide, Kaspar; Gogstad, Peter Joachim.**
Vannkraft - Ren energi som verdens batteri. EFIKS 2015; 2015-10-13 - 2015-10-14
- [5.50] **Lie, Øyvind; Vereide, Kaspar; Killingtveit, Ånund; Bråtveit, Kari.**
Effektkjøring gir fare for turbinhavari. Teknisk Ukeblad 2014 ;Volum 161.(4) s. 62-63
- [5.51] **Matheson, Shaun Henrik; Nordenborg, Ragna; Vereide, Kaspar.**
Tidenes Morgen - Lagre strøm fra Vannkraft. NRK P13 [Radio] 2015-09-21
- [5.52] **Vereide, Kaspar.**
Norge må bli grønnt batteri. Aftenposten [Avis] 2015-11-10
- [5.53] **Vereide, Kaspar.**
Norsk vannkraft som grønnt batteri. Naturlig Onsdag; 2015-11-04 - 2015-11-04
- [5.54] **Vereide, Kaspar.**
Norsk vannkraft som grønnt batteri - start nå!. NTNU Techzone [Internett] 2015-11-13

Masteroppgaver («Diplomoppgaver»)

[5.55] Ola Haugen Havrevoll (2013)

Simulering av pumpekraftverk i LVTrans

Veiledere: Leif Lia og Kaspar Vereide

<http://hdl.handle.net/11250/232637>

[5.56] Ann Kristin Tuseth (2013)

Numerisk modellering av luftputekammer

Veiledere: Leif Lia og Kaspar Vereide

<http://hdl.handle.net/11250/242427>

[5.57] Erik Kjøren (2014)

Numerisk modellering av termodynamiske prosesser i luftputekammer

Veiledere: Nils Reidar Bøe Olsen og Kaspar Vereide

<http://hdl.handle.net/11250/242463>

[5.58] Britt Rasten (2014)

Virkning av hydrauliske transienter på inntaksluker på Tonstad kraftverk

Veiledere Leif Lia og Kaspar Vereide

<http://hdl.handle.net/11250/242511>

[5.59] Daniel Gomsrud (2015)

Design of a Surge Tank Throttle for Tonstad Hydropower Plant

Veiledere: Leif Lia og Kaspar Vereide

<http://hdl.handle.net/11250/2350567>

[5.60] Fredrik Staff Edin (2015)

Innovative Surge Systems for Small Hydro

Veiledere: Leif Lia og Kaspar Vereide

<http://hdl.handle.net/11250/2350564>

[5.61] Robert Stigen Landskaug (2015)

Physical Modelling of Surge Tank Throttling

Veiledere: Leif Lia og Kaspar Vereide

<http://hdl.handle.net/11250/2350561>

[5.62] Eirik Leknes (2016)

Comparison of the Svee and Thoma Stability Criteria for Mass Oscillations in Surge Tanks

Veiledere: Leif Lia og Kaspar Vereide

<http://hdl.handle.net/11250/2404377>

[5.63] Simon Utseth Sandvåg (2016)

Surge Tank Atlas for Hydropower Plants

Veiledere: Leif Lia og Kaspar Vereide

<http://hdl.handle.net/11250/2404373>

6 Virkning i elver og vassdrag

Det er velkjent at vannkraftregulering vil endre hydrologiske forhold i vassdragene nedenfor inntak og kraftverksutløp, og at dette kan ha både fysiske og økologiske virkninger. Det finnes en stor mengde eksisterende kunnskap og erfaringer fra miljøundersøkelser før og etter utførte reguleringer. Men med de endringene som kan forventes framover, både på grunn av endret kjøremønster og endret klima, er ikke all denne kunnskapen tilstrekkelig til å forutse framtidige virkninger, og planlegge eventuelle mottiltak.

Ved planleggingen av CEDREN, ble det klarlagt at det spesielt var to områder der kunnskapsgrunnlaget om fysiske endringer burde forbedres. De to områdene var virkning på erosjon og sedimenttransport og virkning på vanntemperatur og isforhold. Det ble derfor bestemt å spesifisere to arbeidspakker, begge organisert omkring hvert sitt PhD-prosjekt.

En viktig grunn til å velge denne modellen, er at det da bygges opp ny kompetanse og kapasitet for å jobbe videre med disse problemstillingene. Fokuset vil dermed være grunnleggende forskning og metodeutvikling som i neste omgang kan tas i praktisk bruk ved å benytte den kapasiteten som er utviklet. I begge disse prosjektene har det vært lagt stor vekt på utvikling av måleteknikk og bruk av nye og avanserte instrument både i felt og laboratorier. Dette kommer nå til nytte i videre forskning og ved løsning av praktiske oppgaver.

Vi gir en kort introduksjon til hver av disse to arbeidspakkene, med en presentasjon av de viktigste publikasjonene som er utarbeidet i prosjektene, og som bør leses av de som vil gå grundigere inn i temaene.

6.1 Fysiske virkninger i elver og vassdrag

(WP7: Physical effects of load fluctuations in rivers and reservoirs)

Hovedfokus i dette prosjektet har vært å skaffe fram bedre data og bedre teoretisk forståelse av hvordan raske endringer i vannføring og vannstand påvirker og endrer en naturlig elvebunn med et dekklag av grus og stein («gravel-bed river»), se **Figur 6.1**. Dersom endringene blir for store, kan



Ommesfossen i Sauland i Mai 2016. Foto: Ånund Killingtveit

Sauland kraftverk AS har ved kongelig resolusjon av 12.02.2016 fått tillatelse til å bygge Sauland kraftverk i Hjartdal kommune i Telemark. Årlig kraftproduksjon er anslått til om lag 190 GWh.

Kraftproduksjonen tilsvarer det årlige forbruket til rundt 9 500 husstander. Dette vil berøre vannføring i Hjartdøla og Heddøla og blant annet føre til at vannet ledes forbi Ommesfossen.

NVE har i sin samlede vurdering lagt særlig vekt på at Sauland kraftverk vil gi et betydelig bidrag i produksjon av ny fornybar energi der en stor andel er regulerbar kraft. I konsekvensutredningene er det påvist endringer i vanntemperatur og isforhold, erosjon og sediment-transport, flomforhold og grunnvann.

elvbunnen rives opp og eroderes. Det kan skape økt sedimenttransport, fare for utgraving og i verste fall ras.

Dersom det planlegges å endre et etablert vannføringsregime, for eksempel for å kjøre mer effekt («hydropeaking») er det viktig å kunne forutse hvor store endringer som tåles og eventuelle mottiltak i form av sikring og hvor dette må utføres.

Dette er også en viktig problemstilling i vannkrafttunneler, der en vanligvis vil legge igjen en kjørebane av grus og stein for å lette senere adkomst. Også her vil det gradvis etableres et stabilt, hardt dekklag etter hvert som finstoffet vaskes bort. Dette dekklaget vil være stabilt så lenge vannføringsregimet er stabilt. Men dersom en plutselig endrer vannføringsregimet for å kjøre ut større effekt eller med raskere opp- og nedkjøring, så kan dekklaget rives opp og transporteres nedover mot sandfang og i verste fall inn i turbinene og skade disse. Dette er også omtalt i **Kapittel 5**.

For å forutsi hvilke endringer som kan tåles er det viktig å ha gode beregningsmodeller som kan gi kvantitative svar. Slike modeller må bygge på teoretisk forståelse og beskrivelse av hydrodynamiske forhold med hastigheter og krefter fra vannet mot bunnen, og en realistisk beskrivelse av elvbunnen

Figur 6.1. Bunnssubstrat i elva Lundesokna, Sør-Trøndelag. Foto: © S.Spiller



med type og størrelsesfordeling av bunnssubstratet. For å kalibrere og verifisere modellene vil det oftest være nødvendig å bruke både målinger i felt og utføre laboratorieforsøk. I dette prosjektet er disse teknikkene brukt sammen. I Stephan Spillers PhD-avhandling [6.0] er det utført detaljerte studier i lab for å se på virkningen av raske variasjoner i vannføring over en slik elvebunn. Disse forsøkene ble utført i laboratorier for å studere virkning under ulike regimer av endring. Dette er problematisk å studere i naturlige elver, fordi en naturlig elvebunn vil endres under forsøket slik at det blir vanskelig å gjennomføre flere forsøk under helt like betingelser.

Løsningen på dette dilemmaet var å lage en detaljert kopi av en naturlig elvebunn. Dette ble gjort ved å ta en avstøpning som kunne bringes inn i laboratoriet og brukes i gjentatte eksperimenter uten at den ble ødelagt. Det var til og med mulig å ta med «elvebunnen» til andre laboratorier og gjennomføre nye eksperimenter der for å verifisere resultatene og samarbeide med andre forskningsgrupper. [6.5], [6.6], [6.7].

Forsøkene i laboratoriet ved NTNU ble utført i en ny målerenne som ble finansiert fra infrastruktur-prosjektet i CEDREN. Det unike ved denne målerenna er at helningen kan varieres, slik at en kan modellere strømning i både slake og bratte elver. Det var ikke mulig tidligere.



Figur 6.2. Fra åpningen av ny hydraulisk målerenne i Vassdragslaboratoriet på NTNU i 2012. Fra venstre: Olje- og energiminister Ola Borten Moe, Ånund Killingtveit og Atle Harby i CEDREN.
Foto: Thor Nielsen

Studiene i den nye målerenna (nå også kalt "Ola-renna") gjorde det mulig å undersøke tre viktige forhold som er avgjørende for om elvebunnen holder seg stabil eller ikke ved raske variasjoner i vannføringen:

- Skjærspenning mot bunnssubstratet
- Dynamisk løft av partiklene på grunn av hastighetshøyden
- Romlig variasjon i hastighetsfeltet nær bunnen

Det har lenge vært et åpent spørsmål om dynamiske effekter ved raske variasjoner i vannføringen kunne skape ekstra effekter som ikke er ivaretatt i de etablerte modellene som er utviklet og testet for stasjonære forhold. Dette har hittil vært vanskelig å studere, men med de målemetodene som nå ble tilgjengelig i «Ola-renna» ble dette mulig å gjennomføre med god nøyaktighet.

Litt forenklet kan en si at eksperimentene bekreftet at skjærspenningene beregnet med klassiske St Venant-ligninger stemte godt med målinger også for dynamiske forløp, de økte med økende vannføring som forventet. Derimot viste det seg å oppstå helt uventede effekter på dynamisk løft, med tre kortvarige trykkpulsasjoner som fører til ekstra løftekrefter under raskt økende vannføring. Dette kan føre til at stein som en tidligere trodde var stabile likevel kan «plukkes ut» av bunnssubstratet og dermed øke sjansen for erosjon og brudd på dekklaget.

Disse dynamiske effektene kan også tenkes å ha betydning for utveksling fra elvevann til porevann i substratet («Hyphoreic water»). Ettersom dette er en ny erkjennelse er det ventet at forsøkene vil bli gjentatt og forhåpentligvis verifisert i andre laboratorier, slik det er vanlig når nye og uventede effekter blir oppdaget.

Publikasjoner fra kapittel 6.1

Monografier publisert (doktorgrader)

- [6.0] **Spiller, Stephan Mark (2014)**
Physical effects of load fluctuations in rivers
NTNU PhD 2014:319
ISBN 978-82-326-0550-7 ISSN 1503:8181 NTNU
<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/279013>

Artikler med fagfellevurdering

- [6.1] **Rutschmann, Peter; Sepp, Albert; Geiger, Franz; Barbier, Julien; Spiller, Stephan.**
A new take on hydropower design. International Water Power and Dam Construction 2011 ;Volum 63.(03) s. 22-25
<http://www.waterpowermagazine.com/features/featurea-new-take-on-hydropower-design/>
- [6.2] **Spiller, Stephan Mark; Ruther, Nils; Friedrich, Heide.**
Dynamic lift on an artificial static armor layer during highly unsteady open channel flow. Water 2015 ;Volum 7.(9) s. 4951-4970
<http://www.mdpi.com/2073-4441/7/9/4951/htm>
- [6.3] **Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Belete, Kiflom Wasihun; Strellis, Brendon.**
Assessing environmental effects of hydropower peaking by 3D numerical modeling. Flow simulation in hydraulic engineering : Dresdner wasserbauliche Mitteilungen 2011 ;Volum 1.(1) s. 79-86
<http://vzb.baw.de/publikationen/dresdner-wasserbauliche-mitteilungen/0/SpillerAssessing%20environmental%20effects%20of%20hydropowerf.pdf>
- [6.4] **Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Killingtveit, Ånund.**
Physical Effects of Load Fluctuations in Rivers. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft 2012 (125) s. 52-59
- [6.5] **Gergely T. Török; Gergely T. Török; Ruther, Nils.**
3D CFD Modeling of Local Scouring, Bed Armoring and Sediment Deposition Water 2017, 9(1), 56; doi:10.3390/w9010056
<http://www.mdpi.com/2073-4441/9/1/56>
- [6.6] **Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Baumann, Benjamin.**
Form-induced stress in non-uniform steady and unsteady open channel flow over a static rough bed. International Journal of Sediment Research
Volume 30, Issue 4, December 2015, Pages 297–305
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001627915000645>

Konferansebidrag

- [6.7] Navaratnam, Christy Ushanth; Aberle, Jochen; Spiller, Stephan Mark.
Geometric and Hydraulic Assessment of the Accuracy of a Bed Moulding Technique. 36th IAHR World Congress; 2015-06-28 - 2015-07-03
- [6.8] Ruther, Nils; Huber, Sonja; Spiller, Stephan; Aberle, Jochen.
Verifying a Photogrammetric Method to Quantify Grain Size Distribution of Developed Armor Layers. 35th IAHR World Congress; 2013-09-08 - 2013-09-13
- [6.9] Spiller, Stephan.
En elvebunn på reise. Produksjonsteknisk konferanse 2014 - Kunnskap om kraft; 2014-03-03 - 2014-03-05
- [6.10] Spiller, Stephan.
En elvebunn på reise. CEDREN årsmøte; 2014-04-24 - 2014-04-24
- [6.11] Spiller, Stephan.
Physical Effects of Load Fluctuations in Rivers. Master Class - Experimental investigation of river flow and sediment transport; 2012-09-04 - 2012-09-04
- [6.12] Spiller, Stephan.
Physical effects of load fluctuations in rivers - HydroPEAK WP7. CEDREN seminar; 2012-04-25 - 2012-04-26
- [6.13] Spiller, Stephan; Ruther, Nils.
Armor layers in regulated rivers during unsteady flows. 3rd Nordic Seminar on Hydropower and Sediment Transport; 2013-05-29 - 2013-05-30
- [6.14] Spiller, Stephan; Ruther, Nils.
HydroPEAK: Physical effects of load fluctuations in rivers. Measuring turbulence and sediment concentrations in particle-laden flow; 2011-03-22 - 2011-03-22
- [6.15] Spiller, Stephan; Ruther, Nils.
Physical effects of load fluctuations in rivers. The 2nd International Workshop on river and reservoir hydrodynamics and morphodynamics; 2011-06-16 - 2011-06-17
- [6.16] Spiller, Stephan; Ruther, Nils.
Physical effects of load fluctuations in rivers and reservoirs. CEDREN-HydroPEAK researcher meeting; 2011-10-25 - 2011-10-26
- [6.17] Spiller, Stephan; Ruther, Nils.
The Impact of Hydropower Peaking on Gravel Beds. Hydro2013 International Conference; 2013-10-07 - 2013-10-09
- [6.18] Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Baumann, Benjamin.
Artificial Reproduction of the Surface Structure in a Gravel Bed. 2nd European IAHR Congress; 2012-06-27 - 2012-06-29
- [6.19] Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Baumann, Benjamin.
PIV Measurements of Steady Flow over an Artificial Static Armor Layer. 35th IAHR World Congress; 2013-09-08 - 2013-09-13
- [6.20] Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Belete, Kiflom Wasihun; Strellis, Brendon.
Assessing environmental effects of hydropower peaking by 3D numerical modeling. 34. Dresdner Wasserbaukolloquium 2011; 2011-03-10 - 2011-03-11
- [6.21] Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Casas-Mulet, Roser; Friedrich, Heide.
Pore Water Exchange In Gravel Bed Rivers During Hydropower Peaking Events. 10th International Symposium on Ecohydraulics (ISE 2014); 2014-06-23 - 2014-06-27
- [6.22] Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Friedrich, Heide.
Mitigation measures for unsteady flow effects on riverbeds during hydropower peaking. IAHR Riverflow 2014; 2014-09-03 - 2014-09-05
- [6.23] Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Killingtveit, Ånund.
Physical Effects of Load Fluctuations in Rivers. 14. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten; 2012-06-25 - 2012-06-26
- [6.24] Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Koll, Klaus; Koll, Katinka.
Bed load movement over a fully developed armor layer - A tracer experiment. IAHR River Flow 2012; 2012-09-05 - 2012-09-07
- [6.25] Friedrich, Heide; Spiller, Stephan; Ruther, Nils.
Near-bed flow over a fixed gravel bed. I: Proceedings of the River Flow 2014 International Conference on Fluvial Hydraulics. CRC Press 2014 ISBN 978-1-138-02674-2. s. 279-285
- [6.26] Navaratnam, Christy Ushanth; Aberle, Jochen; Spiller, Stephan Mark.
Evaluation of the accuracy of a bed casting technique. I: River Flow 2016. CRC Press 2016 ISBN 978-1-138-02913-2. s. 398-403

Konferansebidrag (forts.)

- [6.27] **Ruther, Nils; Huber, Sonja; Spiller, Stephan; Aberle, Jochen**
Verifying a Photogrammetric Method to Quantify Grain Size Distribution of Developed Armor Layers. I: Proceedings of the 35th IAHR World Congress. China: Tsinghua University Press 2013 ISBN 978-7-89414-588-8.
- [6.28] **Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Baumann, Benjamin.**
PIV Measurements of Steady Flow over an Artificial Static Armor Layer. I: Proceedings of the 35th IAHR World Congress. China: Tsinghua University Press 2013 ISBN 978-7-89414-588-8
- [6.29] **Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Casas-Mulet, Roser; Friedrich, Heide.**
Pore Water Exchange In Gravel Bed Rivers During Hydropower Peaking Events. I: 10th International Symposium on Ecohydraulics (ISE 2014). Trondheim: NTNU 2014 s. 50-53
- [6.30] **Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Friedrich, Heide.**
Mitigation measures for unsteady flow effects on riverbeds during hydropower peaking. I: Proceedings of the River Flow 2014 International Conference on Fluvial Hydraulics. CRC Press 2014 ISBN 978-1-138-02674-2. s. 1807-1812
- [6.31] **Spiller, Stephan; Ruther, Nils; Koll, Klaus; Koll, Katinka.**
Bed load movement over a fully developed armor layer – A tracer experiment. I: River Flow 2012. Taylor & Francis 2012 ISBN 978-0-415-62129-8. s. 465-471
- [6.32] **Török, G.T.; Baranya, S; Ruther, Nils; Spiller, Stephan.**
Laboratory analysis of armor layer development in a local scour around a groin. I: Proceedings of the River Flow 2014 International Conference on Fluvial Hydraulics. CRC Press 2014 ISBN 978-1-138-02674-2. s. 1455-1462

Masteroppgaver («Diplomoppgaver»)

- [6.33] **Øyvind Pedersen (2012)**
3D Numerical Modelling of Hydropeaking Scenarios in Norwegian Regulated Rivers
Veileder: Nils Rüther
- [6.34] **Benjamin Baumann (2012)**
Particle Image Velocimetry Measurements of Steady Flow over an Artificial Riverbed
Veileder: Nils Rüther
- [6.35] **Sonja Huber (2013)**
Grain Size Analysis at Different Stages of Armor Layer Formation
Veileder: Nils Rüther, Stephan Spiller og Kordula Schwarzwälder
- [6.36] **Vincenzo Sessa (2014)**
3D Numerical modelling of flow over an artificial gravel bed
Veileder: Nils Rüther og Carlo Gualtieri
<http://hdl.handle.net/11250/2350482>

6.2 Virkninger på isforhold i elver og vassdrag

(WP8: Ice problems in rivers)

En mer varierende vannføring på grunn av endret kjøremønster vil kunne påvirke isforhold i vassdraget, ofte på en negativ måte. Denne problemstillingen har vært en gjenganger i mange miljøstudier og erstatningsskjønnv den norske kraftverksreguleringer. Det er samlet inn observasjoner og empirisk kunnskap, mens det ennå var lite fokus på modeller som kan brukes til å gjøre kvantifiserbare analyser for endrede forhold. Internasjonalt har det vært mest fokus på store og dype elver med liten fall, for eksempel i Canada og Russland. Norske elver er til sammenligning små og grunne og har bratte fall, ofte også preget av ustabil klima med hyppige vekslinger mellom frost og mildvær.

I tillegg til endring i kjøremønster kommer spørsmålet om hvordan klimaendringene vil virke inn, og hvordan den samlede virkningen kan bli. Med de klimaendringene som forventes vil en trolig få kortere issesong og hyppigere veksling mellom kalde perioder med islegging og varmere perioder med økt vannføring. Dette kan føre til svekket isdannelse og oppbrytning av isdekket og kanskje isgang. Økt hyppighet av isganger kan få negative virkninger både miljømessig, på tekniske installasjoner som inntak og bruer, og for arealbruk langs vassdragene. Dette kan skje i både regulerte og uregulerte elver.

For vannkraftsektoren kan en se for seg to helt ulike scenarier:

- Klimaendringene gjør isforholdene mer ustabile og for å unngå større problem enn i dag må kjøringen vinterstid pålegges strengere restriksjoner og mindre fleksibilitet. Dette vil kunne føre til redusert verdi av vannkraften i slike vassdrag.
- Klimaendringene vil føre til at islegging, i hvert fall i nedre deler av vassdraget, mer eller mindre opphører, og dermed kan dagens restriksjoner modereres eller fjernes helt. Dette vil kunne føre til større fleksibilitet i drift og økt verdi av vannkraften

For å kunne studere samlet virkning av endret kjøremønster og endret klima, og hvilke endring i kjøremønster som kan være akseptable i et framtidig varmere klima, er det nødvendig å ha gode prosessbaserte modeller som tar hensyn til både klimatiske forhold, kjøremønster i kraftverkene og de fysiske prosessene som styrer islegging og oppbrytning av isdekket.

Utvikling av modeller ble derfor definert som et hovedmål i dette prosjektet. Det ble organisert med to PhD-studenter som hovedaktivitet, supplert med andre forskere. En PhD (Netra Timalsina på **Figur 6.3**) var fullt ut finansiert av CEDREN mens den andre (Solomon Gebre) var finansiert av NTNU og lagt inn som en del av NTNUs egeninnsats. Resultatene er dokumentert i PhD-avhandlingene [6.37] og [6.38] og i en rekke publikasjoner [6.39] til [6.46].

Det har også vært mulig å trekke inn flere studenter som har utført feltarbeid og levert sin masteroppgave innenfor viktige deler av prosjektet [6.59] – [6.63], samtidig som dette har gitt verdifull kompetanseoverføring til bransjen.

PhD-arbeidet til Netra Timalsina er utført ved å kombinere feltarbeid, datainnsamling, modellering og verifisering av modell mot observerte isforhold. En prosessbasert endimensjonal hydraulisk modell («Mike 11») med integrert ismodul («Mike-Ice») ble testet ut for bruk i typiske norske elver. Hoveddelen av arbeidet ble utført i Orklavassdraget (**Figur 6.4**). Dette vassdraget ble bygd ut tidlig på 80-tallet og er ganske komplekst med tre store og flere mindre magasin, fem kraftstasjoner og en rekke overføringer med bekkeinntak. Isforhold hadde avgjørende betydning for hvordan vassdraget ble tillatt utbygd, og det er også sterke restriksjoner på drift vinterstid, for å unngå is-problem særlig på strekningen fra Brattset til Svorkmo.

En hovedkonklusjon fra modelltilpasningen i Orkla er at Mike-Ice modellen fungerte bra og synes å være et godt verktøy for å studere hvordan vannkraftreguleringen påvirker isforhold i elva.

I neste trinn ble modellen brukt for å studere hvordan klimaendringer vil kunne spille inn, sammen med påvirkningen fra vannkraftreguleringen. Som ventet er konklusjonen at det vil bli færre dager med forhold for islegging, kortere perioder med isdekke på elva og høyere vanntemperatur. I denne studien ble det brukt flere modeller koblet sammen:

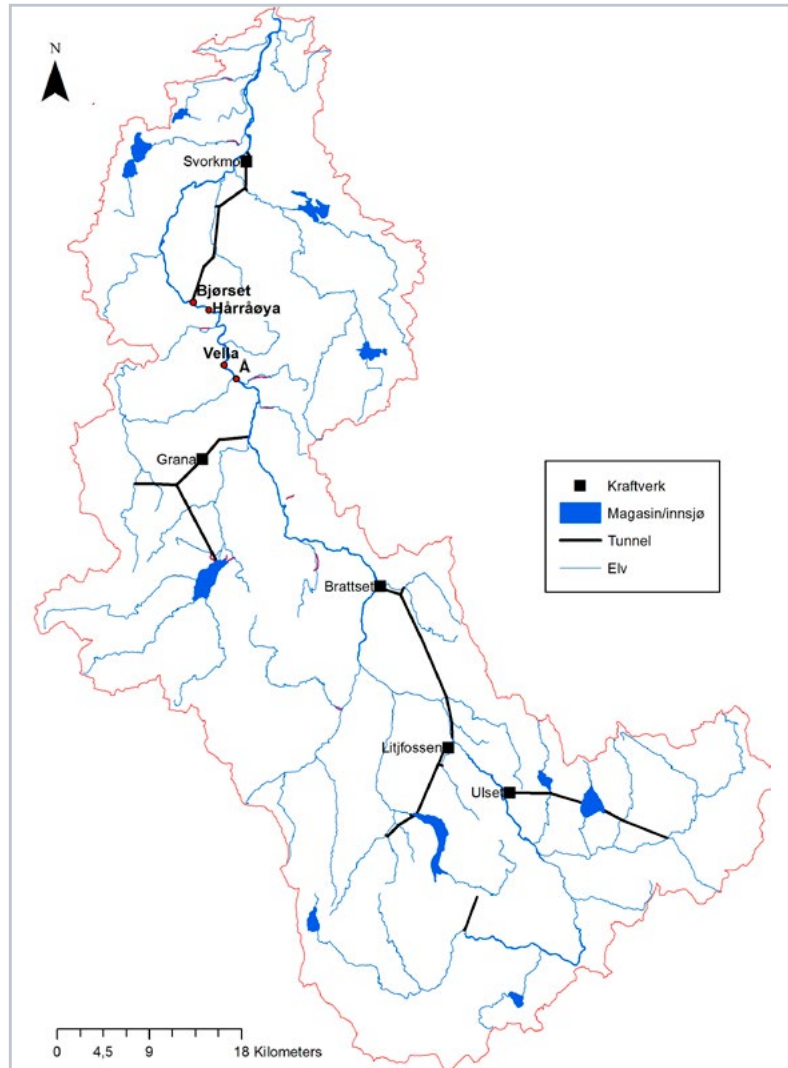
- Nedskalering av data fra globale klimamodeller (GCM)
- Nedbør-avløpsmodell for å regne om til tilsig (HBV)
- Reguleringsmodell for å simulere drift av kraftverkssystemet (nMAG)
- Mike-Ice modellen for beregning av hydrauliske forhold og islegging

Figur 6.3. PhD-stipendiat Netra Timalsina på feltoppdrag ved en vinterlig Sokna. Her ble det samlet inn data om isforhold og klima gjennom flere felt-sesonger. Bildet viser en situasjon med bunnis der vannet strømmer oppe på isen og er svært eksponert for frost, noe som fører til videre oppbygging av is i elveløpet.



En interessant analyse er utført for strekningen fra utløpet av elva Grana og ned til inntaket til Svorkmo kraftverk ved Bjørset. Dagens reglement krever at kraftverkene oppstrøms Bjørset må stoppes umiddelbart dersom Svorkmo kraftverk må stoppe. Dette er ut fra en tankegang at en kan hindre overløp ved dammen på Bjørset som kan trigge oppbrytning av isdekket nedenfor dammen og dermed starte en isgang. Denne strekningen er spesielt utsatt for isgang på grunn av gradienten i denne delen av elva. Dette var en hovedgrunn for at Svorkmo kraftverk ble bygget i sin tid fordi en da kunne føre vannet forbi denne kritiske strekningen vinterstid.

Figur 6.4.
Orklavassdraget,
reguleringssystem og
viktige lokaliteter for
analyse av isforhold.





Figur 6.5. Bunnisdannelse i Sokna. Foto: Netra Timalsina

Resultatet fra modellkjøringene viser at denne restriksjonen trolig er unødvendig. Dersom en får en uventet stopp i Svorkmo kraftverk hjelper det lite å også stoppe de to kraftverkene Brattset og Grana oppstrøms. Det vil allerede være så store vannmengder i elva at disse vil føre til overløp ved dammen på Bjørset og bryte opp isen på strekningen nedover mot Svorkmo uansett, i tillegg vil det kunne medføre uheldige miljømessige virkninger å stoppe kjøringene og redusere vannføringen i elva oppstrøms Bjørset så hurtig. Konklusjonen er at denne restriksjonen er unødig begrensende og ikke gir noen positive virkninger av betydning.

Vi kan også nevne at det er utført et omfattende feltarbeid i den uregulerte elva Sokna, en sideelv til Gaula. Her er det spesielt sett på dannelse av bunnis som er en dominerende prosess i denne elva (**Figur 6.5**). Bunnis-dannelsen fører til at det bygger seg opp isdammer og at vannstanden stiger og at det etter hvert danner seg en massiv isflate som er forankret i bunnen («Anchor-ice») og med en meanderende elv oppå isen. Siden vannet hele tiden flyter oppå isen kan det føre til at store is-mengder kan bygges opp på kort tid i kuldeperioder, disse kan igjen gi kraftig isgang når det blir mildvær og bunnisen løsner og fraktes nedover i elva. Det omfattende datamaterialet fra feltstudiene i Sokna vil være et godt grunnlag for å utvikle og teste modeller for bunnisdannelse, en prosess som er lite forstått og ikke inkludert i dagens ismodeller.

Publikasjoner fra kapittel 6.2

Monografier publisert (doktorgrader)

- [6.37] Timalsina, Netra Prasad (2014)
Ice conditions in the current and future climate
NTNU PhD 2014:367
ISBN 978-82-326-0150-9, ISSN 1503:8181
<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/242539>
- [6.38] Gebre, Solomon Bogale (2014)
Climate Change Impacts on Winter Hydrological Regimes: Implications for Hydropower Operation
NTNU PhD 2014:113
ISBN 978-82-326-0646-7, ISSN 1503:8181
<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/242458>

Artikler med fagfellevurdering

- [6.39] Gebre, Solomon Bogale; Alfredsen, Knut; Lia, Leif; Stickler, Morten; Tesaker, Einar.
Ice Effects on Hydropower Systems - A Review. *Journal of Cold Regions Engineering* 2013, 27(4), pp.196-222
DOI:10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000059
[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000059](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000059)
(Ble tildelt "Best Paper Award" pris 2013-14 for *Cold Regions Engineering*)
- [6.40] Timalsina, Netra Prasad; Charmasson, Julie; Alfredsen, Knut.
Simulation of the ice regime in a Norwegian regulated river. *Cold Regions Science and Technology* 2013 ;Volum 94. s. 61-73
<https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/simulation-of-the-ice-regime-in-a-norwegian-regulated-river-Fu70JqJS1S>
- [6.41] Gebre, Solomon Bogale; Timalsina, Netra Prasad; Alfredsen, Knut.
Some Aspects of Ice-Hydropower Interaction in a Changing Climate. *Energies* 2014 ;Volum 7.(3) s. 1641-1655
<http://www.mdpi.com/1996-1073/7/3/1641/pdf>
- [6.42] Gebre, Solomon Bogale; Alfredsen, Knut; Boissy, T.
Sensitivity to climate change of the thermal structure and ice cover regime of three hydropower reservoirs. *Journal of Hydrology* 2014 510:208-227
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413009207>
- [6.43] Gebre, Solomon Bogale; Alfredsen, Knut.
Contemporary trends and future changes in freshwater ice conditions: inference from temperature indices. *Hydrology Research* 2014 doi:10.2166/nh.2013.213 45(3):455-478
<http://hr.iwaponline.com/content/45/3/455>
- [6.44] Gebre, Solomon Bogale; Alfredsen, Knut; Boissy, T.
Sensitivity of lake ice regimes to climate change in the Nordic Region *The Cryosphere* 2014 8:1589-1605
<http://hdl.handle.net/11250/2387707>
- [6.45] Timalsina, Netra Prasad; Alfredsen, Knut; Killingtveit, Ånund.
Impact of climate change on ice regime in a river regulated for hydropower. *Canadian journal of civil engineering (Print)* 2015 ;Volum 42.(9) s. 634-644
<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/cjce-2014-0261#.WLP3J-QzWUK>
- [6.46] Timalsina, Netra Prasad; Beckers, Felix; Alfredsen, Knut.
Modelling winter operational strategies of a hydropower system. *Cold Regions Science and Technology* 2016; Volum 122. s. 1-9
<http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.11.002>

Konferansebidrag

- [6.47] **Alfredsen, Knut; Gebre, Solomon Bogale; Boissy, Thibault; Timalsina, Netra Prasad.**
Hva skjer med isen i vassdragene i et nytt klima?. CEDREN Årsseminar; 2013-04-25 - 2013-04-25
- [6.48] **Alfredsen, Knut; Gebre, Solomon Bogale; Timalsina, Netra Prasad.**
Current and future ice scenarios in regulated rivers in Norway. Cryosphere-Atmosphere Interactions in a Changing Arctic Climate (CRAICC) Annual Meeting, Iceland; 2011-10-10 - 2011-10-14
- [6.49] **Alfredsen, Knut; Timalsina, Netra Prasad.**
STRATEGIES FOR MODELLING WINTER HABITAT AT DIFFERENT SCALES. 10th International conference on ecohydraulics; 2014-06-23 - 2014-06-27
- [6.50] **Gebre, Solomon Bogale; Timalsina, Netra Prasad; Alfredsen, Knut.**
Impacts of climate change on river ice in Norway and its influence on infrastructure – A general perspective. Cryosphere-Atmosphere Interactions in a Changing Arctic Climate (CRAICC) Kick off Meeting, Helsinki; 2011-02-01 - 2011-02-03
- [6.51] **Timalsina, Netra Prasad; Alfredsen, Knut.**
Climate change data handling using R Program. Talk program; 2014-03-26 - 2014-03-26
- [6.52] **Timalsina, Netra Prasad; Alfredsen, Knut.**
Climate change impact on hydrology, hydro power and ice. Talk program; 2014-03-26 - 2014-03-26
- [6.53] **Timalsina, Netra Prasad; Alfredsen, Knut.**
Climate change impact on the river ice regime in a Norwegian regulated river. 17th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers; 2013-07-22 - 2013-07-24
http://cripe.civil.ualberta.ca/Downloads/17th_Workshop/Timalsina-et-al-2013.pdf
- [6.54] **Timalsina, Netra Prasad; Alfredsen, Knut.**
Simulation of Hydropower Impacts on Ice Regime in a Norwegian River. 2011 CRIPE Workshop on river ice; 2011-09-18 - 2011-09-22
http://cripe.civil.ualberta.ca/Downloads/16th_Workshop/Timalsina-Alfredsen-2011.pdf
- [6.55] **Timalsina, Netra Prasad; Stenhaus, Siri Almanning; Alfredsen, Knut.**
Hydropower Impact on Ice Regime. Northern Research Basins; 2011-08-15 - 2011-08-20
- [6.56] **Alfredsen, Knut.**
Modelling ice effects on head loss at hydropower intakes. (2015) In: Proceedings of the 18th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Quebec City, Canada: Committee on River Ice Processes and the Environment 2013 s.1-10
- [6.57] **Heggen, Siv; Alfredsen, Knut**
Ice breakup in small Norwegian streams. In: Proceedings of the 17th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Edmonton, Canada: Committee on River Ice Processes and the Environment 2013 s.55-72
- [6.58] **Alfredsen, Knut; Stickler, Morten**
Dynamic ice formation processes in two Norwegian rivers - implications for the environment and hydro-power. In: Proceedings of the 17th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Edmonton, Canada: Committee on River Ice Processes and the Environment 2013 s.1-10

Masteroppgaver («Diplomoppgaver»)

- [6.59] **Siri Almanning Stenhaus (2011)**
Modelling of ice conditions in the River Orkla
Veileder: Knut Alfredsen
- [6.60] **Thibault Boissy (2012)**
Current and future lake-ice phenology in the Nordic area
Veileder: Knut Alfredsen
- [6.61] **Siv Heggen (2013)**
Ice breakup in small Norwegian streams
Veileder: Knut Alfredsen
<http://hdl.handle.net/11250/232634>
- [6.62] **Felix Becker (2014)**
Evaluation of winter shutdown scenarios on the river Orkla
Veiledere: Knut Alfredsen og Netra Timalsina
- [6.63] **Filip Patocka (2014)**
Environmental Impacts of Pumped Storage Hydro Power Plants
Veileder: Knut Alfredsen og Ånund Killingtveit
<http://hdl.handle.net/11250/242532>

7 Klimaendringer og virkning på vannkraft

Klimaendringer er et tema som er høyt oppe på dagsorden. Endringer i nedbør og temperatur vil kunne påvirke hydrologien og gi endringer i mengde og variasjon av tilsig til kraftverkene. Virkningen av framtidige klimaendringer kan derfor være både positive og negative for vannkraft, avhengig av hvordan nedbørmengde og –mønster endres. Klima og vannkraft har ikke vært et spesielt tema i FME-kontrakten for CEDREN, men har kommet inn gjennom den egeninnsatsen som særlig NTNU har utført. Dette har vært en bevisst prioritering fordi det tidlig ble klart at spørsmålet om klimaendringer og virkninger på vannkraftsystemet ville komme opp og bli etterspurt i løpet av CEDREN-perioden, for eksempel i forbindelse med IPCC arbeid. Forskningen på klimaendringer og virkning på vannkraft er i hovedsak utført gjennom tre PhD-arbeider som alle har vært finansiert av NTNU, [7.01], [7.02] og [7.03] samt i arbeid med en spesialrapport om fornybar energi og klimaendringer i regi av IPCC [7.1], [7.2] og [7.3].

Globalt viste våre undersøkelser [7.4] at vannkraftpotensialet trolig ikke endres så mye når en ser fram mot 2100, men vi kan finne store regionale variasjoner både i Europa og i resten av verden, med eksempel på både økende om minkende vannkraftpotensial. I Nord-Europa, inkludert Norge, ventes en økning i nedbør og avrenning, noe som vil gi større vannkraftproduksjon. Lengre sør i Europa og i deler av Øst-Europa ventes det en reduksjon i vannkraftpotensial på grunn av redusert nedbør og økende fordampning. Særlig området rundt Middelhavet inkludert Balkan og Tyrkia ventes å få en betydelig reduksjon både i nedbør, tilsig og kraftproduksjon.

For å kunne gjøre analyser av klimaendringenes virkning på vannkraft er det nødvendig å ta i bruk en rekke ulike modeller som til sammen fører informasjonen om klima i globale klimamodeller (GCM) over til virkning på hydrologi og deretter på vannkraftsystemet. En stor del av arbeidet som er utført i PhD-prosjektene og som blir oppsummert her, gjelder metodeutvikling og testing av ulike GCM-datasett. Det er selvsagt fokusert mye på å beregne virkninger på mengde og fordeling av energiproduksjonen, men også på tema som dam sikkerhet og virkning på isforhold i vassdrag, kunnskap som er viktig for å forstå total påvirkning av vannkraftsystemet.



Shire River like oppstrøms for Liwonde Barrage i Malawi. Foto: Ånund Killingtveit

Shire River er navnet på elva som renner ut av Malawi-sjøen og mot sør-øst til samløp med Zambezi. Malawisjøen er en av de største sjøene i Afrika og har normalt et svært stabilt utløp til Shire, med vannføring på omkring 300 m³/s. Shire blir ofte karakterisert som «livsnerven» i Malawi på grunn av den stabile vannføringen som gir grunnlag for vannkraftproduksjon, vannforsyning og irrigasjon til store plantasjer.

Nesten 100% av strømproduksjonen i Malawi kommer fra vannkraftverkene i Shire, de ligger på rekke og rad fra noen km nedenfor der bildet er tatt. Men denne stabiliteten er sterkt truet av klimaendringer, og utsiktene for Malawi gir grunn til bekymring.

Malawi ligger i den del av Afrika der det ventes store klimaendringer, med reduksjon i nedbør og økning i temperatur og fordampning. Selv små endringer i klimaet kan gi store endringer i vannbalansen for Malawi-sjøen, og gi betydelige reduksjoner i vannføring i Shire. Det er faktisk fullt mulig at det i verste fall kan føre til at Shire tørker helt opp og at det ikke blir noe vann igjen til kraftverk, vannforsyning og irrigasjon. Det er derfor viktig å følge nøye med på utviklingen for å treffe mottiltak og sikre energiforsyningen fra andre kilder dersom dette skulle skje. Hele Zambezi-vassdraget inkludert Shire er med i de studiene som er utført av PhD-student Byman Hamududu og referert til senere i dette kapitlet.

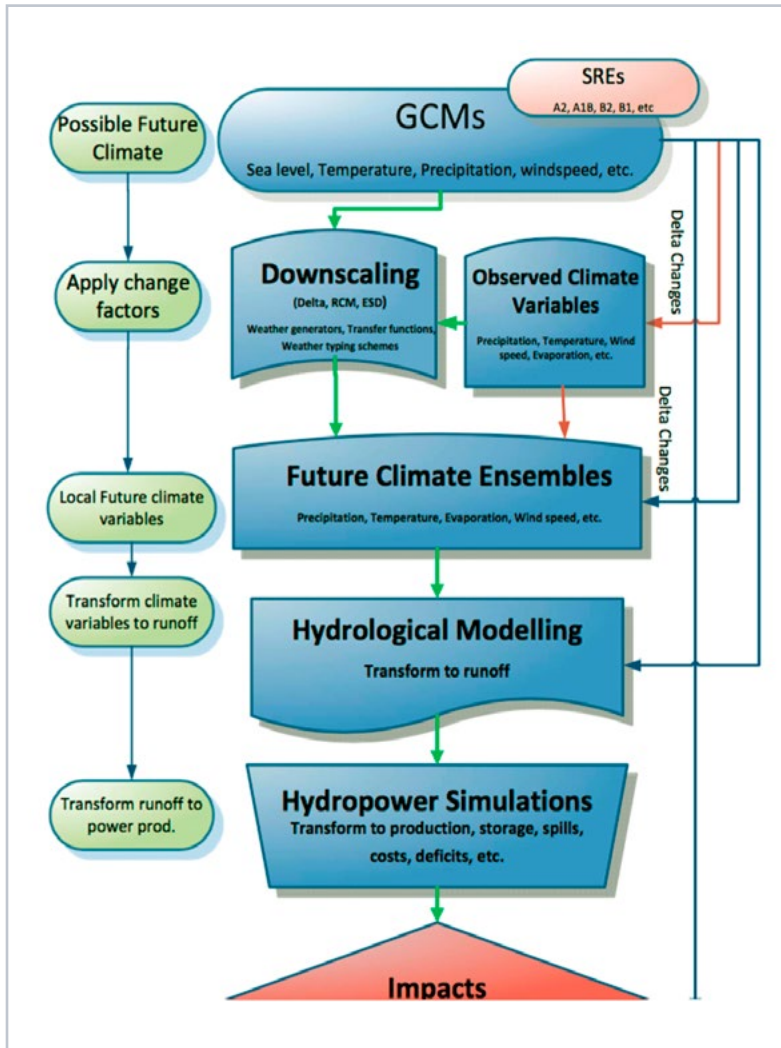
7.1 Beregning av virkninger av klimaendringer på vannressurser

Gjennom flere studier og rapporter fra International Panel on Climate Change (IPCC) er det klarlagt at klimaet ventes å endre seg betydelig gjennom dette hundreåret, og at en innen 2100 kan få en global økning i temperatur på 2°C eller mer, avhengig av hvilke tiltak som settes inn for å begrense klimaendringene. En slik endring vil også føre til endring i nedbørmengde og –fordeling, og i neste omgang i hydrologiske forhold og påvirke en rekke sektorer som landbruk og vannforsyning, og også energiproduksjon og vannkraft.

Endringer som kan ventes i hydrologiske forhold kan manifestere seg i form av endring i:

- Avløpsvolum – total mengde vann tilgjengelig
- Sesongfordeling av avløpet (sommer/vinter, regntid/tørketid)
- Ekstremer i form av flom og/eller tørke
- Sedimenter – mengde og fordeling i tid
- Vanntemperatur
- Isforhold

For å kunne kvantifisere retning og størrelsesorden på endringene er det nødvendig å kunne regne på hvordan endringene i globalt klima forplanter seg nedover og til slutt påvirker spesifikke vassdrag og kraftverk. Noen hovedtrinn i en slik analyse er vist i **Figur 7.1**. I de fleste av de studiene som blir referert her går analysen i trinn fra globale klimamodeller (GCMs) som er kjørt for flere ulike utslippsscenarioer (SRES) og videre ved å etablere typiske endringer i forhold til dagens klima (Delta changes) som kombinert med data for dagens klima (Observed Climate Variables) gir tidsserier for framtidig klima. Klimadata for ulike framtidige klimaalternativ («Local Future climate variables») kjøres så inn i en hydrologisk modell som regner om fra klima til avløp og gir framtidig avrenning, typisk på døgn eller måneds tidsoppløsning. Disse avløpsdataene kjøres så inn i en modell av vannkraftsystemet som beregner vannkraftproduksjon. En sammenligning med resultat for dagens klima viser hvilke endringer som kan ventes på grunn av klimaendringen.



Figur 7.1. Hovedtrinn i arbeidet med å beregne virkninger av klimaendring på vannkraftsystemet. Figuren er hentet fra [7.02] som igjen bygger på [7.03] og [7.20].

7.2 Noen eksempler på virkning på vannressurser og vannkraft

Virkning av klimaendringer på vannressurser og vannkraft er studert i en rekke prosjekt som i hovedsak er finansiert utenfor den direkte FME-bevilgningen og som har vært delbidrag til NTNUs egeninnsats («in-kind») i CEDREN. Dette har bidratt til å utfylle CEDREN-programmet med både utvikling av verktøy og eksempler for å belyse noen av de mange virkninger som kan inntreffe for vannkraftsystemet. Disse studiene kan deles inn i tre hovedgrupper:

- Deltagelse i IPCC-arbeid om fornybar energi og klima, med hovedvekt på vannkraft
- Metodeutvikling og modeller for beregning av virkninger på vannkraftsystemet
- Virkninger på det norske vannkraftsystemet
- Virkninger på det vannkraftsystemet i Afrika

Videre viser vi noen eksempler fra arbeidet med klimaendringer og vannkraft gjennom CEDREN perioden, i hovedsak studier som er finansiert gjennom egeninnsats fra NTNU:

7.2.1 IPCC-rapport om fornybar energi

Denne rapporten («Special Report on Renewable Energy – SRREN») ble utarbeidet i perioden 2008-2012 og gir svar på hvilket bidrag fornybar energi kan ha for å begrense klimaendringer. Ånund Killingtveit ble foreslått som en av tre norsk deltakere (Lead Author) med spesielt ansvar for vannkraft, sammen med Tormod Schei fra Statkraft. Første trinn i arbeidet var å utarbeide og få godkjent en plan for innhold i vannkraft-kapitlet i et såkalt «Scoping document» (<https://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/proc-renewables-lubeck.pdf>), deretter å delta i en arbeidsgruppe for å skrive dette bidraget og følge arbeidet gjennom en omfattende høringsaktivitet med revisjoner i flere trinn fram til en ferdig rapport. En viktig oppgave i denne første fasen var å arbeide for og til slutt få gjennomslag for at all vannkraft skulle betraktes som fornybar energi og at det ikke bare skulle gjelde for småkraft. På dette tidspunkt (2008) var det sterke krefter internasjonalt som hevdet at stor vannkraft ikke burde inkluderes i rapporten, fordi en mente at den ikke burde regnes som en fornybar energi. Dette kan virke merkelig i dag, men var nok et forsøk på å holde vannkraft

utenfor for lettere å få prioritet for andre nye fornybare teknologier som sol og vind. Hele SRREN-rapporten (https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf) kan lastes ned fra IPCC. Hovedbidrag som kan knyttes til CEDREN finner vi i kapittel 5 «Hydropower» [7.1], i «Technical Summary» [7.2] og i et vedlegg som beskriver metodikk for beregning av levetidskostnader (LCOE) for fornybare energityper [7.3]. Killingtveit fikk et spesielt ansvar for å samle informasjon og oppsummere virkninger av klimaendring på vannkraftsystemet. Det viste seg at det da ennå ikke var utført noen studier som kunne fortelle om virkning globalt sett, og dette gjorde det vanskelig å svare på spørsmålet om klimaendringene kunne være en trussel mot vannkraftsystemet og redusere vannkraftens bidrag til framtidig fornybar energi. Det ble derfor satt i gang en undersøkelse ved Institutt for vann- og miljøteknikk (NTNU) som en del av et pågående PhD-prosjekt (Byman Hamududu, 2012). Det resulterte i en publikasjon [7.4] som dannet grunnlaget for konklusjonen som ble tatt inn i SRRENs kapittel 5.2.2. Konklusjonen var at globalt vannkraftpotensial ikke blir redusert, men tvert imot får en økning, men at det blir store regionale forskjeller, noen med økning og andre med reduksjon og noen med små eller ingen klare endringer.

7.2.2 Klimaendringer og virkning på produksjon og layout for et planlagt vannkraftverk i Ullsfjord, Troms

Denne studien ble utført som en masteroppgave [7.32] og senere presentert på konferanse HYDRO2010 i Tromsø [7.15]. Oppgaven ble utført med modeller og programvare utviklet i de to PhD-prosjektene som er omtalt i **kapittel 7.2.4** og 7.2.5 og omfattet både nedskalering av klimadata, beregning av endringer i tilsig til kraftverket, og simulering av kraftproduksjon for å sammenligne hva som ville være optimalt design med dagens klima og i framtidige klimascenarier. Et spesielt forhold i dette prosjektet var at feltet har et betydelig breareal, og at breene gradvis vil smelte ned ettersom klimaet varmes opp, noe som førte til en økning av tilsiget mens breene smeltet ned, og deretter en reduksjon når breene var borte. Dette gir spesielle utfordringer i forhold til hydrologisk modellering og også i vurdering av framtidig produksjonspotensial. Det ble også forsøkt å vurdere hvordan framtidig kraftmarked kunne endre seg og hvilken betydning dette kunne få for å optimalisere kraftverket.

7.2.3 Klimaendringer og damsikkerhet

Denne studien ble utført i et PhD-prosjekt [7.01] der målsetningen var å se på mulige koblinger mellom klimaendringer og damsikkerhet. Dette ble utført ved å studere to store norske dammer, Viddalsdammen i Aurland og Sysendammen i Eidfjord. Beregningene ble utført ved å sammenligne Dimensjonerende flom og PMF for dagens klima og et framtidig scenario 2071-2100. Resultatene viste en klar økning for både Dimensjonerende flom og PMF for begge dammene. Dette førte også til økt risiko både for overtopping og skader ved intern erosjon i dammene, og en samlet økning i sannsynlighet for dambrudd på ca 30%. Det vises til mer detaljer i PhD-avhandlingen [7.01] og i artikler som denne bygger på [7.5], [7.6] og [7.11] - [7.13].

7.2.4 Klimaendringer og virkning på vannkraftsystemet i Øst-Afrika

Denne studien, også en PhD-oppgave [7.03], tar for seg regionen Øst-Afrika, med landene Kenya, Tanzania, Uganda, Burundi og Rwanda. I denne regionen er det kartlagt hvordan klimaendringene fram mot 2100 vil endre hydrologiske forhold og dermed grunnlaget for vannkraftproduksjonen. For de fleste landene er studien utført for dagens eksisterende vannkraftsystem, dette er modellert i detalj ned på nivå med hvert vannkraftverk representert. For ett land, Uganda, er det gått et skritt videre, idet det er utviklet en metodikk for å finne alle potensielle steder for vannkraft, og deretter kjørt beregninger for hele det utbyggbare vannkraftsystemet. Dette gir et riktigere bilde av mulige endringer i vannkraftpotensialet. I hovedsak vil vannkraftpotensialet ikke påvirkes negativt i denne regionen, tvert imot ventes det en viss økning på grunn av mer nedbør og høyere avløp enn i dag, selv om en også finner områder med reduksjon. Men for dagens system vil ikke økningen i vannmengde gi så stor uttelling i produksjon på grunn av kapasitetsproblem. For å utnytte økte vannressurser må kraftverkene utvides og få økt kapasitet. Dette vil også gjøre det mulig å bedre virkningsgrad og få en ytterligere økning i potensialet. I tillegg til selve PhD-avhandlingen [7.03] finnes resultater i flere publikasjoner: [7.7], [7.25], [7.27] og [7.29].

7.2.5 Klimaendringer og virkning på vannkraftsystemet Sentral-Afrika

Også i denne PhD-studien [7.02] er det gjort forsøk på å beregne hvordan klimaendringer vil påvirke vannkraftsystemet i en større region, her Congo, ett vassdrag i Angola (Kwanza river) og hele Zambezi-vassdraget. Dette inkluderer de viktigste vannkraftressursene i Zambia, Zimbabwe, Mosambik og Malawi. Resultatene i PhD-arbeidet er bearbeidet videre og publisert i [7.8], [7.9] og

[7.10]. Som hovedresultat kan vi konkludere med at vannkraftpotensialet i Congo og Angola vil bli lite påvirket, trolig med en liten økning på inntil 10% i Angola og noen få % i Congo. For Zambezi er bildet et helt annet. Dette vassdraget ligger så langt sør at det ligger i et belte med sterkt synkende nedbør etter hvert som klimaendringene griper om seg. Dette fører til reduserte vannressurser, både på grunn av synkende nedbør og økende fordampning. For hele Zambezi der dagens vannkraftsystem produserer ca 31 TWh ventes produksjonen å falle til rundt 26 TWh omkring 2050 og videre ned til 22 TWh omkring 2080, hvis klimaet utvikler seg slik som beregnet av IPCC. Det vil være mulig å kompensere for noe av denne reduksjonen ved å bygge ut mer lagringskapasitet og ved bygging av nye kraftverk men begge deler vil kreve nye investeringer.



Utløpet av Lake Victoria og starten på den Hvite Nilen. Foto: Ånund Killingtveit

Utløpet av Victoriasjøen ved Jjinja er starten på det som kalles «White Nile», den Hvite Nilen. Dette regnes av mange som starten på Nilen, selv om vi må ennå lengre mot sør for å finne Nilens fjerneste kilder, i Rwanda eller Burundi. Andre vil hevde at en bør se til Ethiopia som er kilden til «Blue Nile» som gir opphav til ca 80% av alt vann i Nilen.

De to hovedgrenene møtes ved Khartoum i Sudan. Victoriasjøens nedbørfelt ligger i en region der klimaendringene ventes å føre til mer nedbør og mer vann, noe som stort sett regnes som positivt. Uganda får det aller meste av sin elektrisitet fra vannkraftverkene som ligger nedover langs «White Nile», og flere store kraftverk er planlagt videre nedover mot grensen til Sør-Sudan. Og selv om vannmengdene i «White Nile» er bare fjerdeparten av «Blue Nile» er det stabile og jevne utløpet fra Victoriasjøen svært viktig fordi det er dette bidraget som bestemmer vannføringen gjennom Sudan og inn i Egypt i tørketiden.

Vannressursene i Nilen er helt avgjørende som livsgrunnlag for over 200 millioner mennesker i regionen, og derfor er kunnskap om klimaendring og virkninger på vann og vannkraftproduksjon omfattet med stor interesse. Mange MSc og PhD studenter ved NTNU har arbeidet med metodeutvikling for vannressursforvaltning og studier av klimaendringer i denne regionen, særlig i Uganda, Tanzania og Ethiopia. Noen av de viktigste av disse er tatt med som NTNUs «In-kind» bidrag til CEDREN og er oppgitt under referanser til slutt.

Publikasjoner fra kapittel 7

Monografier publisert (doktorgrader)

[7.01] Haregewoin Haile Chernet (2013)

The Impact of Climate Change on Dam Safety and Hydropower

PhD 2013:351

ISBN 978-82-471-4847-1, NTNU Trondheim

<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/242445>

[7.02] Hamududu, Byman (2012)

Impacts of Climate Change on Water Resources and Hydropower Systems

PhD 2012:280

ISBN 978-82-472-3873-1, NTNU Trondheim

<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/242354>

[7.03] Jjunju, Emmanuel (2016)

Integrating Climate Change in Hydropower Development in East Africa

PhD 2016:357, ISBN 978-82-326-2058-6, NTNU Trondheim

<https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2429223>

*Forfattere til Kapittel 5 «Hydropower» i IPCC-SRREN rapporten [7.1]. De to norske deltakerne var Tormod Schei fra Statkraft (midten i bakre rekke) og Ånund Killingtveit NTNU (nr 2 fra venstre i første rekke).
Foto: Ånund Killingtveit*



Artikler og rapporter med fagfellevurdering

- [7.1] Kumar, Arun; Schei, Tormod; Ahenkorah, Alfred; Rodriguez, Rodolfo Caceres; Devernay, Jean-Michel; Freitas, Marcos; Hall, Douglas; Killingtveit, Ånund; Liu, Zhiyu.
Hydropower. I: Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press 2012 ISBN 978-1-107-60710-1. s. 437-496
<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/Chapter%205%20Hydropower.pdf>
- [7.2] Arvizu, Dan; Bruckner, Thomas; Chum, Helena; Edenhofer, Ottmar; Estefen, Segen F.; Faaij, André; Fischedick, Manfred; Hansen, Gerrit; Hiriart, Gerardo; Hohmeyer, Olav; Hollands, Terry K.G.; Huckerby, John; Kadner, Susanne; Killingtveit, Ånund; Kumar, Arun; Lewis, Anthony; Lucon, Oswald; Matschoss, Patrick; Maurice, Lourdes; Mirza, Monirul; Mitchell, Cathrine; Moomaw, William; Moreira, José; Nilsson, Lars J.; Nyboer, John; Pichs-Madruga, Ramon; Sathaye, Jayant; Sawin, Janet L.; Schaeffer, Roberto; Schei, Tormod A.; Schlömer, Steffen; Seyboth, Kristin; Sims, Ralph; Sinden, Graham E.; Sokona, Youba; Stechow, Christoph von; Steckel, Jan; Verbruggen, Aviel; Wisner, Ryan; Yamba, Francis; Zwickel, Timm.
Technical Summary. I: Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press 2012 ISBN 978-1-107-60710-1. s. 27-158
<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/Technical%20Summary.pdf>
- [7.3] Bruckner, Thomas; Chum, Helena; Jager-Waldau, Arnulf; Killingtveit, Ånund; Gutierrez-Negrin, Luis; Nyboer, John; Musial, Walter; Verbruggen, Aviel; Wisner, Ryan.
Recent Renewable Energy Cost and Performance Parameters. I: Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press 2012 ISBN 978-1-107-60710-1. s. 1001-1022
<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/Annex%2011%20Recent%20Renewable%20Energy%20Cost%20and%20Performance%20Parameters.pdf>
- [7.4] Hamududu, Byman; Killingtveit, Ånund.
Assessing of Climate Change Impacts on Global Hydropower. *Energies* 2012 ;Volum 5.(2) s. 305-322
<http://www.mdpi.com/1996-1073/5/2/305>
- [7.5] Chernet, Hargewoin Haile; Alfredsén, Knut; Killingtveit, Ånund.
The impacts of climate change on a Norwegian high-head hydropower system. *Journal of Water and Climate Change* 2013 ;Volum 4.(1) s. 17-37
<http://jwcc.iwaponline.com/content/4/1/17>
- [7.6] Chernet, Hargewoin Haile; Alfredsén, Knut; Midttømme, Grethe Holm.
Safety of Hydropower Dams in a Changing Climate. *Journal of hydrologic engineering* 2014 ;Volum 19.(3) s. 569-582
[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000836](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000836)
- [7.7] Jjunju, Emmanuel; Killingtveit, Ånund.
Modelling climate change impacts on hydropower in East-Africa. *International journal on hydropower and dams* 2015 Suppl. Water storage and Hy s. 15-20
https://www.researchgate.net/publication/281581968_Modelling_climate_change_impacts_on_hydropower_in_East_Africa
- [7.8] Hamududu, Byman Hikanyona; Killingtveit, Ånund.
Impacts of climate change on water resources and hydro production at Inga Falls, Congo. *International journal on hydropower and dams* 2015 Suppl. Water storage and Hy s. 10-14
https://www.researchgate.net/publication/281581954_Impacts_of_climate_change_on_water_Resources_and_Hydro_Production_at_Inga_Falls_Congo
- [7.9] Hamududu, Byman Hikanyona; Killingtveit, Ånund.
Hydropower Production in Future Climate Scenarios: The Case for Kwanza River, Angola. *Energies* 2016 ;Volum 9.(5)
<http://www.mdpi.com/1996-1073/9/5/363>
- [7.10] Hamududu, Byman Hikanyona; Killingtveit, Ånund.
Hydropower Production in Future Climate Scenarios; the Case for the Zambezi River. *Energies* 2016 ;Volum 9.(7)
<http://www.mdpi.com/1996-1073/9/7/502>

Konferansebidrag

- [7.11] **Chernet, Hargewoin Haile; Alfredsen, Knut; Midttømme, Grethe Holm.**
Safety of hydropower dams in a changing climate. Renewable Energy Research Conference; 2012-04-16 - 2012-04-17
- [7.12] **Chernet, Hargewoin Haile; Alfredsen, Knut; Midttømme, Grethe Holm.**
Assessment of Changes in Design Flood Due to Climate Change for Sysen Dam in Norway. I: International Symposium on Dams for a Changing World ICOLD 2012.: International Commission on Large Dams 2012 s. 1-7-1-12
- [7.13] **Chernet, Hargewoin Haile; Alfredsen, Knut; Midttømme, Grethe Holm.**
Assessment of Changes in Design flood Due to Climate Change for Sysen Dam in Norway. ICOLD 2012; 2012-06-05 - 2012-06-08
- [7.15] **Jerkø, Jostein; Killingtveit, Ånund.**
Optimal layout of a hydropower system in Ullsfjord, Troms, considering climate change and possible changes in future power market. Hydropower'10, 6th International Conference, Tromsø, 2010.
- [7.16] **Alfredsen, Knut; Killingtveit, Ånund; Hamududu, Byman.**
Hydropower in Arctic Regions – future potential and challenges. Arctic Frontiers, Tromsø; 2012-01-23 - 2012-01-27
- [7.17] **Hamududu, Byman Hikanyona; Killingtveit, Ånund.**
Climate change impacts of the proposed Grand Inga III hydropower project – Congo river basin. HYDRO2015; 2015-10-26 - 2015-10-28
- [7.18] **Hamududu, Byman; Jjunju, Emmanuel; Killingtveit, Ånund.**
Downscaling of scenarios for the Pangani Basin using data from 5 IPCC-4AR GCMs data. Conference; 2009-11-24 - 2009-11-25
- [7.19] **Hamududu, Byman; Killingtveit, Ånund.**
Climate change impacts on Regional Runoff & Hydropower; the Case for East and Southern Africa. 10th WaterNet/Water research Fund for Southern Africa (WARSFA) /Global Water Partnership (GWP) Southern Africa; 2009-10-28 - 2009-10-30
- [7.20] **Hamududu, Byman; Jjunju, Emmanuel; Killingtveit, Ånund; Alfredsen, Knut.**
A Procedure for Assessing Climate Change Impacts on hydropower. Renewable Energy Research Conference; Trondheim, 2010-06-07 - 2010-06-08
- [7.21] **Hamududu, Byman; Killingtveit, Ånund.**
Assessing Impacts of Climate Change on Hydropower Production. ICH, Hydropower and the Environment Course; Trondheim, 2010-06-10 - 2010-06-10
- [7.22] **Hamududu, Byman; Killingtveit, Ånund.**
Estimating effects of climate change on global hydropower production. Hydropower'10 6th International Conference on Hydropower; Tromsø, 2010-02-01 - 2010-02-03
- [7.23] **Hamududu, Byman; Killingtveit, Ånund; Alfredsen, Knut.**
GCM performance in Southern Africa. Conference on modelling hydrology, climate and land surface processes; 2010-09-14 - 2010-09-16
- [7.24] **Hamududu, Byman; Killingtveit, Ånund; Jjunju, Emmanuel.**
Existing studies of hydropower and climate change: A review. Hydropower'10 6th International Conference on Hydropower; Tromsø, 2010-02-01 - 2010-02-03
- [7.25] **Jjunju, Emmanuel; Hamududu, Byman; Killingtveit, Ånund.**
Trend analysis of Precipitation and Runoff in Pangani Basin during 1961-1990. Conference; 2009-11-24 - 2009-11-25
- [7.26] **Killingtveit, Ånund; Hamududu, Byman Hikanyona.**
Security of supply for Oslo water supply system under present and future climate scenarios. 3rd Conference on MODELLING HYDROLOGY, CLIMATE AND LAND SURFACE PROCESSES; Lillehammer, 2015-09-07 - 2015-09-09
- [7.27] **Jjunju, Emmanuel; Killingtveit, Ånund.**
Modelling the impact of climate change on existing and planned hydropower installations in East Africa. HYDRO2015; Chernobbio, Italia, 2015-10-26 - 2015-10-28
- [7.28] **Jjunju, Emmanuel; Killingtveit, Ånund; Alfredsen, Knut.**
Comparison of evapotranspiration derived from GCM latent heat flux with that from land-use and meteorological records. Conference on modelling hydrology, climate and land surface processes; Lillehammer, 2010-09-14 - 2010-09-16
- [7.29] **Jjunju, Emmanuel; Killingtveit, Ånund; Gimbo, Florence.**
A GIS tool for identifying potential hydropower sites in sparsely studied areas. HYDRO2015; Chernobbio, Italia, 2015-10-26 - 2015-10-28
- [7.30] **Killingtveit, Ånund.**
Effects of climate change on hydropower - Climate change adaptation. Fifth International Conference on Water Resources and Hydropower Development in Asia; Colombo, Sri Lanka, 2014-03-11 - 2014-03-13
- [7.31] **Killingtveit, Ånund.**
Effects of Land use Changes on Runoff and Catchment Erosion in Pangani River. ICH/CEDREN Sustainable Hydropower Development Workshop; 2011-11-21 - 2011-11-25

Masteroppgaver (“Diplomoppgaver”)

[7.32] Jostein Jerkø (2009)

En analyse av følsomhet for klima- og markedsendringer for et vannkraftprosjekt i Ullsfjord, Troms

Veileder: Ånund Killingtveit

<http://hdl.handle.net/11250/242104>

[7.33] Florence Gimbo (2015)

Verification of a GIS-based system for identification of potential hydro power plant sites in Uganda

Veiledere: Ånund Killingtveit og Emmanuel Jjunju

<http://hdl.handle.net/11250/2350523>

[7.34] Carles Palou Angeles (2015)

Impacts of future climate on hydropower resources

Veileder: Knut Alfreksen

<http://hdl.handle.net/11250/2350488>

[7.35] Abebe Girmay Adera (2015)

Hydrological Analysis of Tekeze Hydropower System in the Current and Future Climate

Veileder: Knut Alfreksen

<http://hdl.handle.net/11250/2350538>

[7.36] Sajana Marahatta (2015)

Impact of Climate Change on Hydropower Potential in the Koshi Basin, Nepal

Veileder: Knut Alfreksen

<http://hdl.handle.net/11250/2350544>

[7.37] Andreea-Cristina Otel (2016)

Climate change impacts Norwegian hydropower systems

Veileder: Knut Alfreksen

[7.38] Bewuketu Abebe Tesfaw (2016)

Optimize operation and future development on multi-purpose Tana-Beles hydropower project

Veileder: Ånund Killingtveit

<http://hdl.handle.net/11250/2406308>

NINAs publikasjoner

NINA Rapport

Dette er en elektronisk serie fra 2005 som erstatter de tidligere seriene NINA Fagrapport, NINA Oppdragsmelding og NINA Project Report. Normalt er dette NINAs rapportering til oppdragsgiver etter gjennomført forsknings-, overvåkings- eller utredningsarbeid. I tillegg vil serien favne mye av instituttets øvrige rapportering, for eksempel fra seminarer og konferanser, resultater av eget forsknings- og utredningsarbeid og litteraturstudier. NINA Rapport kan også utgis på annet språk når det er hensiktsmessig.

NINA Kortrapport

Dette er en enklere og ofte kortere rapportform til oppdragsgiver, gjerne for prosjekt med mindre arbeidsomfang enn det som ligger til grunn for NINA Rapport. Det er ikke krav om sammendrag på engelsk. Rapportserien kan også benyttes til framdriftsrapporter eller foreløpige meldinger til oppdragsgiver.

NINA Temahefte

Som navnet angir behandler temaheftene spesielle emner. Heftene utarbeides etter behov og serien favner svært vidt; fra systematiske bestemmelsesnøkler til informasjon om viktige problemstillinger i samfunnet. NINA Temahefte gis vanligvis en populærvitenskapelig form med mer vekt på illustrasjoner enn NINA Rapport.

NINA Fakta

Faktaarkene har som mål å gjøre NINAs forskningsresultater raskt og enkelt tilgjengelig for et større publikum. De sendes til presse, ideelle organisasjoner, naturforvaltningen på ulike nivå, politikere og andre spesielt interesserte. Faktaarkene gir en kort framstilling av noen av våre viktigste forskningstema.

Annen publisering

I tillegg til rapporteringen i NINAs egne serier publiserer instituttets ansatte en stor del av sine vitenskapelige resultater i internasjonale journaler, populærfaglige bøker og tidsskrifter.

ISSN 0804-421X
ISBN 978-82-426-3070-4

Norsk institutt for naturforskning

NINA Hovedkontor

Postadresse: Postboks 5685 Sluppen, NO-7485 Trondheim

Telefon: 73 80 14 00, Telefaks: 73 80 14 01

E-post: firmapost@nina.no

Organisasjonsnummer 9500 37 687

<http://www.nina.no>



Samarbeid og kunnskap for framtidens miljøløsninger