

NYTT RAMMEVERK FOR FLOMESTIMERING I NORGE

Sluttrapport fra forskningsprosjektet FlomQ



Nytt rammeverk for flomestimering i Norge: Sluttrapport fra forskningsprosjektet FlomQ

- Redaktør:** Thordis L. Thorarinsdottir
- Forfattere:** Thordis L. Thorarinsdottir, Kolbjørn Engeland, Deborah Lawrence, Øyvind Pedersen, Ole Einar Tveito, Kristoffer H. Hellton, Anita V. Dyrddal, Vidar Eide, Eirik J. Førland, Erik Holmqvist, Florian Kobierska, Sigrid Jørgensen, Grethe Holm Midttømme, Richard Moore, Kristian Strand Nordtun, Nils Kristian Orthe, Frode Randen, Trond Reitan, Nils Rüther, Lena Schlichting, Thomas Skaugen, Gunnhildur H. Steinbakk, Astrid Voksø, Thomas Væringstad, Thea Wang, Donna Wilson, Karianne Ødemark.
- Dato:** 20. juni 2018
- Utgitt av:** Energi Norge, ISBN nr. 978-82-436-1048-4
- Referanse:** T.L. Thorarinsdottir m.fl. (2018): Nytt rammeverk for flomestimering i Norge: Sluttrapport fra forskningsprosjektet FlomQ. Energi Norge rapport nr. 429-2018.
- Emneord:** Flomberegninger, dimensjonerende flom, dammer, flomdata, påregnelig maksimal nedbør, vannføringskurve, nedbør-avløps-modell, flomfrekvensanalyse
- Tilgjengelighet:** Åpen
- Prosjekt:** Robust rammeverk til estimat av flomhendelser i Norge (FlomQ)



Sammendrag

Vannkraft utgjør over 95% av den totale elektrisitetsproduksjonen i Norge med produksjon på 143.417 GWh i 2016¹. Registrerte dammer er klassifisert i fem konsekvensklasser etter hvilke bruddkonsekvenser de har (Norum m.fl., 2014). For de 2300 registrerte dammene med betydelige konsekvenser (konsekvensklasse 1-4) gjelder forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften), gjort gjeldende fra 01.01.2010, med tilhørende retningslinjer for flomberegninger utviklet av NVE (Midttømme m.fl., 2011). Dammer i konsekvensklasse 2-4 (1281 dammer) skal dimensjoneres etter den estimerte 1000-årsflommen med tilhørende vannstand, mens dammer i konsekvensklasse 1 (1019 dammer) skal dimensjoneres etter den estimerte 500-årsflommen. Det er krav om å gjøre nye flomberegninger minimum hvert 15. år (konsekvensklasse 2-4) og hvert 20. år (konsekvensklasse 1), og ellers dersom det er gjort endringer på damanlegget eller er avdekket store feil eller usikkerheter i datagrunnlaget.

Metoder for flomberegninger kan deles inn i to hovedgrupper, flomfrekvensanalyser og nedbør-avløps-analyser. Flomfrekvensanalyse er basert på statistiske metoder hvor det er antatt at analyser av tidligere observerte flomhendelser kan gi estimater av fremtidige ekstreme hendelser ved ekstrapolering. Siden vi kun har observasjoner for begrensede perioder er det lite sannsynlig at vi faktisk har målt en svært ekstrem hendelse slik som en 1000-årsflom. Spørsmålet blir da hvordan man kan bruke de tilgjengelige observasjonene for å få et best mulig estimat på de sjeldne og store flommene.

I nedbør-avløps-modellering gjennomføres analysen basert på en kombinasjon av informasjon om nedbør og avløp, enten ved hjelp av statistisk analyse eller kombinert med hydrologiske modeller som omformer nedbør til vannføring. Det finnes to hovedgrupper av metoder basert på enten hendelsesbaserte simuleringer (dvs. at en dimensjonerende nedbørshendelse kjøres gjennom en hydrologisk modell for å generere en dimensjonerende flomhendelse) eller kontinuerlige simuleringer (dvs. en lang tidsserie med nedbør kjøres gjennom en hydrologisk modell for å gi en lang tidsserie med vannføring; deretter kan flomstatistikk beregnes). For små nedbørfelt brukes også empiriske metoder. De norske retningslinjene for flom-beregninger anbefaler at det utføres både flomfrekvensanalyse og nedbør-avløps-modellering (Midttømme m.fl., 2011).

Energi Norge startet i 2012 en arbeidsgruppe om flomberegninger for å indentifisere potensiale for forbedring av dagens flomberegningsmetoder samt å utforme en plan for utvikling av nye metoder og implementering av disse i praksis (Hisdal m.fl., 2013). Dette arbeidet førte videre til et større forskningsprosjekt, «Robust rammeverk til estimat av flomhendelser i Norge» (FlomQ), som nå i stor grad er avsluttet. Innen FlomQ-prosjektet er det blitt forsket på nye og forbedrede metoder for å få frem gode og pålitelige flomestimer basert på fire overordnede kriterier:

- 1) Estimerer på store flommer som opptrer i gjennomsnitt hver 500 eller 1000 år er nødvendigvis tilknyttet stor usikkerhet. Det er viktig å beregne denne usikkerheten når det er mulig. Estimeringsmetoder skal gi *pålitelige* estimater av usikkerheten, i den forstand at den vurderte sannsynligheten for en hendelse skal svare til frekvensen som blir observert i virkeligheten.

¹ <https://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/elektrisitet/aar> (15.03.2018)

- 2) Estimeringsmetoder skal ha *stabilitet*, i den forstand at to forskjellige dataserier med observerte flomhendelser (eller andre relevante data) som representerer den samme underliggende prosessen skal føre til ganske like estimater.
- 3) Forskjellige tilnærminger, for eksempel flomestimeringsmetoder som anvender en nedbør-avløps-modell og statistisk flomfrekvensanalyse, skal gi lignende svar.
- 4) Flomestimeringsmetodikken skal være så objektiv som mulig. Estimatenes skal ikke være avhengige av hvem som gjør analysen.

Uansett hva slags metode som benyttes vil usikkerheten være stor når man skal estimere størrelsen på meget sjeldne flomhendelser. Retningslinjer for flomberegninger kan aldri fjerne usikkerhetene i en flomberegning, men skal sikre at beregningene er robuste og sammenliknbare, og at usikkerheten evalueres og blir tatt hensyn til ved kontroll og dimensjonering av dammer. Hensikten med denne rapporten er å gi en oversikt over arbeidet utført i FlomQ prosjektet og oppsummere resultatene med fokus på om forskningsresultatene kan tas i bruk og bidra til mer robuste standarder for beregning av dimensjonerende flom i Norge. Utvalgte parallelle prosjekter som har kjørt over de siste årene og har støttet opp under FlomQ prosjektet blir også diskutert, spesielt et parallelt PhD prosjekt ved Høgskolen i Telemark om nedbør-avløpsmodellering samt interne prosjekter på NVE om kvalitetskontroll av flomdata og utvikling av NEVINA verktøyet. Oversikt over anbefalinger til oppdatering av de gjeldende retningslinjene basert på resultater fra prosjektet er gitt i kapittel 2.

Usikkerheten i flomberegninger øker jo færre observasjoner man har og jo dårligere kvaliteten på dataene er. FlomQ prosjektet har derfor hatt stort fokus på forbedring av datagrunnlaget på forskjellig vis. Kapittel 3 beskriver ny kvalitetskontroll på flomdata som har resultert i nye flomtabeller i Hydra II. Disse flomtabellene oppdateres jevnlig og det anbefales å bruke ferske flomdata fra Hydra II for hver analyse. Nye målinger, spesielt etter store flommer, kan endre vannføringskurver, føre til oppdatering av tidligere vannføringsestimater og redusere bias i estimatene på den dimensjonerende flommen (se også kapittel 7.2). I tillegg til systematiske flomobservasjoner kan det ha stor nytte å bruke informasjon om historiske flommer fra før daglige observasjoner startet, se kapittel 7.3.

I kapittel 4 oppsummeres resultater fra et PhD prosjekt om 3D modellering av vannføringskurver. De utførte case-studiene viser at skala-modellering og CFD-modellering kan føre til betydelig mer presisjon i modelleringen av vannføringskurver med kompliserte strømningsforhold og geometri enn de enklere 1D og 2D modeller som brukes i dag. Skalamodeller og 3D CFD modeller er pr. dato vesentlig dyrere enn enklere 1D og 2D modeller, men sett fra et damsikkerhetsperspektiv kan det være verdt å bruke mer avanserte og dyrere modeller for å få god kvalitet på flomsegmentet av vannføringskurvene. Underestimering av dimensjonerende flom kan føre til alvorlige konsekvenser ved eventuell skade eller brudd på dammer, mens overestimering kan bety unødvendige kostnader for dameier i form av dyre sikringstiltak. Ved målestasjoner som både har komplisert strømningsbilde, og som er viktige for flomberegning for dammer, bør det derfor vurderes om det er aktuelt å bruke 3D modellering. I forhold til skalamodeller er CFD en kostnadseffektiv måte å modellere komplisert strømning, og den gir mer kunnskap om strømningsbildet ved forskjellige vannføringer, men pr. i dag bruker man ofte også fysiske modeller for å kalibrere en 3D CFD-modell for høye flomvannføringer. Utviklingen av tilgjengelig datakraft og prosessering vil på sikt bidra til enda bedre CFD-modeller, og det er sannsynlig at 3D CFD modeller vil bli mer aktuelle i bruk fremover.

Påregnelig maksimum nedbør (PMP), den teoretisk maksimale nedbøren for en gitt varighet, er en kritisk verdi for damsikkerhet og flomberegning. Mens tradisjonelle estimeringsmetoder for PMP er basert på statistikker fra nedbørsobservasjoner og empiriske vekstfaktorer, anbefaler World Meteorological Organization (WMO) nå bruk av fysisk baserte atmosfæriske modeller. En slik fremgangsmåte er tema for et pågående PhD prosjekt beskrevet i kapittel 5.1. I tillegg har vi i prosjektet vurdert en probabilistisk modell for nedbør med fokus på ekstremverdier og brukt den i forbindelse med stokastiske nedbør-avløpsmetoder. Denne probabilistiske modellen er beskrevet i kapittel 5.2.

Nye utviklinger i nedbør-avløps-modellering er beskrevet i kapittel 6. Vi har utviklet en ny stokastisk simuleringsmetode for Norge basert på den franske SCHADEX metoden. Dette er en såkalt «semi-kontinuerlig» metode der nedbørhendelser beregnes fra en probabilistisk nedbør-modell og erstatter nedbør-hendelsene i en observert tidsserie. Metoden er blitt testet både i nedbørfelt der det finnes vannføringsmålinger for kalibrering av den hydrologiske modellen og med bruk av en regionalisert versjon av samme modellen for umålte nedbørfelt. Et parallelt PhD prosjekt har utviklet opp-graderinger av dagens PQRUT modell. Basert på sammenligninger med dagens metoder kan de anbefales å vurdere å ta en eller flere av disse nye metodene i bruk. En opp-datering av PQRUT vurderes forholdsvis rett frem i praksis; innføring av den nye SCHADEX metoden kan føre til bedre estimater men krever både opplæring av metoden og tilgang på programvare, samt en betydelig lengere beregningstid per nedbørfelt.

FlomQ utviklinger innen statistisk flomfrekvensanalyse er oppsummert i kapittel 7. Vi har fortatt en grundig sammenlikning av forskjellige modeller og estimeringsmetoder for lokal flomfrekvensanalyse på de norske dataene. GEV- og Gumbel-fordelingen viser seg å passe best til dataene, men det er ingen klar terskel for når man skal gå over fra 2-parameter modell (Gumbel) til 3-parameter modell (GEV). Videre oppnås de beste estimatene totalt sett basert på 1-momenter men Bayesianske metoder vurderes også bra nok. En ny regionalmodell for flomestimering basert på Bayesianske metoder hvor estimerte flomstørrelser avhenger av 12 geografiske, meteorologiske og hydrologiske egenskaper viser en betydelig bedre prediksjonsevne enn dagens regionalmodell. De nye metodene for flomfrekvensanalyse og nedbør-avløps-modellering viser også en bedre overenstemmelse enn dagens metoder (se kapittel 8). Det kan derfor anbefales å oppdatere dagens praksis i henhold til disse resultatene.

De beregningene som kreves av de nye metodene utviklet i FlomQ er delvis mye mer komplisert enn for dagens metoder hvor spesiell programvare må brukes. For å sikre at resultater fra forskningsprosjekter blir til nytte for sluttbrukere, er implementering i effektive, robuste og brukervennlige verktøy en løsning. Slike verktøy er også en viktig kanal for formidling av forskningsresultater. Resultater vil implementeres i verktøy i Hydra II, da spesielt lokal flomfrekvensanalyse og NEVINA for regional flomfrekvensanalyse. En kort beskrivelse av NEVINA er gitt i kapittel 9. Det bør vurderes om retningslinjer skal gi konkrete anbefalinger om bruk av denne type verktøyer hvor det er aktuelt.

Forfatterne av denne rapporten

Thordis L. Thorarinsdottir er sjefsforsker og områdeansvarlig for klima og miljø i avdelingen for Statistisk analyse, maskinlæring og bildeanalyse (SAMBA) på Norsk Regnesentral (NR). Hun har ledet forskingsarbeidet i FlomQ og bidratt til utvikling av nye metoder for statistisk flomfrekvensanalyse.

Kolbjørn Engeland er seniorforsker ved Hydrologisk avdeling, seksjon for Hydrologisk modellering (HM) på Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) og førsteamanuensis ved Seksjon for naturgeografi og hydrologi på Universitet i Oslo (UiO). Han har ledet FlomQ-arbeidet i arbeidspakke 4 om statistisk flomfrekvensanalyse og bidratt til utvikling av nye flomtabeller, nye metoder for statistisk flomfrekvensanalyse, videreutvikling av NEVINA og modellering av vannføringskurve ved Sandvinvatnet.

Deborah Lawrence er seniorforsker i HM-seksjonen på NVE. Hun har ledet FlomQ-arbeidet i arbeidspakke 3 om nedbør-avløps-modellering og har utviklet nye nedbør-avløps-modeller samt metoder for estimering av ekstremnedbør.

Øyvind Pedersen har vært PhD stipendiat på Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Han har fullført PhD prosjektet i arbeidspakke 2 i FlomQ om 3D-modellering av vannføringskurver.

Ole Einar Tveito er seniorforsker ved Avdeling for klimatjenester på Meteorologisk institutt (MET). Han har ledet FlomQ-arbeidet i arbeidspakke 1 om simulering av ekstrem nedbør.

Kristoffer H. Hellton er seniorforsker i SAMBA-avdelingen på NR. Han har bidratt til utviklingen av den nye metoden for regional flomfrekvensanalyse.

Anita V. Dyrrdal er forsker ved Avdeling for modell- og klimaanalyse på MET. Hun har bidratt til utvikling av nye simuleringsmetoder for ekstrem nedbør.

Vidar Eide er senioringeniør ved Hydrologisk avdeling, seksjon for Hydroinformatikk på NVE. Han har bidratt til utvikling av nye flomtabeller.

Eirik J. Førland er fagdirektør emeritus ved MET. Han har bidratt til utvikling av nye simuleringsmetoder for ekstrem nedbør.

Erik Holmqvist er senioringeniør ved Hydrologisk avdeling, seksjon for Vannbalanse på NVE. Han har bidratt til utvikling av nye flomtabeller samt nye metoder for statistisk flomfrekvensanalyse.

Florian Kobierska er førsteamanuensis ved Institutt for miljø- og naturvitenskap, Høgskulen på Vestlandet og tidligere forsker ved HM-seksjonen på NVE. Han har bidratt til utvikling av nye metoder for statistisk flomfrekvensanalyse.

Sigrid Jørgensen er ingeniør ved HM-seksjonen på NVE. Hun har bidratt til utvikling av nye flomtabeller.

Grethe Holm Midttømme er sjefingeniør ved Tilsyns- og beredskapsavdelingen, seksjon for Damsikkerhet på NVE. Hun har bidratt til utforming av FlomQ prosjektet og denne rapporten.

Richard Moore er førsteamanuensis i meteorologi og oseanografi ved UiO. Han veileder PhD prosjektet i arbeidspakke 1 om numerisk modellering av ekstrem nedbør.

Kristian Strand Nordtun er overingeniør ved Hydrologisk avdeling, seksjon for Hydrometri-Datakvalitet på NVE. Han har bidratt til utvikling av nye flomtabeller.

Nils Kristian Orthe er senioringeniør ved Hydrologisk avdeling, seksjon for Hydroinformatikk på NVE. Hann har bidratt til videreutvikling av NEVINA.

Frode Randen er overingeniør ved Hydrologisk avdeling, seksjon for Hydrometri - Teknikk og feltdrift på NVE. Han har bidratt til utvikling av nye flomtabeller og modellering av vannføringskurve ved Sandvinvatnet.

Trond Reitan er overingeniør på Hydrologisk avdeling, seksjon for Hydroinformatikk på NVE og forsker ved Senter for økologisk og evolusjonær syntese på UiO. Han har bidratt til utvikling av nye flomtabeller.

Nils Rütther er førsteamanuensis ved Institutt for bygg- og miljøteknikk, Fakultet for ingeniørvitenskap, NTNU. Han har ledet FlomQ-arbeidet i arbeidspakke 2 om modellering av vannføringskurver og har veiledet PhD prosjektet i denne arbeidspakken.

Lena Schlichting er tidligere avdelingsingeniør ved HM-seksjonen på NVE. Hun har bidratt til utvikling av nye flomtabeller og nye metoder for statistisk flomfrekvensanalyse.

Thomas Skaugen er seniorforsker ved Hydrologisk avdeling, seksjon for Bre, is og snø på NVE. Han har bidratt til utvikling av nye nedbør-avløps-modeller.

Gunnhildur H. Steinbakk er seniorforsker i SAMBA-avdelingen på NR. Hun har bidratt til FlomQ-arbeidet med statistisk flomfrekvensanalyse.

Astrid Voksø er senioringeniør på Hydrologisk avdeling, seksjon for Geoinformasjon på NVE. Hun har bidratt til utvikling av nye flomtabeller og videreutvikling av NEVINA.

Thomas Væringstad er senioringeniør på Hydrologisk avdeling, seksjon for Vannbalanse på NVE. Hann har bidratt til videreutvikling av NEVINA.

Thea Wang er hydrolog hos Multiconsult og tidligere avdelingsingeniør på NVE. Hun har bidratt til utvikling av nye flomtabeller.

Donna Wilson er tidligere forsker ved HM-seksjonen på NVE. Hun har bidratt til utvikling av nye metoder for statistisk flomfrekvensanalyse.

Karianne Ødemark er PhD stipendiat på MET og UiO. Hun holder på med PhD prosjektet knyttet til arbeidspakke 1 i FlomQ om simulering av ekstrem nedbør.

Innhold

1	Kort om FlomQ prosjektet	9
2	Anbefalte endringer i retningslinjer for flomberegninger	11
3	Flomdata	13
3.1	Kvalitet på vannføringsdata	13
3.2	Kvalitetskontroll av flomdata.....	14
3.3	Uttak av flomdata.....	14
3.4	Endelig flomdatasett	15
3.5	Flomtilsig fra magasindata	16
4	Modellering av vannføringskurver	19
4.1	Innledning.....	19
4.2	Oppsummering av resultater fra PhD	21
4.3	Diskusjon.....	25
4.4	Eksempel fra Odda.....	26
5	Ekstrem nedbør	31
5.1	Beregning av PMP med numeriske atmosfæremodeller	31
5.2	Testing av MEWP fordeling for ekstremnedbør i Norge	34
6	Nedbør-avløps-modeller	37
6.1	SCHADEX metoden for målte felt	38
6.2	SCHADEX metoden for umålte felt	39
6.3	Oppgradering av PQRUT	40
6.4	Anbefalinger.....	41
7	Frekvensanalyse.....	43
7.1	Lokal flomfrekvensanalyse.....	43
7.2	Usikkerhet fra forskjellige kilder	46
7.3	Plotteposisjon og valg av fordeling	48
7.4	Bruk av historisk informasjon.....	49
7.5	Regional flomfrekvensanalyse	52
8	Sammenlikning av nedbør-avløps-modeller og frekvensanalyse	59
9	NEVINA.....	61
9.1	Kort brukerveiledning.....	61
9.2	Data og algoritmer	64
9.3	Planlagte utvidelser av NEVINA.....	65
	Referanser.....	66
	Appendiks A: Publikasjoner og formidling fra prosjektet.....	69
	Vitenskapelige publikasjoner	69
	Foredrag og posters.....	70

1 Kort om FlomQ prosjektet

Hovedmålet med prosjektet «Robust rammeverk til estimat av flomhendelser i Norge» (FlomQ) er å oppnå bedre estimater for flomstørrelse med realistiske usikkerhetsanslag for å revidere dagens retningslinjer for flomestimering. Dette vil gi bedre grunnlag for vurdering av modifikasjoner på eksisterende dammer, dimensjonering av framtidige vannkraftverk samt flomavledning for vei, jernbane og avløp. Prosjektet er blitt delt opp i fire arbeidspakker:

- 1) Simulering av ekstrem nedbør, basert på numeriske atmosfæremodeller for å estimere påregnelig maksimal nedbør (PMP).

Gevinst: Bedre inngangsdata for nedbør-avløps-modeller.

FoU-deltakere: Meteorologisk institutt og UiO (PhD-student).

- 2) 3D-modellering av vannstand-vannføringskurver for ekstremflom.

Gevinst: Redusert usikkerhet i vannføringsdata.

FoU-deltakere: NTNU (PhD-student).

- 3) Stokastiske simuleringmodeller for nedbør-avløps-modellering.

Gevinst: Mer fleksibel modell, reduserte subjektive vurderinger, inkluderer usikkerhetsanslag.

FoU-deltakere: NVE.

- 4) Nye flomtabeler og Bayesianske tilnæringer til flomfrekvensanalyse.

Gevinst: Bedre bruk av historiske data og regionale data, inkluderer usikkerhetsanslag.

FoU-deltakere: NVE og Norsk Regnesentral.

Energi Norge som er den norske energinæringens bransjeorganisasjon og en landsforening i NHO, har administrert prosjektet. Partnere i prosjektet er:

- | | |
|--|-----------------------------------|
| - Agder Energi | - Norsk Vann |
| - BKK | - NTNU |
| - DSB | - Numedalslågen Brukseierforening |
| - E-CO Energi | - NVE |
| - Energi Norge | - Otteraaens Brugseierforening |
| - Glommens og Laagens
Brukseierforening (GLB) | - SKS Produksjon |
| - Hydro Energi | - Statens Vegvesen |
| - Meteorologisk institutt | - Statkraft |
| - Norges Forskningsråd | - TrønderEnergi |
| - Norsk Regnesentral | - UiO |
| | - Østfold Energi |

Prosjektet startet i 2013 og størstedelen av prosjektet er nå avsluttet. Samlet budsjett har vært på 16,1 millioner kr. hvorav 40% har vært finansiert av Norges Forskningsråd gjennom EnergiX-programmet. Resterende midler har kommet fra finansiering og egeninnsats fra de deltagende bedrifter og organisasjoner.

2 Anbefalte endringer i retningslinjer for flomberegninger

Resultatene fra FlomQ fører til følgende anbefalinger til endringer i retningslinjer for flomberegninger (Midttømme m.fl., 2011).

- 1) Det bør konkretiseres at datagrunnlaget skal være basert på **ferske** flomdata fra Hydra II (kapittel 4.3 i Midttømme m.fl. (2011)) og meteorologiske data fra Meteorologisk institutt (kapittel 4.4 i Midttømme m.fl. (2011)).
- 2) Anbefalinger om gjennomføring av lokal flomfrekvensanalyse (kapittel 5.4.1 i Midttømme m.fl. (2011)) bør konkretiseres, jf. oppsummering i kapittel 7.1 (i denne rapporten).
- 3) Modell for regional flomfrekvensanalyse bør oppdateres (kapittel 5.4.1 i Midttømme m.fl. (2011)), se oppsummering i kapittel 7.5 (i denne rapporten).
- 4) En oppdatert nedbør-avløps-modell (kapittel 5.4.2 i Midttømme m.fl. (2011)) bør inkluderes, se kapittel 6.4 (i denne rapporten).
- 5) Bruk av spesielle verktøy bør anbefales når det er aktuelt. Eksempler på slike verktøy er lokal flomfrekvensanalyse i HydraII og regional flomfrekvensanalyse i NEVINA.

3 Flomdata

Kolbjørn Engeland (NVE), Erik Holmqvist (NVE), Sigrid Jørgensen (NVE), Frode Randen (NVE), Kristian Strand Nordtun (NVE), Trond Reitan (NVE), Astrid Voksø (NVE), Thea Wang (NVE), Vidar Eide (NVE), Lena Schlichting (NVE)

Robuste og pålitelige beregninger av dimensjonerende flom må baseres på best mulig data-grunnlag. I dette kapitlet oppsummeres hvilke metoder som ble brukt for kvalitetskontroll av data, hvordan flomdataene ble tatt ut, og hvordan flomdataene lagres i egne flomtabelle for videre analyser. Flomdata er tatt ut fra to kilder. Den ene er fra dataserier for vannføring (se Engeland et al., 2016 for detaljer). Den andre er fra dataserier for magasin vannstand (se Jørgensen Bakke og Holmqvist, 2018 for detaljer).

3.1 Kvalitet på vannføringsdata

Vannføring måles kontinuerlig ved å observere vannstand og konvertere vannstand til vannføring ved hjelp av en vannføringskurve. Vannføringskurven estimeres på grunnlag av direkte målinger av vannføring og vannstander (f.eks. Reitan og Petersen-Øverleir, 2009 og kapittel 7.2). Flere forhold ved denne måleprosessen påvirker egenskaper og kvalitet for flomdata (Reitan og Petersen-Øverleir, 2009; Steinsbakk m.fl., 2016). Selv om man bruker ferske data fra HYDRA II, er store flomvannføringer usikre hvis den underliggende vannføringskurven ekstrapolert langt utover nivået for høyeste vannføringsmåling i felt. Kapittel 7.2 viser hvordan usikkerhet i vannføringskurver påvirker usikkerhet i flomestimat. Denne usikkerheten kan reduseres enten ved feltmålinger av flomtopper eller hydraulisk modellering av målestasjoner (jf kapittel 4). Noen utfordringer ved feltmåling av flomvannføringer er komme ut i felt akkurat når flomtoppen inntreffer og å finne gode målesteder ved flom. Ved vanskelige flomstasjoner kan hydraulisk modellering være et godt alternativ.

For flomdata samlet inn i Norge kan følgende merkes

- Metode for å måle vannstand har endret seg gjennom tidene fra momentanverdier kl 12:00, til døgngjennomsnitt basert på limnigrafer, til ekte døgnmidler basert på registrere vannstanden 24-96 ganger i døgnet. Tidsserier for døgnmiddelflom endre egenskaper avhengig av måleutstyr.
- Endringer i profil på grunn av is er en stor utfordring ved mange stasjoner (også profilendringer pga. erosjon/sedimentering kan være problematisk mange steder). Spesielt kan første flom på våren bli overestimert på grunn av is eller snøpropper i selve elve-løpet. I Fleig (2013) ble kvalitet på flomverdier undersøkt, og konkluderte med at i deres datasett var ingen flommer forårsaket av isoppstuing.
- Målegrunnlaget for vannføringskurver endres når nye målinger blir tilgjengelige, spesielt etter store flommer. Det fører til forbedringer av vannføringskurver, spesielt for flomverdier. Man bør derfor bruke ferske flomdata fra Hydra II.

3.2 Kvalitetskontroll av flomdata

Innledende utvalg av stasjoner

Det innledende utvalget av flomdata ble hentet fra vannføringsstasjoner med følgende egenskaper:

- Nedlagte stasjoner med minst 10 år med data i uregulert periode.
- Stasjoner i drift i uregulerte felt og som ble opprettet senest i 2012.
- Stasjoner i drift i regulerte felt der vi har minst 10 år med uregulert periode.

Uregulerte felt ble definert som felt med mindre enn 5% reguleringsgrad. Reguleringsgraden ble beregnet som forholdstallet mellom magasinivolum og årlig middelavrenning i nedbørsfeltet. Totalt ble det valgt ut 795 stasjoner for videre kvalitetskontroll, hvorav 379 er uregulerte stasjoner i drift, 337 er nedlagte stasjoner og 79 er regulerte stasjoner med uregulert periode.

Kvalitetskontroll av vannføringsmålinger

Kvalitetskontrollen av stasjoner i drift ble utført av hydrologene som er ansvarlige for stasjonsdriften. Det innebar vurdering av problemer med isoppstuing, overkritisk strømning, dårlige måleforhold på flom. Slike stasjoner ble utelatt fra videre analyser. Stasjoner som trengte revisjon av vannføringskurver ble markert.

Basert på denne kvalitetskontrollen ble 71 stasjoner av de 379 utvalgte stasjonene ansett som uegnet for flomberegninger og 307 stasjoner ble beholdt. 116 av disse stasjonene hadde behov fra kurverevisjon. VFKURVE3 i Hydra II ble brukt for ny-generering av kurver. Av disse fikk 93 generert nye kurver og 75 stasjoner med ny-generert kurve ble godkjent for flomkart og 18 ble utelatt. Øvrige kurver ble kvalitetssikret ved hjelp av programmet Check Rating Curve (CRC). Da ble ytterligere 28 stasjoner utelatt og nye vannføringskurve ble beregnet for ytterligere 35 stasjoner. Totalt ble ca 200 vannføringskurver oppdatert. Etter kvalitetskontrollen ble 262 av totalt 379 uregulerte stasjoner i drift ansett å ha god nok kvalitet.

For nedlagte stasjoner ble kurveperioder der det ikke ble funnet data som kan brukes som kurvegrunnlag, ble utelatt. For de resterende kurveperiodene, ble CRC brukt for å vurdere kvaliteten på vannføringskurvene. Basert på denne gjennomgangen ble 130 nedlagte stasjoner eller aktive stasjoner med uregulert periode ekskludert fra datasettet. Merk at 4 av dem ble utelatt pga. manglende digitalisering av feltgrenser, 11 stasjoner ble utelatt pga. overlappende feltareal med andre stasjoner, og data fra flere av disse brukes for å lage sammensatte serier, 29 stasjoner ble utelatt pga. ukjent kurvegrunnlag, og åtte stasjoner i urbane områder ble utelatt siden vi kun skal se på flommer i naturlige felt.

3.3 Uttak av flomdata

Flomdata kan tas ut på to forskjellige måter, årlige maksimalverdier (AMS) og som uavhengige flommer over en terskel (POT). For AMS skjer utvalget ved at vi tar ut den årlige maksimalflommen. I en del dataserier kan det være enkelte år som mangler en eller flere dager med data, og da kan man ikke være sikker på at den årlige maksimalflommen kom på en av dagene som mangler. Vi valgte å sette som grense at det årlig kunne være maksimalt ett døgn med manglende data for å anse en dataserie som komplett nok til å ta ut AMS flom.

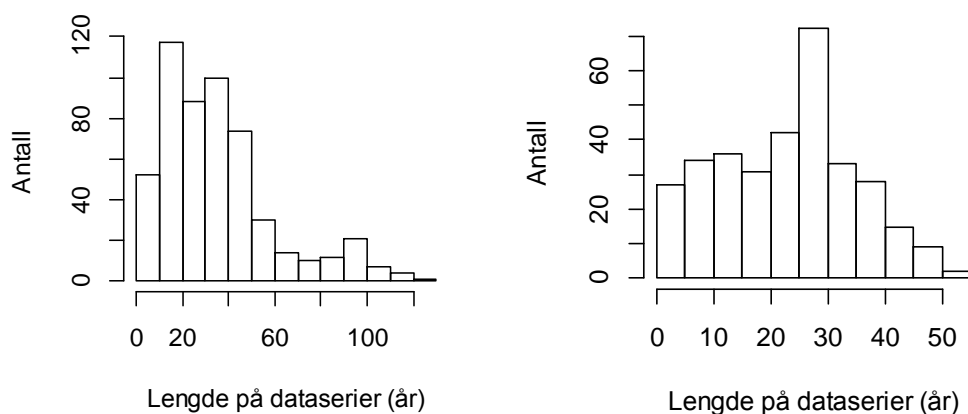
POT flommer baserer seg på at vi må ta ut uavhengige flommer over en terskel. Porsedyren for å velge terskel og sikre uavhengighet mellom flomtopper er beskrevet i Engeland m.fl., (2016)

Vi tok ut verdier for både døgnmiddelflom og for momentanflom. Tidsserier for momentanflommer er kortere siden registrerende utstyr som regel er brukt over kortere perioder. Siden kun døgndata blir korrigert for isoppstuing, ble findata justert slik at gjennomsnittet over ett døgn samsvarer med den lagrete døgnverdien. Merk også at ved uttak av momentanflom og døgnmiddelflom, vil årlige maksimalverdiene ikke nødvendigvis komme fra samme flomhendelser.

3.4 Endelig flomdatasett

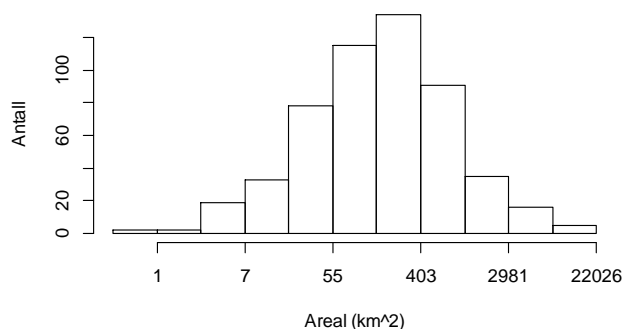
Det endelige datasettet består av 529 stasjoner med døgndata og 330 stasjoner med findata.

Figur 3.1 viser antall år i de utvalgte stasjoner for døgndata og findata. For døgndata har 478 stasjoner mer enn 10 år med data, 273 stasjoner har mer enn 30 år og 99 stasjoner har mer enn 50 år med data. Lengste dataserie har 123 år med observasjoner. De tilsvarende tallene for findata er hhv 268, 87 og 2 stasjoner.



Figur 3.1: Lengde på døgndataserier (venstre) og findata (høyre).

Fordeling av feltareal for de utvalgte stasjoner er vist i figur 3.2 (som histogram). Generelt ligger de små nedbørsfeltene nærmere kysten, og større nedbørsfelt mer i innlandet. Det minste arealet er 0.52 km², mens det største er 20300 km². Gjennomsnittlige arealstørrelse er 602 km², og median areal er 163 km².

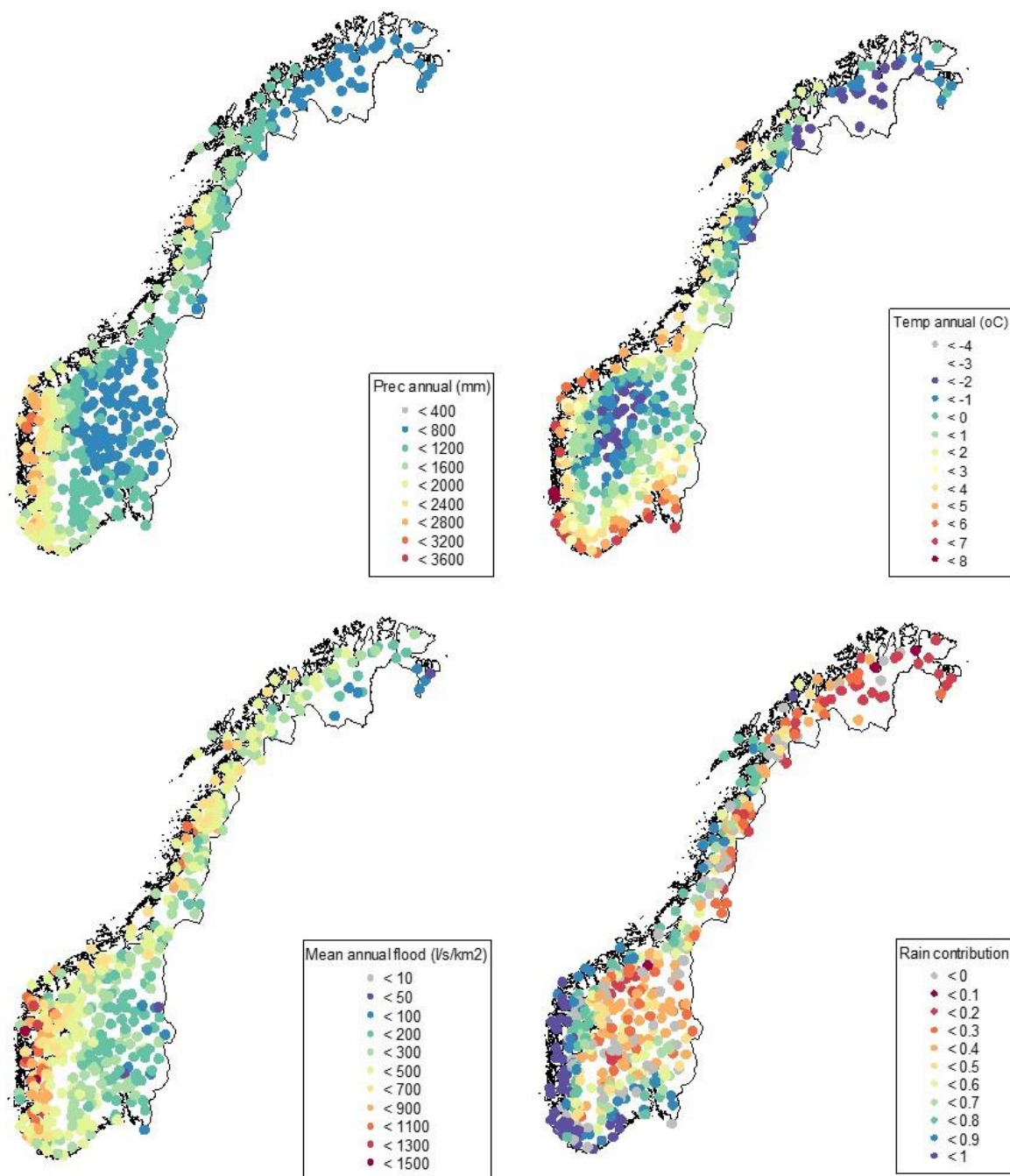


Figur 3.2: Histogram over feltareal.

Figur 3.3 viser klimatologi for flomfeltene. Dette inkluderer årsmiddelnedbør og temperatur, middelflom og andel regnbidrag til flommer. Det siste kartet viser områder der regnflommer dominerer (blålige farger) og områder der snøsmelting dominerer (røde og oransje farger).

3.5 Flomtilsig fra magasindata

Vannstandsdata fra vannkraftmagasiner er benyttet for å få ekstra informasjon om flomstørrelser i Norge. I flere magasiner er det «fanget» mange flommer ved at magasinet har vært tappet ned før flommen kom. I enkelte tilfeller kan en da få gode flomdata ved å beregne årlige maksimale døgntilslag, der døgntilslaget er endringen i magasinivolum fra en dag til neste tillegg eventuell tapping og overløp fra magasinet.



Figur 3.3: Kart som viser årsmiddelnedbør, temperatur og middelflom samt andelen regnbidrag til flommer.

Utvalg av magasiner

For å minimalisere støy ved beregning av døgntilslig fra magasindata, ble det valgt ut magasiner som ikke har andre reguleringsinngrep oppstrøms og heller ikke bekkeinntak på tilløpstunnelen mellom det aktuelle magasinet og tilhørende kraftverk og som har operasjonelle vannstandsmåliger. 208 magasiner ble da identifisert. Av disse er det 48 magasin med nedbørfelt mindre enn 10 km², 120 fra 10–100 km² og 40 magasiner med nedbørfelt større enn 100 km².

Gjennomgang av magasindata

For de 208 utvalgte magasinene ble vannstandsdata og magasinkurver gått gjennom i detalj med følgende kvalitetskrav: (i) minst 5 år med daglige vannstandsdata, (ii) år med observasjonsbrudd eller data av dårlig kvalitet i typiske flomperioder ble utelatt, (iii) magasinkurven skulle ikke ha åpenbare feil. Regulanter ble kontaktet for ekstra kontroll av magasinkurven.

Data om vann ut av magasin

En flomstørrelse ble beregnet bare dersom all informasjon om vann ut og inn i magasinet den aktuelle datoen var tilgjengelig. Derfor hadde vi følgende krav for å kunne beregne en årsflom: (i) Dersom magasinet hadde en vannstand over HRV i perioder hvor flommer kunne forekomme, måtte vi kunne estimere hvor mye vann som gikk i overløp, (ii) data om, luke-tapping, driftsvannføring, forbitapping og/eller tunneltapping. Disse dataene ble etterspurt hos regulanter og er stort sett tilgjengelig fra og med en gang ut på 2000-tallet.

Beregning av årsflommer fra magasindata

For de årene for hvert magasin som sto til kravene beskrevet ovenfor, beregnet vi årlige maksimale døgntilslig, $Q_{\text{maks},i}$ (m³/s) med følgende formel:

$$Q_{\text{maks},i} = \text{endring i magasinvolument} + \text{vann ut av magasinet}$$

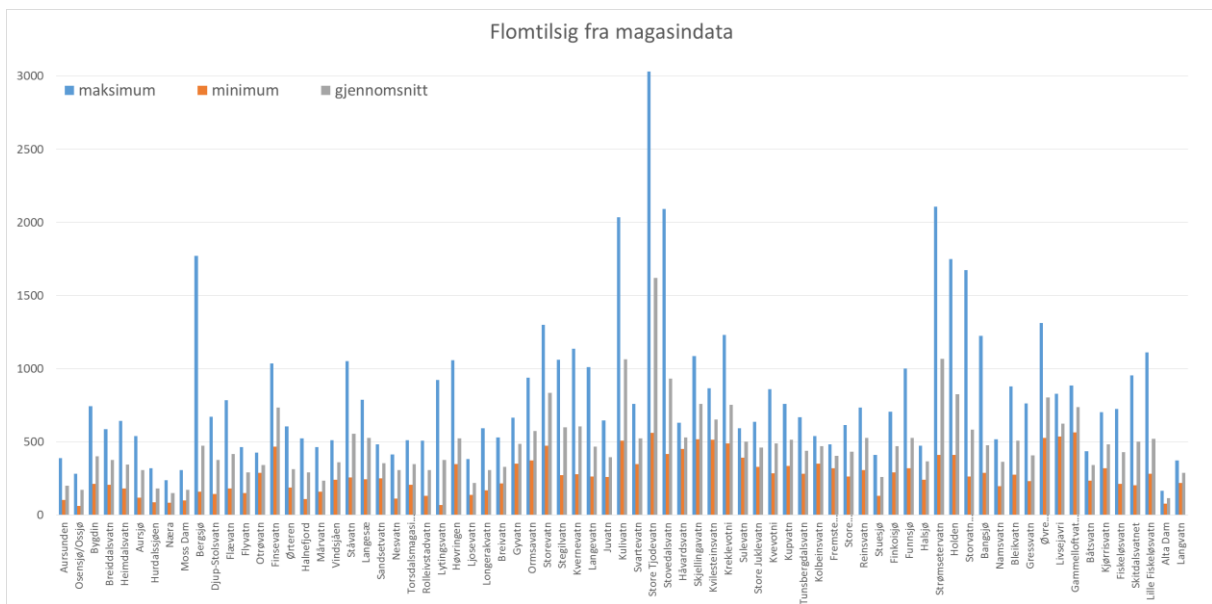
$$Q_{\text{maks},i} = V_i - V_{i-1} + O_i + L_i + T_i + D_i + F_i$$

Her står i for den datoen årets maksimale døgntilslig inntraff. Alle komponentene i formelen har enhet m³/s, og V er magasinvolument, O er overløp, L er luketapping, T er tapping i tunnel, D er driftsvannføring, og F er forbitapping. Alle komponentene for vann ut av magasinet relevante for hvert magasin.

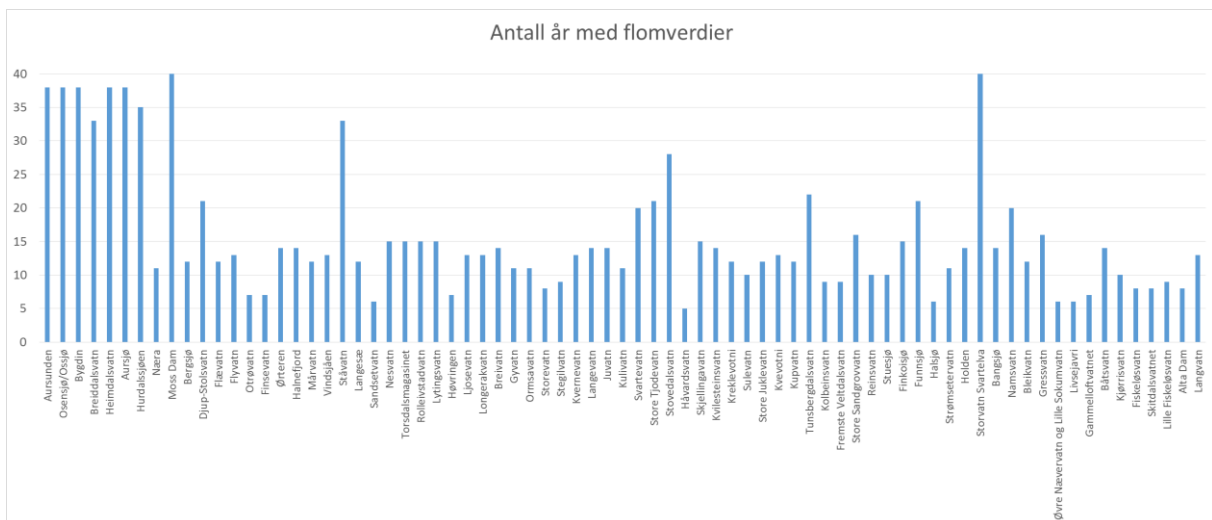
Vi fant døgnet med årlig maksimalt tilslig ved å anta at det enten var det døgnet i løpet av året der magasinvolument har endret seg mest siden dagen før, $\text{maks}(V_j - V_{j-1})$, eller døgnet for størst overløp, $\text{maks}(O_j)$, der j er hvert døgn ila året. Er vannstanden under HRV hele året, ble døgnet med $\text{maks}(V_j - V_{j-1})$ satt som det døgnet med årlig maksimalt tilslig. Hvis ikke ble summen av volumendring og overløp beregnet for både døgnet med maks. volumendring for døgnet med maks. overløp. Døgnet med den største verdien ble så satt som døgnet for årets maksimale tilslig, i . Resterende komponentene for vann ut ($L_i + T_i + D_i + F_i$) ble etterspurt hos regulanter. Årsflommer ble slutført for de årene der flommen så rimelig ut utfra værdata og nærliggende stasjoners hydrogrammer, vi mottok resterende data vi trengte, og regulanten mente de oversendte dataene så rimelige ut.

Til sammen ble det gjort beregninger for 75 magasiner som til sammen har data for 1179 år. Minste, største og gjennomsnittlige flomverdi for hvert magasin er vist i figur 3.4, og antall år med flomverdier i figur 3.5. Antall år med flomverdier er i gjennomsnitt 16 år, og varierer mellom 5 og 40 år. Flom-verdiene varierer mellom 60 og 3031 l/s/km², og har et gjennomsnitt på 480 l/s/km².

Alle kvalitetssikrede flomverdier ble lagret som egne tabeller i Hydra II. Flomanalyseprogrammer i Hydra II kan brukes for å analysere disse dataene.



Figur 3.4: Maksimum, minimum og gjennomsnittet av hvert magasins flomverdier.



Figur 3.5: Antall år med flomverdier for hvert magasin.

4 Modellering av vannføringskurver

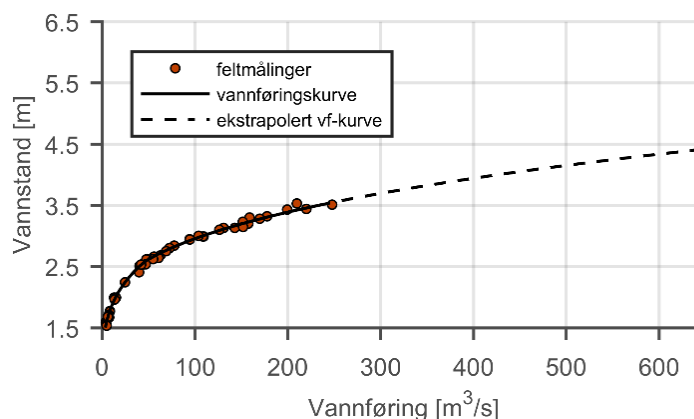
Øyvind Pedersen (NTNU), Nils Rüther (NTNU), Kolbjørn Engeland (NVE),
Frode Randen (NVE)

4.1 Innledning

Flomvannføring inngår som inngangsdata til vanlige metoder for estimering av dimensjonerende flommer slik som flomfrekvensanalyse eller kalibrering av nedbør-avløps-modeller, eller hydrauliske modeller. Gode estimater av vannføring ved flom er derfor viktig blant annet for beregning av dimensjonerende flommer for dammer og infrastruktur og beregning av flomsoner. Vannføring ved flom måles vanligvis ikke direkte, men estimeres basert på målinger av vannstand i elven. Vannføringen kan så estimeres ved å bruke en forhåndsbestemt vannføringskurve. Denne angir forholdet mellom vannstand og vannføring, vanligvis som en eller flere matematiske funksjoner på formen CH^b (potenslov), der $H = (h-h_o)$ er vannstanden, h , over et referansenivå, h_o , C er en koeffisient og b er en eksponent. For en segmentert vannføringskurve der en eller flere potenslovfunksjoner beskriver forholdet mellom vannstand og vannføring kan følgende formulering (etter Reitan and Petersen-Overleir, 2009) benyttes:

$$\begin{aligned} Q &= 0 && \text{for } h < h_{o1} \\ Q &= C_1(h-h_{o1})^{b_1} && \text{for } h_{o1} < h < h_{s1} \\ Q &= C_n(h-h_{on})^{b_n} && \text{for } h_{sn-1} < h < h_{sn} \end{aligned} \quad (1)$$

der Q er vannføring, h er vannstand, n angir segmentet, C_n er koeffisienten og b_n eksponenten for segment n , h_{o1} angir nivået ved null-vannføring som ofte kan måles fysisk – f.eks det laveste punktet på en terskel dersom det er kritisk strømning over terskelen. h_{on} er det teoretiske nivået for null-vannføring for segment n for $n > 1$. Dette punktet kan ikke måles fysisk. h_{sn} angir grensenivået mellom segmentene.



Figur 4.1: Eksempel på vannføringskurve med ekstrapolering.

For å konstruere vannføringskurver med likningene ovenfor gjør man vanligvis først en rekke direkte målinger av vannføringer og korresponderende vannstander. Deretter tilpasses potenslovfunksjoner (likning 1) til en eller flere segmenter med vannstand-vannføringsdata. Et eksempel på en vannføringskurve laget med likningene ovenfor er vist i figur 4.1. Tilpasningen kan gjøres manuelt, f.eks. ved tilpasning på et log-log plot (WMO, 2010), men

ofte gjøres automatiske tilpasninger av statiske modeller som også kan håndtere usikkerhet, f.eks. Bayesianske modeller (Moyeed and Clarke, 2005). Tradisjonelt har antall segmenter og overgangen mellom segmentene vært gjort manuelt, på øyemål eller basert på hydraulisk kunnskap, men det finnes også Bayesianske modeller som kan tilpasse alle parameterne i likning (1) og beregne antall segmenter (Reitan and Petersen-Overleir, 2009).

Ved store vannføringer er det store hastigheter i elva, og det er derfor både teknisk og sikkerhetsmessig krevende å gjøre direkte målinger av vannføring (Hersch, 2009). Det kan også være et logistisk problem å komme seg ut til avsidesliggende målestasjoner for å måle kulminasjons-vannføringen ved flom. Derfor finnes det ofte ikke direkte vannføringsmålinger for store flommer. Siden man likevel trenger estimater for flomvannføringen er det derfor ofte nødvendig å ekstrapolere vannføringskurva (se figur 6). Ekstrapolering av vannføringskurver gi usikre estimater (f.eks. Kuczera, 1996; Di Baldassarre and Montanari, 2009; Di Baldassarre m.fl., 2012; Steinbakk et al., 2016), og er ofte den største kilden til feil i vannføringsestimater (Domeneghetti m.fl., 2012). For eksempel viser en analyse av 581 norske målestasjoner for vannføring at over 25% av disse hadde usikkerhet på over 40% for store vannføringer (Petersen-Overleir m.fl., 2008). Den største usikkerheten i vannføringskurver er antakelig knyttet til endringer i underliggende hydrauliske forhold, som kan føre til plutselige endringer i vannstand-vannførings forholdet. Effekten av usikkerheten i vannføringskurver på den påfølgende flomfrekvensanalyse er diskutert i kapittel 7.2.

For å forbedre ekstrapoleringen av vannføringskurver kan man ta i bruk hydraulisk kunnskap. Enkle metoder er f.eks. vannstand-hastighet-areal metoden (se f.eks. Hersch, 2009), eller «slope-conveyance» metoden (f.eks. WMO, 2010). Disse metodene baserer seg på at henholdsvis hastigheten eller helningen til energilinjen ofte blir konstant med økende vannføring, men er begrenset til vannføringskurver der det ikke finnes noen plutselige endringer i underliggende hydraulikk eller geometri. For mer kompliserte forhold kan man bruke 1- eller 2-dimensjonale numeriske modeller basert på St. Venants likninger (f.eks. Sæter, 2000; Svelle m.fl., 2007; Lang m.fl., 2010; Shao m.fl., 2018; Di Baldassarre and Claps, 2010). Det er utviklet mange programvarepakker basert på denne typen modeller, f.eks. HEC-RAS (1D og 2D), mike11 (1D) og mike21 (2D).

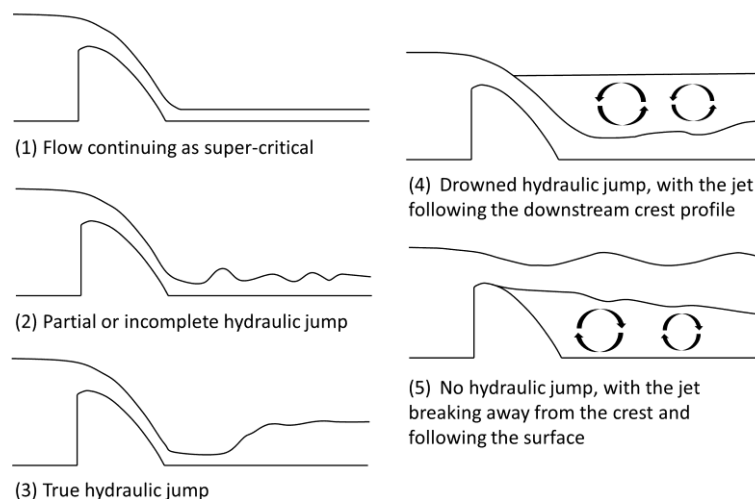
1D hydrauliske modeller beskriver hastigheter og dybder som gjennomsnitt over tverrprofiler, og vil være mest egnet dersom strømningsretningen er entydig. 2D modeller beskriver hastigheter og dybder distribuert i horisontalplanet, men beregner ett snitt over dybden. Denne typen modeller er egnet f.eks. til å beregne strømning som går utover elvetrauet, eller for å beregne sirkulerende strømning i bakevjer. Både 1D og 2D modeller er begrenset til strømning der vertikale hastighets-komponenter er neglisjerbare, og der trykkfordelingen i vannsøylen er nær hydrostatisk (Novak m.fl., 2010). Ved strømning f.eks. nær hydrauliske strukturer, obstruksjoner eller over terskler vil det typisk være 3-dimensjonale strømningsforhold og ikke-hydrostatisk trykk. I disse tilfellene kan man modellere strømningen ved bruk av hydrauliske skalamodeller i laboratoriet, eller ved bruk av 3-dimensjonale CFD (Computational Fluid Dynamics) modeller. Disse modellene kan være mindre avhengige av kalibrering enn 1- og 2-dimensjonale modeller. Spesielt gjelder dette dersom vannstanden hovedsakelig er kontrollert av et kritisk snitt. I dette tilfellet vil modellenes nøyaktighet være mest avhengige av makro-geometrien og vil være mindre sensitiv for ruhetstill. Både CFD modeller og skalamodeller kan være avhengige av kalibrering av ruhet for tilfeller der det er kanalstrømning, og der ruheten er viktig.

4.2 Oppsummering av resultater fra PhD

PhD-studiet tilknyttet arbeidspakke 2 i FlomQ prosjektet utforsker bruken av skalamodeller og CFD modeller til å modellere vannføringskurver. Dette gjøres gjennom to case-studier. Det første case-studiet utforsker bruken av en CFD modell til å modellere vannføringskuven ved kompliserte strømningsforhold. I dette case-studiet modelleres standard overløpsprofiler ved dykket strømning. Case-studiet resulterte i tre publikasjoner (Pedersen and Rütther, 2016b; Pedersen m.fl., 2018b; Fleit m.fl., 2017). Det andre case-studiet utforsker bruken av skalamodeller og CFD til å modellere en målestasjon for vannføring med komplisert geometri, Eggafossen. Dette studiet resulterte også i tre publikasjoner (Pedersen and Rütther, 2016a; Pedersen m.fl., 2018a; Pedersen and Rütther, 2018).

CFD modellering av dykkede overløp

Standard, S-formede overløpsprofiler er vanlige i bruk i mange sammenhenger, f.eks. til flomavledning fra dammer eller terskler i elver, og som kontrollstruktur for målestasjoner. Profilet formes etter underkanten av en frittgående jet fra et skarpt overløpsprofil ved en dimensjonerende vannføring. Fordelen med dette er at trykket på profilet teoretisk sett blir atmosfærisk ved dimensjonerende vannføring, slik at problemer med sug og kavitasjon på profilet unngås, og at kapasiteten, målt som vannføring ved en gitt vannstand over toppen av terskelen blir større enn for et skarpkantet profil. Strømningen over et overløp anses ofte som dykket dersom vannstanden på nedstrøms side av overløpet stiger over overløpskanten. Som vist i figur 4.2; ettersom nedstrøms vannstand stiger vil strømningen gå fra (4) en dykket jet som følger overløpskanten med et dykket vannstandssprang nedstrøms til (5) jeten bryter av fra overløpskanten og følger vannoverflaten uten noe markert vannstandssprang (USBR, 1987).

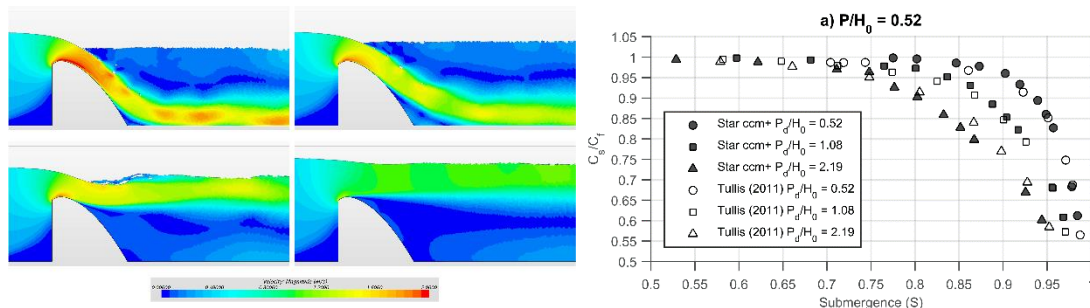


Figur 4.2: Strømningstyper over standard overløpsprofiler (Pedersen m.fl., 2018b).

Dykket strømning fører til kompliserte forhold med sirkulerende strømning og dannelse av mye turbulens nedstrøms for overløpet. Det er derfor vanskeligere å forutsi vannføringskurven ved dykket strømning enn ved fri strømning (type 1, 2 eller 3 i figur 4.2). Flere tidligere studier har vist at CFD modeller kan modellere strømningen ved fri strømning og delvis dykket strømning over overløp (f.eks. Olsen and Kjellesvig, 1998; Savage and Johnson, 2001; Dargahi, 2006; Chanel and Doering, 2008; Johnson and Savage, 2006) men det har

ikke vært forsket mye på bruk av CFD modeller til å modellere reduksjonen i kapasitet i overgangen mellom strømningstype (4) og (5).

Studiet i forbindelse med dette PhD-prosjektet viste at man kan oppnå gode resultater ved modellering av dykka overløp (figur 4.3). Ni forskjellige overløpskonfigurasjoner med varierende oppstrøms og nedstrøms nivåer ble testet med tre forskjellige numeriske modeller og sammenliknet med data fra fysiske laboratorieforsøk i renne (Tullis and Neilson, 2008; Tullis, 2011). Den mest detaljerte modellen oppnådde et gjennomsnittlig avvik i vannføring på 2% sammenliknet med fysiske forsøk.

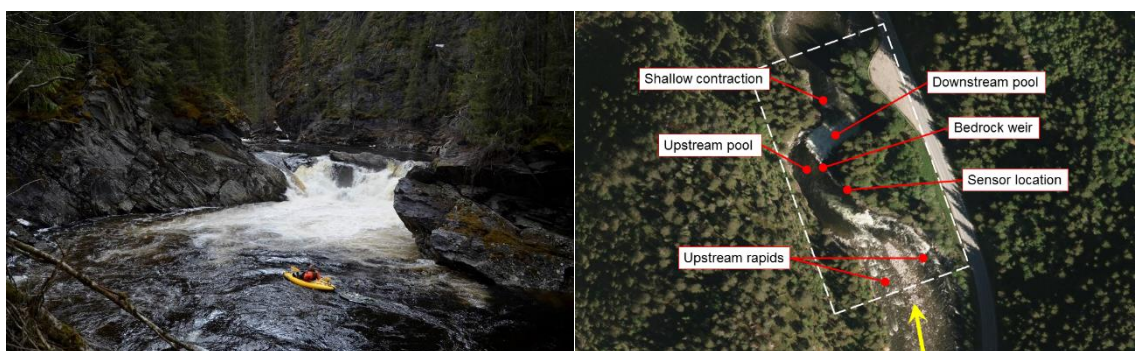


Figur 4.3: Eksempel på numerisk modellering (Star ccm+) av kapasiteten til dykkede overløp sammenliknet med fysiske forsøk (Tullis, 2011). Venstre: Beregnede hastigheter over overløpet for forskjellige dykkingsgrader (forhold mellom nedstrøms og oppstrøms trykkehøyde) (Pedersen and Rütther, 2016b). Høyre: Plot av reduksjon i kapasiteten (overløpskoeffisienten) til overløpet som funksjon av dykkingsgrad (Pedersen m.fl., 2018b).

Modelleringen viste også antall beregningspunkter (meshoppløsning), som må til for å beregne dykket strømning er vesentlig større enn for fri strømning, og vi publiserte anbefalinger for dimensjonsløs meshoppløsning ved modellering av denne typen problemer (Pedersen m.fl., 2018b).

Modellering av Eggafossen med skalamodell og CFD

Eggafossen er en målestasjon for vannføring, lokalisert i Gaula i Holtålen kommune i Sør-Trøndelag. Målestasjonen eies og opereres av NVE, og har vært i bruk siden 1941. Over 70 år med måledata for vannstand er registrert på stasjonen. I følge NVE er normalvannføringen 17 m³/s mens middelflom er 221 m³/s. Målestasjonen ligger i en kulp oppstrøms for Egga-fossen (figur 4.4). Mens det er gode forhold for måling av vannføring ved lavere vannføringer, fører en rekke egenskaper i elven rundt til at det er mer uoversiktlige forhold ved større vannføringer. Målestasjonen er lokalisert på høyre side av elven (sett medstrøms) og er skjult bak



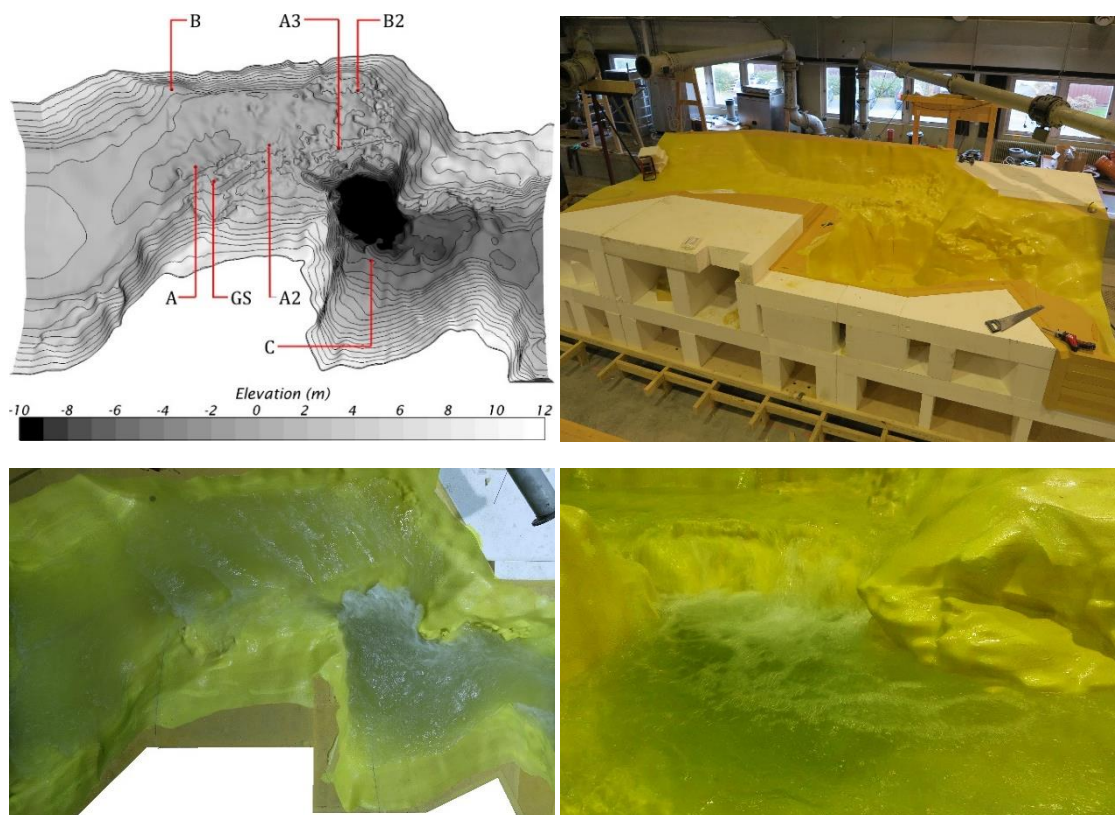
Figur 4.4: Eggafossen målestasjon. Venstre: Eggafossen fra nedstrøms. Høyre: Ortophoto som viser målestasjonen og forholdene i elven rundt (Pedersen m.fl., 2018a).

et utspring. Elven kommer inn i kulpene gjennom en sving og et stryk oppstrøms. Elven deler seg i to løp gjennom stryket, delt av en steinbanke i midten. Eggafossen ligger nesten perpendikulært på strømningsretningen gjennom kulpene. Det er også en kulp nedstrøms for fossen, hvor vannstanden bestemmes av et trangt og grunt parti litt lenger nedstrøms.

For å lage modellene var det nødvendig å hente inn batymetriske og topografiske data. Feltarbeidet ble for det meste gjennomført februar – april 2015. Arbeidet var utfordrende, til dels på grunn av snø og isdekke tidlig på våren og på grunn av høye hastigheter nær fossen og i strykene oppstrøms. Flere forskjellige maleteknikker ble brukt. For data over vannflaten brukte vi en bakkebasert laserskanner og stangmålinger med totalstasjon. For måling på grunt vann, der det var mulig å vade, bruktes også totalstasjon. På dypere vann brukte vi bunnmåleren/sonar på et m9 system, som vi festet til en kano eller tauet etter kanoen (se figur 4.4). Dataene over vann ble komplimentert med Statens-kartverks luftbaserte laserskan. Det ble i tillegg funnet nødvendig å gjøre ekstra målinger av batymetrien i stryket oppstrøms på lav vannføring i oktober 2016.

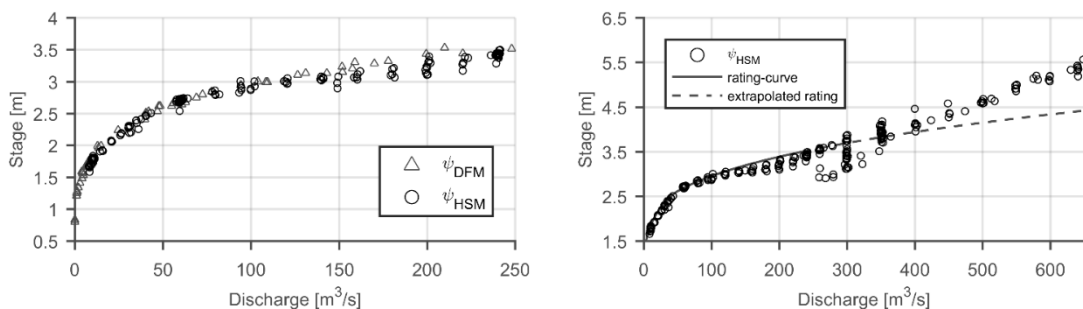
Dataene fra 2015 ble samlet i en punktsky, som ble behandlet videre ved å tilpasse en 3-dimensjonal overflate på .stl format til punktskyen. 3D modellen ble brukt som inngangsdata både til skalamodellen og til CFD modellen.

Skalamodellen ble konstruert av Sintef marintek og levert til hydroteknisk laboratorium ved NTNU høsten 2015 (figur 4.5). For å få en nøyaktig fysisk fremstilling av 3D modellen, ble geometrien fremstilt med fresing i et PVC-skum materiale med CNC (Computer Numerical Control).



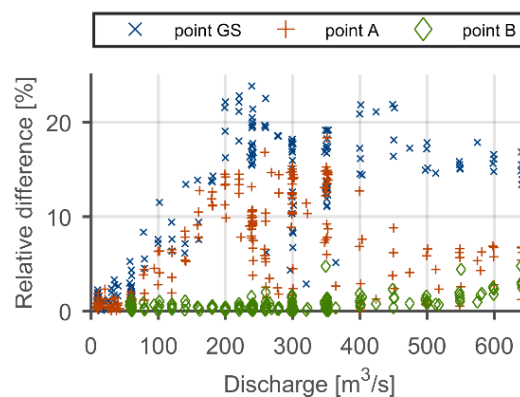
Figur 4.5: Øverst til venstre: Geometrien til Eggafossen skalamodell med indikerte målepunkter. Øverst til høyre: Utfrest geometri i PVC-skum under konstruksjon. Nederst til venstre: Fugleperspektiv av modellen med vann. Nederst til høyre: Detailbilde av modellen fra nedstrøms kulp mot Eggafossen (Pedersen m.fl., 2018a).

Modellen ble først validert mot direkte målte vannføringer fra felt (figur 4.6 til venstre). Rundt 100 feltmålinger finnes for vannføringer opp til 250 m³/s. Resultatene fra den skalamodellen stemmer godt med feltmålingene opp til ~150 m³/s. Etter dette er det noe mer spredning i dataene fra skalamodellen. Dette skyldes forholdene lokalt ved målepunktet. Måle-forholdene ved målestasjonen blir forstyrret av strømmingen forbi utspringet oppstrøms, og målingene i skalamodellen blir svært ustabile for vannføringer mellom 250 – 400 m³/s (figur 4.6 til høyre). Mindre forstyrrelser ble observert i skalamodellen fra ~100 m³/s. Vi konkluderte derfor med at målepunktet for vannstand er uegnet for modellering på høye vannføringer, og at vannføringskurven må anses som upålitelig i det ekstrapolerte området.



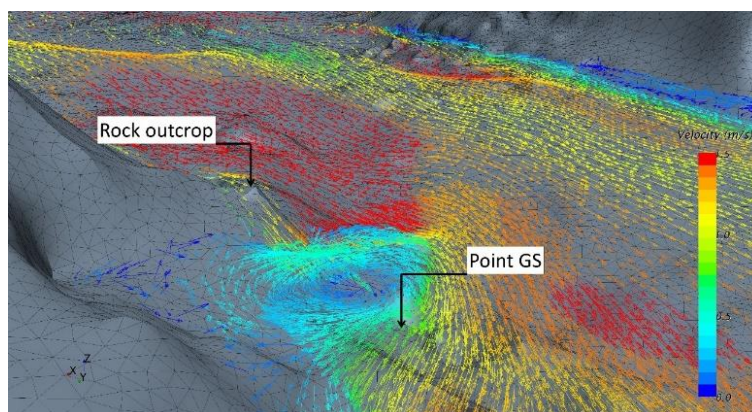
Figur 4.6: Venstre: Sammenlikning mellom vannstand-vannførings data fra felt (DFM) og skalamodellen (HSM) for vannføringer opp til 250 m³/s. Høyre: Vannstand-vannføringsdata fra skalamodellen for hele spennet av vannføringer sammenliknet med den operasjonelle vannføringskurven i interpolert og ekstrapolert område (Pedersen m.fl., 2018a).

Ved ideelle måleforhold for vannstand vil det generelt være hydrostatiske trykkforhold ved måle-punktet. En måte å evaluere målepunkter med tanke på egnethet for vannstandsmåling kan derfor være å se på om hydrostatiske trykkforhold er oppfylt. Hvis dette er tilfelle vil piezometrisk trykkehøyde i et punkt under vann tilsvare vannstanden i samme punkt. For å evaluere dette målte vi både trykkehøyden (med stillingsbrønn) og vannstanden direkte (med ultralyd) og så på differansen mellom disse i 3 punkter (figur 4.7). Studiet viste at måle-punktet for vannstand som er i operasjon i dag (punkt GS) hadde < 5% avvik for vannføringer under 60 m³/s, men vesentlig større avvik, på 15-25% for vannføringer > 200 m³/s. Et alternativt punkt på motsatt side av elven (punkt B) hadde < 5% avvik for alle målte vannføringer.



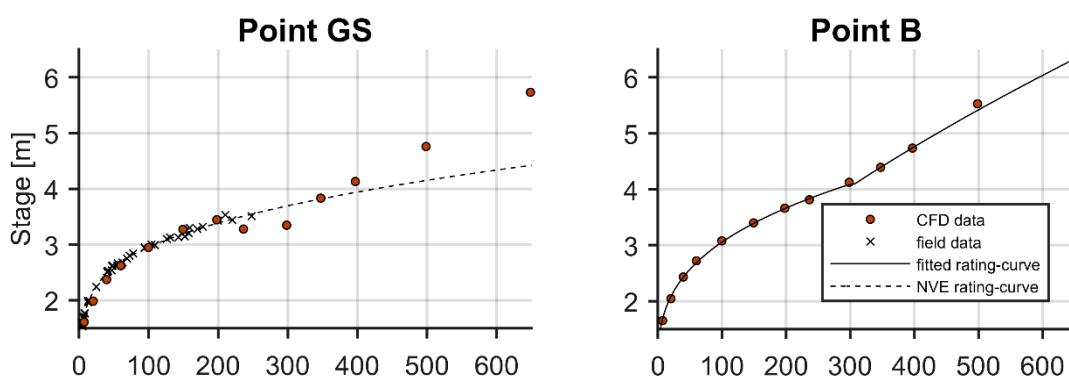
Figur 4.7: Avvik mellom målt piezometrisk trykkehøyde og vannstand i skalamodellen for tre punkter (Pedersen m.fl., 2018a).

Eggafossen ble også modellert med CFD modell. Det første målet med CFD-modellen var å validere bruken av CFD for denne problemstillingen. CFD modellen ble derfor først sammenliknet vannstand-vannføringsdata og hastighetsprofiler fra den fysiske modellen og viste generelt godt samsvar. I neste fase ble CFD modellen brukt til å ekspandere modellen oppstrøms for å undersøke påvirkning fra forhold oppstrøms for den fysiske modellen. CFD modellen gav økt forståelse av forholdene rundt punkt GS på større vannføringer og viste f.eks. strømmingen rundt punkt GS i mer detalj på store vannføringer (figur 4.8).



Figur 4.8: Beregnede hastighetsvektorer fra CFD modellen, som viser roterende strømming bak utspringet ved målepunktet ved 300 m³/s (Pedersen and Rüther, 2018).

En fordel med CFD modeller i forhold til skalamodeller er at det er mulig å få enkel tilgang til distribuerte hastigheter, trykk og turbulente egenskaper. Den ekspanderte CFD modellen ble brukt til å analysere vannstander og hastigheter i flere punkter. Analysen støttet konklusjon fra skalamodellen om at punkt GS er upålitelig for større vannføringer (figur 4.9 til venstre), og at punkt B har gode forhold for målinger av vannstand på store vannføringer. Resultatene fra både skalamodellstudiet og CFD-studiet ble brukt til å generere alternative vannføringskurver i punkt B. Vannføringskurven generert fra CFD modell data er vist i figur 4.9 til høyre.



Figur 4.9: Vannstand- vannføringsdata fra den ekspanderte CFD-modellen og vannføringskurver. Til venstre: Sammenlikning mellom CFD data, felldata og operasjonell vannføringskurve. Til høyre: Alternativ vannføringskurve i punkt B, konstruert etter data fra CFD modellen (Pedersen and Rüther, 2018).

4.3 Diskusjon

Case-studiene ovenfor er ment å gi «proof-of-concept» for skala-modellering og CFD-modellering av vannføringskurver med kompliserte strømningsforhold og geometri.

Et spørsmål som ikke har blitt behandlet i PhD-studiet er kost-nytte vurderinger av skalamodeller og CFD. Det er åpenbart at modellene som omhandles her er vesentlig dyrere enn enklere 1D og 2D modeller, som igjen er mer omfattende enn enkle ekstrapoleringsteknikker. Derfor er det også åpenbart at fysiske modeller og CFD har sitt bruksområde for målestasjoner der enklere modeller ikke er egnet. På den andre siden vil feilestimater i dimensjonerende flommer utvilsomt føre til svært omfattende økte kostnader i form av overdimensjonering av dammer og infrastruktur, og katastrofale skader og i verste fall tap av menneskeliv dersom dammer eller infrastruktur underdimensjoneres.

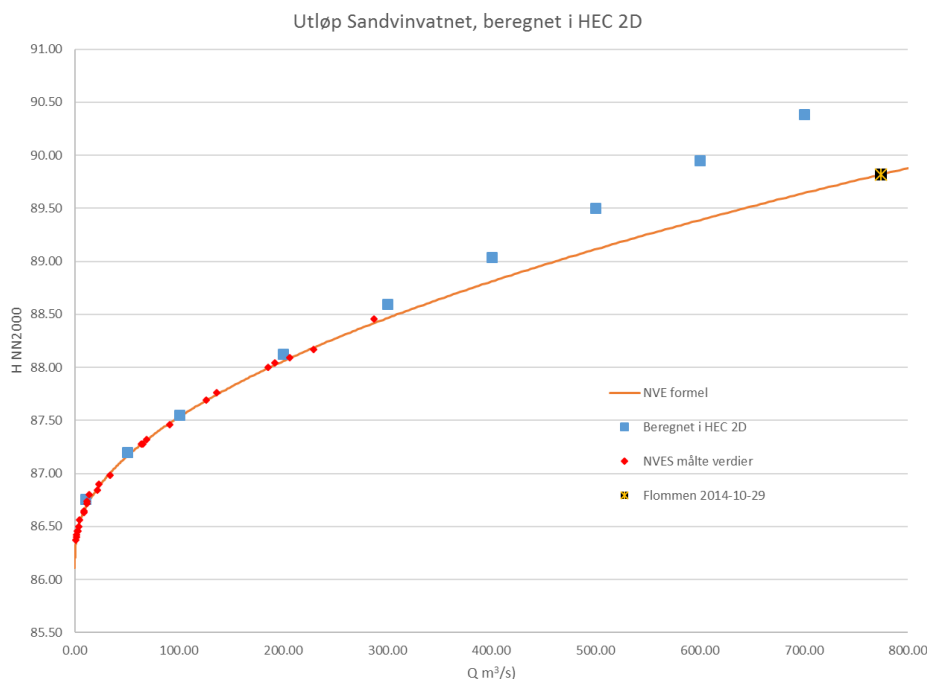
En vesentlig utfordring og kostnad for både skalamodeller og CFD modeller er anskaffelsen av tilstrekkelig detaljerte batymetriske (og i mindre grad topografiske) data. Nye teknikker, slik som overflatepenetrerende («grønn») laser, kan gjøre batymetriske data billigere og lettere tilgjengelige, og derfor også gjøre skalamodeller og CFD modeller av naturlige elver billigere i fremtiden.

Skalamodeller har blitt brukt innen hydraulisk modellering i over 100 år (Novak m.fl., 2010), mens CFD modeller har vært aktuelle bare de siste 20-30 årene. Skalamodeller er derfor en mer utprøvd og anerkjent metode, men det finnes mange eksempler på at CFD modeller kan gi tilsvarende resultater som tradisjonell skala-modellering (f.eks. Savage og Johnson, 2001, Sarker og Rhodes, 2004, Gessler, 2005, Johnson og Savage, 2006, Kirkgoz m.fl., 2008, Qu m.fl., 2009, Aydin og Emiroglu, 2013, Andersson m.fl., 2014, Feurich og Olsen, 2014, Aydin m.fl., 2015, Gumus m.fl., 2016, Savage m.fl., 2016, Zeng m.fl., 2016, Pedersen m.fl., 2018b). I følge et nylig utført litteraturstudie på kapasitetsberegninger på overløp er resultatene for CFD-beregninger generelt best for enklere geometri og strømming (innenfor noen få prosent), mens det oftere er større avvik i mer komplekse geometrier og strømmingssituasjoner (Olsen, 2015). En sannsynlig årsak til dette er ifølge rapporten det økte behovet for beregningsceller for komplekse geometrier. Olsen (2015) nevner spesielt tre tekniske utfordringer med CFD modellering, komplekse geometrier, luftinnblanding og stor ruhet i forhold til størrelsen på gridcellene. Olsen (2015) mener at det første problemet lar seg løse med utviklingen i regnekapasitet, mens de to andre problemene krever videre forskning. Studiene på dykka overløp og Eggafossen kan ses på som eksempler på videre validering av CFD modeller for henholdsvis kompleks strømming, og kompleks geometri og strømming.

Både utviklingen i tilgjengelig datakraft og parallellprosessering med superdatamaskiner fører til at CFD-modellering blir raskere og mer aktuelt for kompliserte geometrier (Slotnick m.fl., 2014). Samtidig fører utviklingen av numeriske algoritmer og meshgenereringsverktøy til at både kommersiell og åpen-kilde CFD programvare stadig blir mer tilgjengelig og effektiv i bruk. I forhold til fysiske modeller er CFD en kostnadseffektiv måte å modellere komplisert strømming, det er derfor sannsynlig at denne typen modeller vil bli mer aktuelle i bruk fremover.

4.4 Eksempel fra Odda

Vannføringskurven ved stasjon 48.1 Sandvinvatnet er et eksempel på hvordan hydraulisk modellering kan brukes for å forbedre en vannføringskurve for høye vannføringer(vf). Vannføringskurven ved denne stasjonen ble oppdatert våren 2018 på ved bruk av resultater fra hydraulisk modellering.

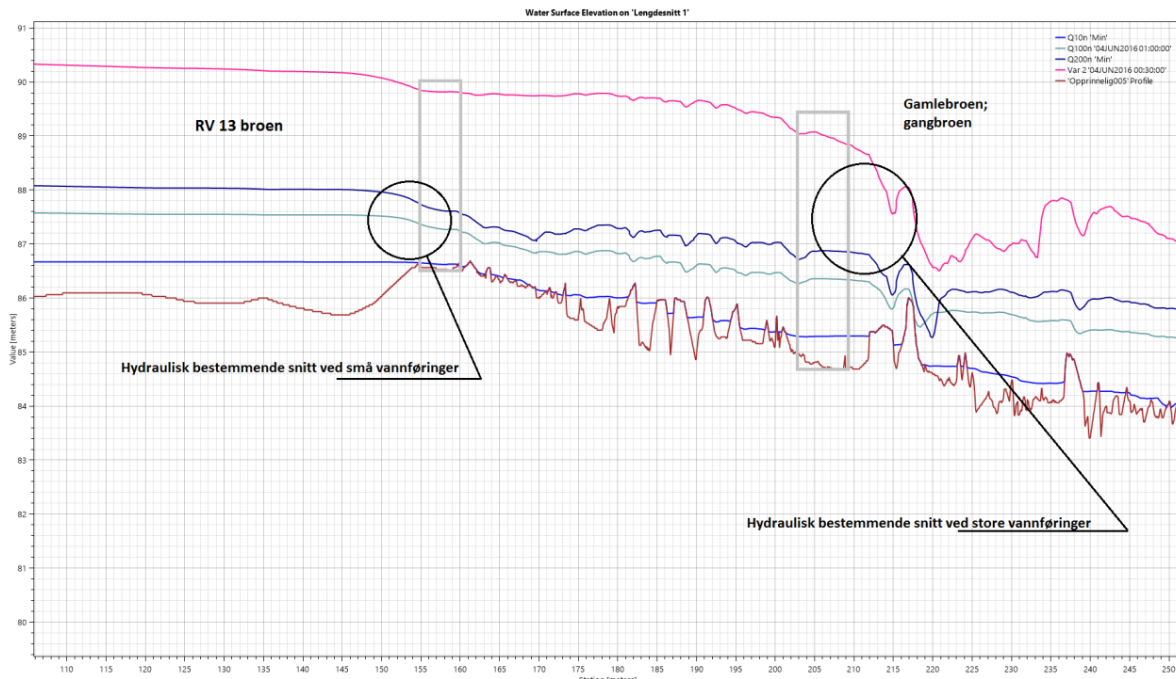


Figur 4.10: NVEs vannføringskurve ved Sandvinvatnet sammen med direkte observerte vannføringsverdier og modellerte vannføringsverdier. Kilde: Norconsult på oppdrag fra SKL.

NVEs Opprinnelige vannføringskurve var basert på tilpasning til målte vannføringer mindre enn ca. 280 m³/s. Ut over dette ble kurven ekstrapolert. Denne standard ekstrapolasjonen tar ikke inn lokal kunnskap om hva som bestemmer kapasiteten til utløpet av Sandvinvatnet. Dvs at den tar ikke hensyn til eventuelle segmentskifter pga endringer i bestemmende profil, elveprofil eller lignende. Figur 1 viser den gamle vannføringskurven sammen med målte verdier.

Norconsult utførte i 2017 kapasitetsberegning for utløpet av Sandvinvatnet ved bruk av HEC-RAS 5.0.3 som beregner strømmingen i 2D ved hjelp av Saint Venants ligninger. Et stasjonært oppsett ble brukt, dvs at vannføringen er konstant gjennom simuleringstiden. Elveløpet og bro Pilarer ble detaljert innmålt og geometrien ble lagt inn i modellen. HEC-RAS ble deretter kalibrert mot NVEs målte vannføringer og vannstander(vst).

Resultatene fra den hydrauliske modellen viser at modellerte vannføringer avviker fra NVEs ekstrapolerte vannføringskurve. For høye vannstander er modellerte vannføringen betydelig lavere (se Figur 4.11). Modellresultatene forklarer hvorfor denne forskjellen oppstår. Når vannføringen økes, så flyttes kontrollerende profil nedstrøms, dvs fra RV 13 broen til gangbroen nedstrøms. Siden NVE ikke har målt vannføringer som er så høye at det bestemmende profilet flyttes, vil den ekstrapolerte vannføringskurven være feil.



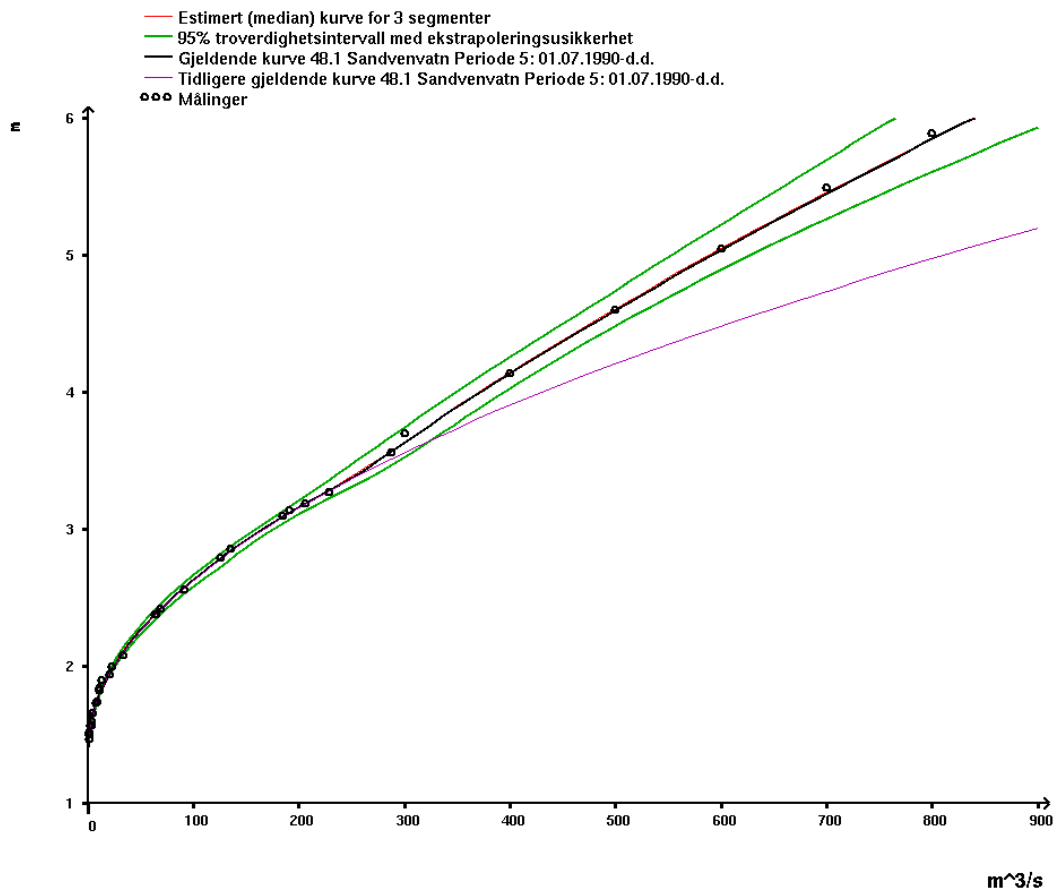
Figur 4.11: Vannlinjer for lave og høye vannstander langs Opo ved utløpet fra Sandvinvatnet. Kilde. Norconsult på oppdrag fra SKL.

NVE benyttet resultatene fra den hydrauliske modelleringen til å oppdatere vannføringskurvene helt tilbake til 1908. Det er totalt fem kurveperioder fra start i 1908 til dags dato. R13-brua i utløpet ble bygget i perioden 1978-1979. For perioden før brua kom på plass er punktene som er tatt ut av modellen justert i forhold til dette. Vst/vf-punktene som er benyttet er presentert i Tabell 4.1. I Figur 4.12 vises oppdatert og gammel vannføringskurve for den gjeldende kurveperioden (1990 – dags dato). Under flommen høsten 2014 var den høyest registrerte vannstanden på timesverdi 4,91 m, mens tilsvarende døgnmiddelverdi var 4,32 m. Tilhørende vannføringsverdier for gjeldende og tidligere kurve er hhv 571 m³/s og 774 m³/s for timesverdien og 440 m³/s og 541m³/s for døgnmiddelverdien.

De to kurveperiodene før 1979 gir noe mer vann for flomsegmentet enn de tre periodene etter 1979 (resultater ikke vist). Dette skyldes at oppstuvningseffekten fra R13-brua ikke eksisterer for de to første. De høyest registrerte vannstandene for første kurveperiode er 4,03 m i 1917 og 1918. For andre periode er det registrert en vst på 3,61 m i 1967. Effekten av om R13-brua er tatt med i modellen eller ikke gjør seg først gjeldende for vannstander høyere enn ca 3,7 m. Vi har totalt fire hendelser der dette er tilfelle i første kurveperiode og ingen i andre periode.

Tabell 4.1: Vannstander ved utløpet av Sandvinvatnet for ulike vannføringer beregnet ved hjelp av HEC-RAS. Vannstandene er beregnet for periodene før og etter 1979 for å ta hensyn til bygging av R13-brua.

Vannføring (m ³ /s)	Vannstand (m) før 1979	Vannstand (m) etter 1979
300	3,61	3,69
400	4,05	4,13
500	4,47	4,59
600	4,9	5,04
700	-	5,48
800	-	5,88



Figur 4.12: Gjeldende kurve for inneværende periode (1990 – d.d.) sammen med tidligere kurve der flomsegmentet var ekstrapolert på bakgrunn av reelle vannføringsmålinger opp til 287 m³/s.

5 Ekstrem nedbør

Ole Einar Tveito (MET), Karianne Ødemark (MET), Richard Moore (MET), Anita V. Dyrødal (MET), Eirik J. Førland (MET), Deborah Lawrence (NVE)

5.1 Beregning av PMP med numeriske atmosfæremodeller

Dimensjonerende nedbørverdier har tradisjonelt vært basert på observasjoner fra vær- og nedbørstasjoner. Tilgjengeligheten til, og valg av observasjonsserier kan ha stor betydning for representativiteten til beregningene. Meteorologisk institutt (MET) har utviklet en metodikk basert på romlig fordelt nedbør (gridda data, seNorge.no, Jansson m.fl., 2007; Tveito m.fl., 2005, 2008) kombinert med Generalized Extreme Value (GEV) fordelingen (Coles, 2001, Dyrødal m.fl., 2016). Årlig maksimum arealnedbør (midlere nedbør over et vassdrag e.l.) hentes ut fra griddede data for perioden 1957-i dag (Lussana m.fl., 2018). Dataene tilpasses en GEV-fordeling, med eller uten begrensning på shape parameteren, og gir estimater for valgte returperioder.

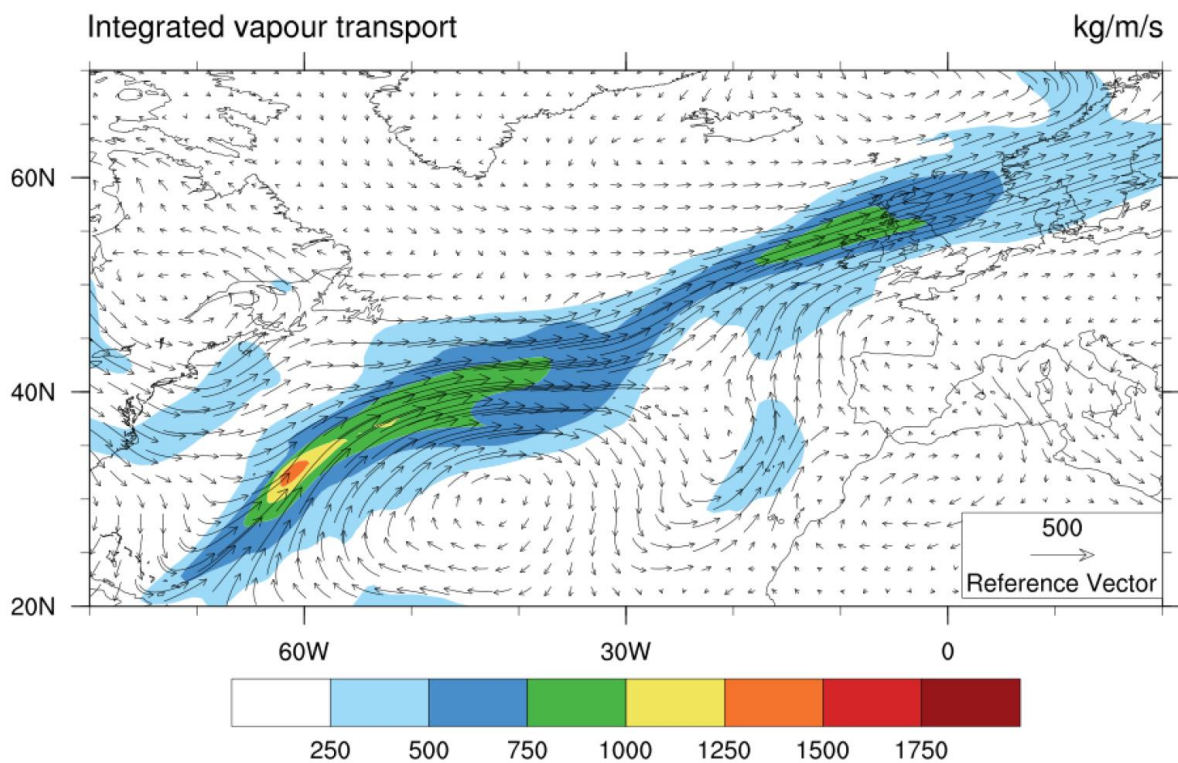
Fordelen med å benytte romlig fordelt nedbør er at man får en konsistent beskrivelse av nedbøren. Estimaterne av ekstremnedbør kan utføres direkte på tidsserier av arealnedbør for de aktuelle nedbørfelt slik at subjektive vurderinger av stasjonsrepresentativitet og røffe empiriske justeringer fra punkt til arealnedbør unngås.

Påregnelig maksimal nedbør (PMP) er en kritisk verdi for damsikkerhet og flomberegning (Middtømme m.fl., 2011). PMP er teoretisk maksimal nedbør for en gitt varighet (WMO, 2009), og avhenger luftfuktighet i atmosfæren, fuktighetstransport, vedvarende oppadrettet vertikal bevegelse og sterk vind. Når alle disse faktorene maksimeres oppnås optimale betingelser for å beregne PMP.

Tradisjonell frekvensstatistikk basert på observasjoner vil ha begrensninger for virkelig store gjentakintervall (> 500-1000 år). Så behandling av de mest ekstreme nedbørverdiene og PMP krever at alternative tilnæringer benyttes. Gjeldende metodikk er basert på empiriske vekstfaktorer (Førland, 1992). I den seneste WMO-manualen for estimering av PMP (WMO, 2009) anbefales det å benytte fysisk baserte atmosfæriske modeller, spesielt for områder der orografisk nedbør spiller en betydelig rolle. En slik fremgangsmåte er benyttet av Ohara m.fl. (2011), som har studert maksimal nedbør for et nedbørfelt i California ved å anvende en regional skala atmosfæremodell. I FlomQ anvendes en tilsvarende tilnærming for Norge, gjennom å benytte METs operasjonelle værvarslingsmodell Arome (Bengtsson m.fl., 2017). Ved å manipulere modellens initial- og grensebetingelser skal modellen tvinges til å beskrive ulike "worst- case" PMP scenarier for forskjellige nedbørfelt.

Storskala ekstremnedbør i Norge skyldes oftest konsentrert transport av fuktige luftmasser fra den sub-tropiske delene Atlanterhavet inn mot norskekysten (figur 5.1). Denne transporten benevnes ofte "atmospheric rivers" (AR) når integrert horisontal vanndamptransport overstiger en viss terskelverdi (Benedict m.fl., 2018). Figur 5.2 viser hvordan ulike strømningsmønstre gir ekstrem nedbør i ulike deler av Norge.

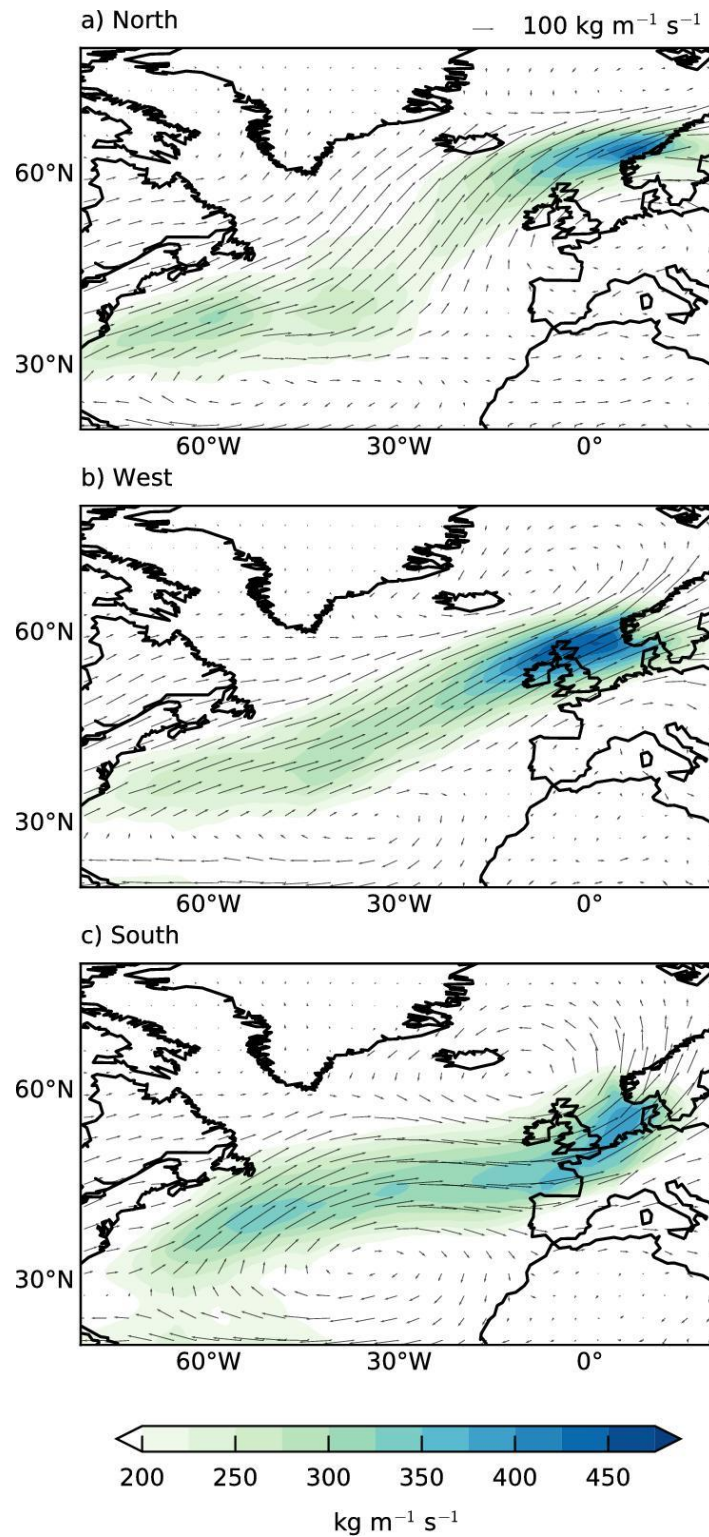
Gjennom å studere historiske kraftige flomdannende nedbørhendelser har man funnet et godt samsvar mellom stor fuktighetstransport i form av atmosfæriske elver og flom. Figur 5.3 viser fraksjonen av antall episoder med høy vannføring fra NVEs avrenningsstasjoner som er knyttet til atmosfæriske elver.



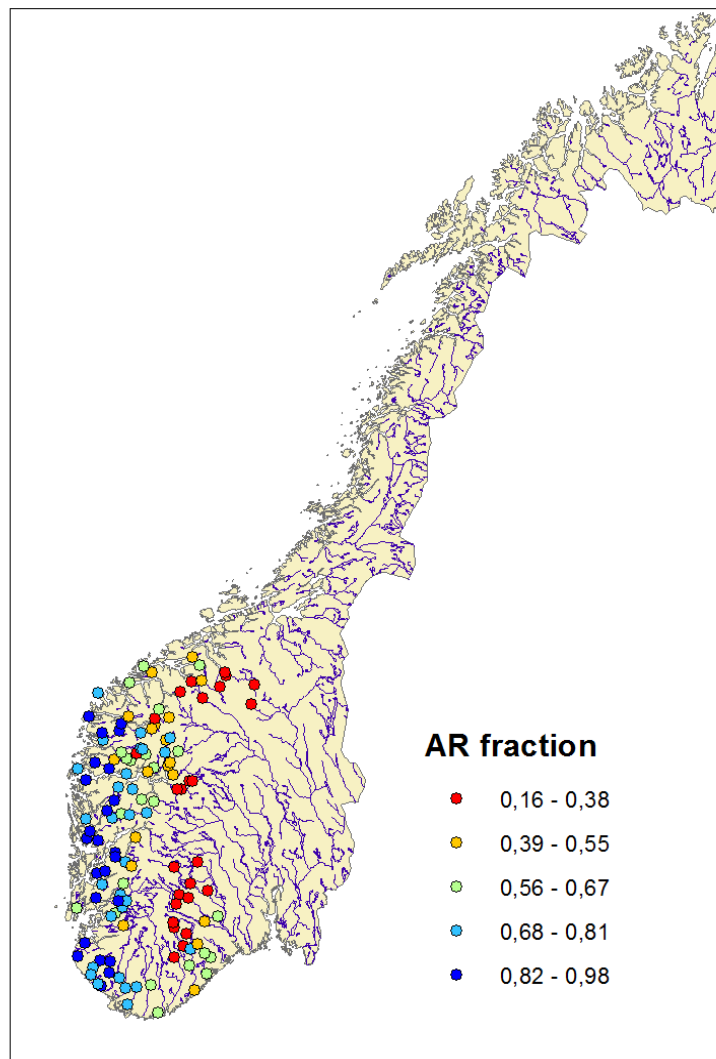
Figur 5.1: Eksempel på fuktighetstransport i en "atmosfærisk elv".

Studier viser at nedbør er den fremtredende flomgenererende prosessen (FGP) i store deler av Norge. På Østlandet har nedbør erstattet snøsmelting som den mest dominerende FGP på enkelte steder. Fremskrivninger av klimaet antyder at nedbør vil fortsette å få økende betydning for flom i Norge (Vormoor m.fl., 2015), og erstatte snøsmelting som den dominerende FGP i de fleste områder der snøsmelting er dominerende under dagens forhold.

Kunnskap om hvilke kombinasjoner av atmosfæriske forhold som kan føre til ekstrem nedbør og dermed flom i ulike deler av Norge er en nøkkel til å beregne PMP. Historiske ekstreme, flomdannende nedbørhendelser brukes som utgangspunkt, og PMP estimeres ved å manipulere initial- og grensebetingelser i atmosfæremodellen for å maksimere nedbøren.



Figur 5.2: Integrert vandamptransport for dager med ekstremnedbør i nord (a), vest (b) og sør(c). (Fra Benedict m.fl., 2018)

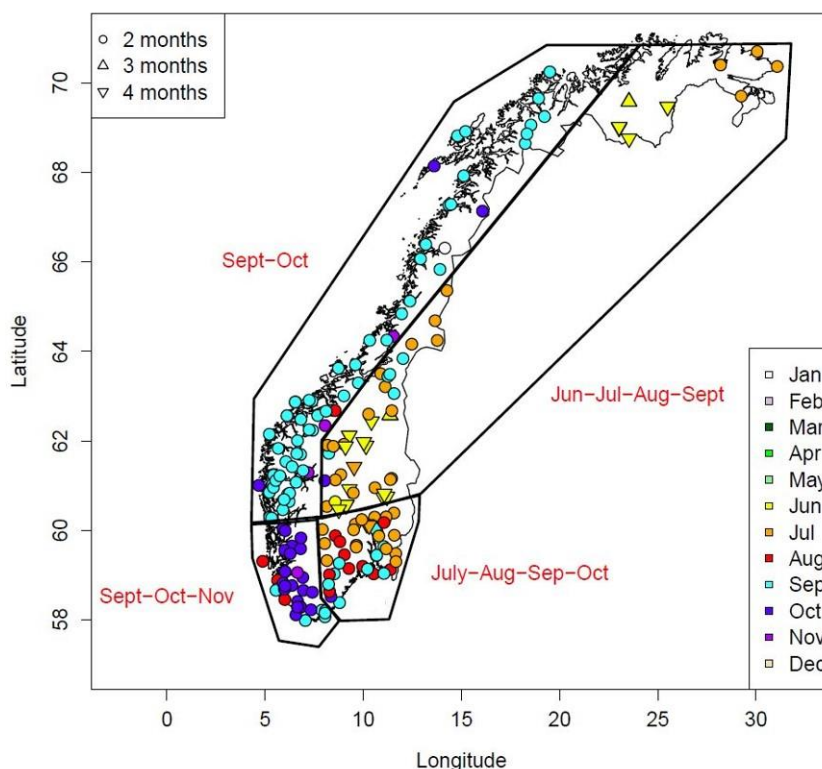


Figur 5.3: Fraksjonen av antall episoder med høy vannføring knyttet til atmosfæriske elver.

5.2 Testing av MEWP fordeling for ekstremnedbør i Norge

Stokastiske nedbør-avløpsmetoder for dimensjonerende flom (se kapittel 6) tar ofte utgangspunkt i en probabilistisk modell for nedbør med fokus på ekstremverdier. I FlomQ prosjektet har vi vurdert den såkalte 'Multi-Exponential Weather Pattern-based' (MEWP) fordeling (Garavaglia m.fl., 2010; 2011) for bruk i Norge. Databasen for vurderingen består av 193 nedbørstasjoner i Norge med minst 50-års data i perioden 1948-2009 (og mindre enn 10% manglende data i et gitt år). Den 'høy risiko' sesongen for ekstremnedbør for hver stasjon var først identifisert ved å plote alle over-terskel verdiene for hver måned. Resultatene av denne analysen er vist i figur 5.4, der fargen gir den første måneden i den 'høy risiko' sesongen og symbolet gir varigheten av sesongen.

Statistikk som beskriver stabilitet (dvs. robusthet) og pålitelighet (Renard m.fl., 2013) var brukt til å sammenligne hvilken av 2 mulige fordelinger: 1) en eksponentiell fordeling (EXP); og 2) en Generalised Pareto fordeling (GPD) fungerer best overalt for ekstremnedbør i Norge.



Figur 5.4: 'Høy risiko' sesong for ekstremnedbør basert på over-terskel nedbørverdier for hver stasjon. Fargene viser den første måneden i den høy risiko sesong og symbolene viser varighet på sesongen.

I tillegg var en værtype klassifikasjon som tidligere er blitt utviklet for ekstremnedbør hendelser i Norge (Lawrence m.fl., 2014) også benyttet for å skille mellom hendelsene som skyldes forskjellige værtyper. Resultatene viser at den MEWP fordelingen er mer robust enn den alternative GPD-basert fordelingen, men de to fordelingene har ganske lik pålitelighet på de høyeste verdiene som kunne vurderes (dvs. 20-årsnedbørintensiten). Det var også konkludert at bruk av 'subsampling' basert på sesong og værtype gir mer pålitelige estimater enn bruk av en EXP fordeling uten hensyn til sesong eller værtype. Den MEWP modellen for å beskrive sannsynlighet av ekstremnedbør var brukt videre i FlomQ prosjekt for de stokastiske nedbør-avløpsmetodene som beskrives i kapittel 6.1. Modellen kan også brukes for å beregne dimensjonerende nedbørverdier, og videre detaljer om modellen og testing som ble gjennomført finnes i Blanchet m.fl. (2015).

6 Nedbør-avløps-modeller

Deborah Lawrence (NVE), Thomas Skaugen (NVE)

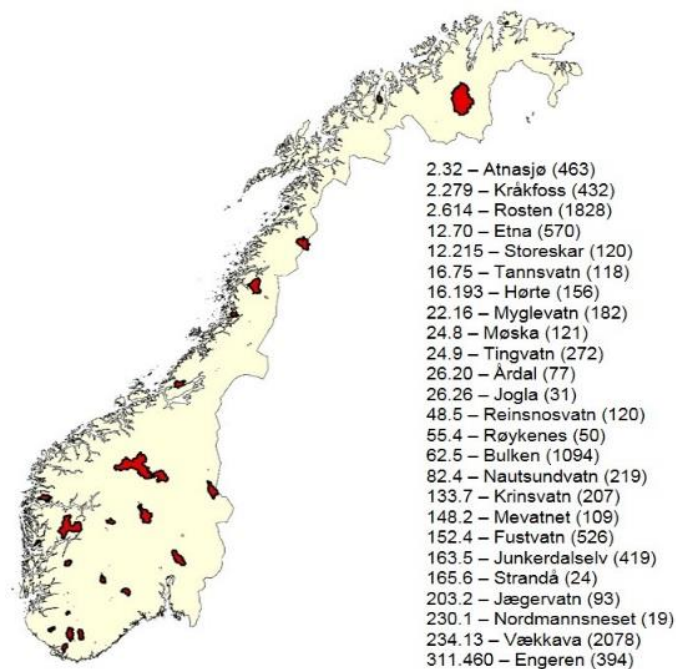
Flomestimeringsmetoder som anvender en nedbør-avløps-modell er et alternativ til statistisk flomfrekvensanalyse. For beregning av påregnelig maksimal flom, Q_{PMF} , er dette det eneste alternativet som finnes. Det er flere fordeler med nedbør-avløps-metoder, bl.a. kan man vurdere konsekvensene av ulike kombinasjoner av nedbørintensitet og -varighet og fuktighetsforhold i et nedbørfelt (e.g. metningsgrad og mulig snøsmelting) for flomvannføring, og kombinasjoner som aldri har blitt observert, men likevel kan forekomme. Nedbør-avløps-metoden for dimensjonerende flom som vanligvis benyttes i Norge (PQRUT, se beskrivelsen i Midttømme, m.fl., 2011) er en såkalt hendelsesbasert metode. Et fastlagt nedbørførløp med et gitt gjentaksintervall (f.eks. 500- eller 1000-år) kjøres gjennom PQRUT modellen for å simulere et flomforløp. Initiale tilstand i nedbørfeltet og et eventuelt snøsmelteforløp må også fastsettes for kjøringen, og veiledning for dette finnes også i Midttømme, m.fl., 2011. Metoden er enkelt å implementere, og PQRUT modellen kan brukes både for nedbørfelt med målinger (med kalibrering av modellparameterne) og uten målinger (med bruk av regionaliserte ligninger for parameterne).

En utfordring med dagens nedbør-avløps-metode, sett bort i fra kalibreringen og regionaliseringen, er at metoden forutsetter at flomforløpet som beregnes har samme gjentaksintervallet som nedbør-forløpet kjørt gjennom modellen. Praksis viser at for noen vassdrag i Norge er flomverdiene beregnet med PQRUT betydelig større enn forventet, av og til minst dobbelt så høye som verdier fra statistisk flomfrekvensanalyse (Lundquist, 2013). Både initial fuktighetstilstand i nedbørfeltet, snøsmelting og urealistiske nedbørverdier kan muligens bidra til dette, og det er ofte i store nedbørfelt på Østlandet at avviket er størst. Denne mangelen på overenstemmelse skyldes i stor grad metodikken som brukes, dvs. at det faktisk ikke er mulig å fastsette et gjentaksintervall for en enkelt hendelsesbasert beregning. Derfor er det i de siste 20 årene blitt utviklet stokastiske simuleringsmetoder for dimensjonerende flom med bruk av nedbør-avløps-modeller (Broughton og Droop, 2003; Pathiraga m.fl., 2012). Slike metoder gir mulighet for å teste utallige kombinasjoner av nedbørintensitet, snøsmelting og initial tilstand, for nedbørfeltet, og man kan lage en sannsynlighetsfordeling for mulige flomvannføringsverdier og dermed beregne verdien for et gitt gjentaksintervall.

I FlomQ prosjektet har vi utviklet en stokastisk simuleringsmetode for flomestimering i Norge basert på SCHADEX metoden (Paquet m.fl., 2013). Det er en såkalt «semi-kontinuerlig» metode der nedbørhendelser beregnes fra en probabilistisk nedbør modell og erstatter nedbørhendelsene i en observert tidsserie. Den nye tidsserien brukes som inndata til en hydrologisk modell. SCHADEX metoden har blitt brukt i Frankrike siden 2006 for å beregne dimensjonerende flom for damsikkerhet, og ble også testet for 3 norske nedbørfelt (Lawrence m.fl., 2014) i forprosjektet til FlomQ. I FlomQ har vi sett både på bruk av metoden i nedbørfelt der det finnes vannføringsmålinger for kalibrering av den hydrologiske modellen og med bruk av en regionalisert versjon av samme modellen for umålte nedbørfelt. Den hydrologiske modellen som ligger til grunn for utvikling av SCHADEX for bruk i Norge er DDD (Distance Distribution Dynamics) modellen (Skaugen og Onof, 2014). DDD modellen ble valgt istedenfor HBV (Sælthun, 1996) fordi DDD har færre parametere som må kalibreres, og er dermed bedre egnet for regionalisering til umålte nedbørfelt.

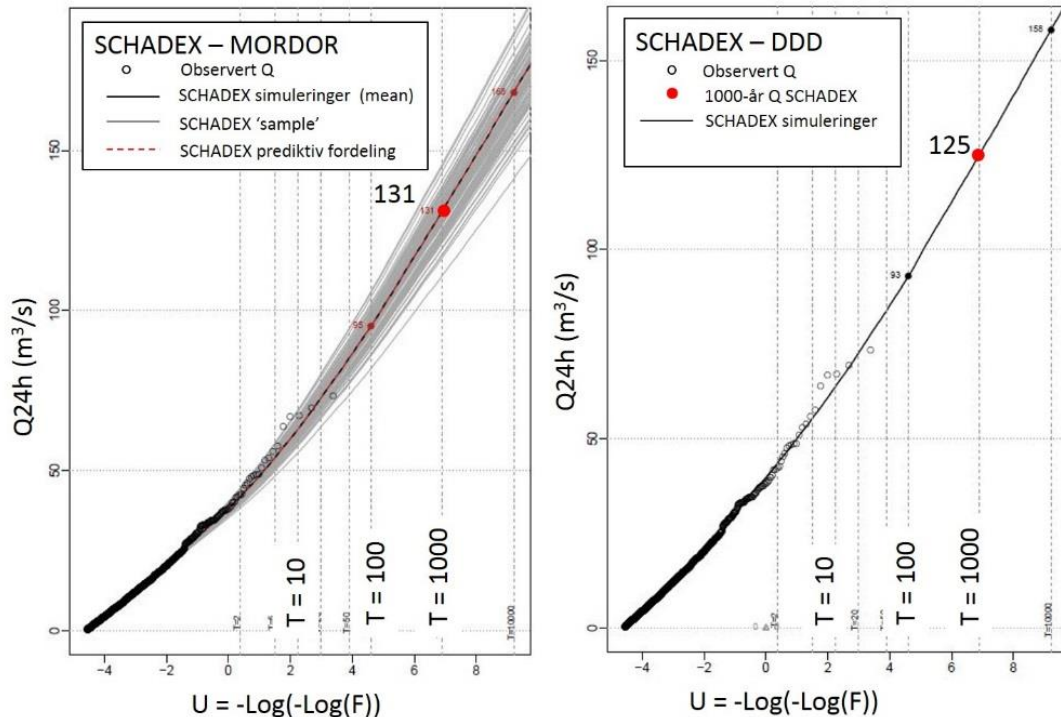
6.1 SCHADEX metoden for målte felt

Et utvalg av 25 uregulerte nedbørfelt med vannføringsmålinger er benyttet for å teste SCHADEX metoden (figur 6.1). En probabilistisk nedbør-modell, MEWP («Multi-Exponential Weather Pattern» basert) fordelingen (beskrevet ovenfor i kapittel 5.2), ble tilpasset arealnedbør, beregnet fra seNorge 1 x 1 km «gridded» data for perioden 1985-2014, for hvert nedbørfelt. Modellen beskriver sann-synlighet av sentrerte nedbørverdier i 3-dagers sekvensen som byttes ut i SCHADEX simulering-prosessen. I tillegg er det to enkle modeller som må tilpasses for hvert nedbørfelt som beskriver: 1) nedbørverdien på dagen før og dagen etter den sentrerte nedbøren, og 2) en korreksjon som tar høyde for korrelasjonen mellom den sentrerte verdien og nedbøren i flere dager før den (se Paquet m.fl., 2013 for videre detaljer). Nedbør-, temperatur- og vannføringsdata for perioden 1985-2014 var også brukt til kalibrering av to hydrologiske modeller for hvert nedbørfelt: 1) MORDOR som er den vanlige modellen benyttet for SCHADEX og ligner mye på HBV; og 2) DDD. Den kalibrerte modellen var da brukt til å kjøre SCHADEX simuleringer der omtrent 2×10^6 syntetiske nedbørhendelser erstatter observerte hendelser i modellkjøringen. For MORDOR modellen var det også mulig å kvantifisere usikkerheten som skyldes kalibreringen av den hydrologiske modellen (se Brigode, m.fl. 2014), men dette var ikke mulig for DDD på grunn av beregningstiden som kreves.



Figur 6.1: Nedbørfelt til de 25 vannføringsstasjonene som ble brukt for SCHADEX simuleringer. Areal på nedbørfeltet er vist i parentes.

Et eksempel på resultater for SCHADEX simuleringer er vist i figur 6.2 for både MORDOR og DDD for vannføringsstasjonen Mevatnet (148.2) i Trøndelag. De svarte (og grå) linjene viser den empiriske fordelingen av SCHADEX simuleringene og er sammenlignet med observasjoner. I dette tilfellet er det en veldig bra overenstemmelse mellom simuleringene og observasjonene, både for MORDOR og DDD. Estimer for 1000-års vannføring er også vist med et rødt punkt, og de er også ganske like.

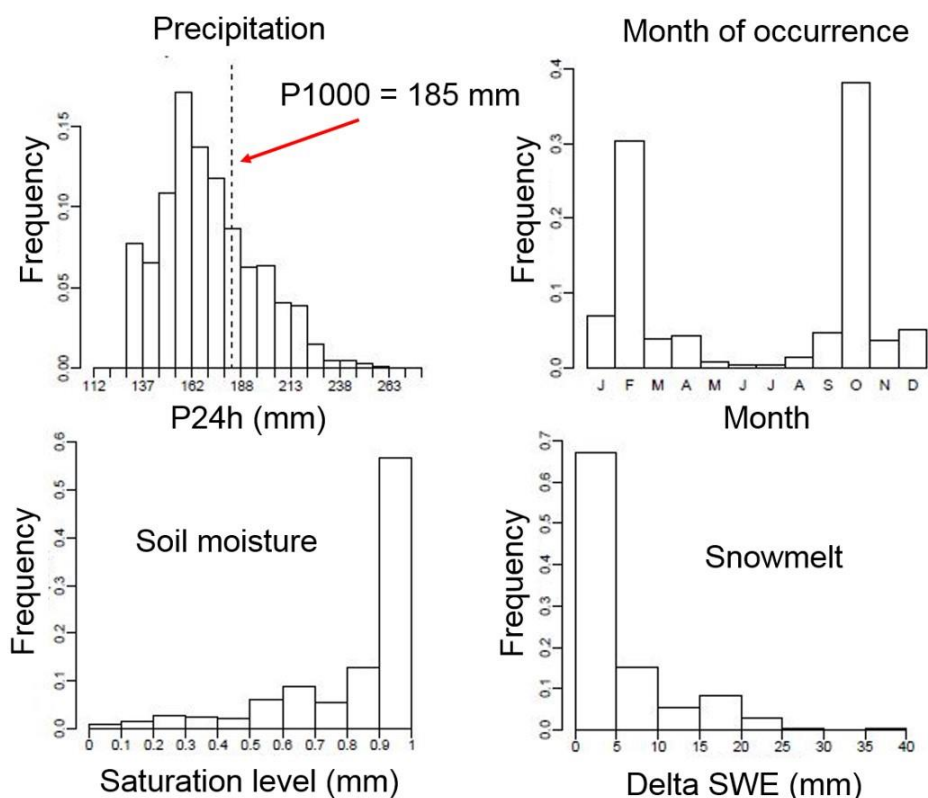


Figur 6.2: SCHADEX resultater (svarte og grå linjer) for kjøring med MORDOR og DDD modellene for Mevatnet (148.2) i Trøndelag. Døgnvannføring er vist som en funksjon av «Gumbel» variabelen og tilsvarende gjentaksintervaller (T).

SCHADEX-DDD gir litt lavere verdier, og dette er en tendens som også finnes i simuleringresultatene for de fleste andre nedbørfeltene. For SCHADEX-MORDOR var det også mulig å kvantifisere usikkerheten som skyldes kalibrering av den hydrologiske modellen. For 1000-års flommen varierer estimatet fra 108 til 147 m³/s (figur 6.2), men det er også andre usikkerhetskilder (f.eks. tilpasning av nedbørsmodellen) som ikke er tatt med i beregningen. Likevel gir dette et minimumsanslag for usikkerhet som kan brukes om man vil sammenligne SCHADEX estimatet med andre metoder. En fordel med SCHADEX metoden i forhold til enklere hendelsesbaserte metoder er at den gir oversikt over de forskjellige forholdene som kan føre til f.eks. en 1000-års flom i nedbørfeltet (figur 6.3). Det vil si at det ikke er nødvendig å forhåndsbestemme metningsgrad, bidrag fra snøsmelting, risiko-sesong og nedbør-intensitet for simuleringen. Eksempelet som vises i figur 6.3 fremhever også at i de fleste tilfellene er nedbørintensiteten som fører til en 1000-års flom mindre enn 1000-års nedbør-intensiteten (dvs. det er flere 1000 års flommer for 162 mm enn 185 mm).

6.2 SCHADEX metoden for umålte felt

Mulighet for å beregne flomestimer for nedbørfelt uten vannføringsmålinger er en forutsetning for en aktuell, praktisk anvendbar flomberegningsmetode. Den DDD modellen har tidligere blitt regionalisert for bruk i umålte nedbørfelt (Skaugen, m.fl., 2015), og denne regionaliseringen er nå utvidet og oppdatert slik at modellen kan kjøres med nedbør og temperatur inndata fra seNorge v.2 for et vilkårlig nedbørfelt i Norge. En GIS analyse må gjennomføres for å definere avstands-fordelingene som brukes av DDD, men ellers kan alle andre nedbørfeltetegenskapene beregnes i NVEs NEVINA verktøy. Vi har kjørt SCHADEX simuleringer for de 25 nedbørfeltene (figur 6.1) der vi har brukt DDD modellparametere beregnet fra regionaliserte ligninger istedenfor kalibrering. For å sammenligne de kalibrerte modellene med den regionaliserte versjonen av DDD, har vi brukt en enkel poengsum som

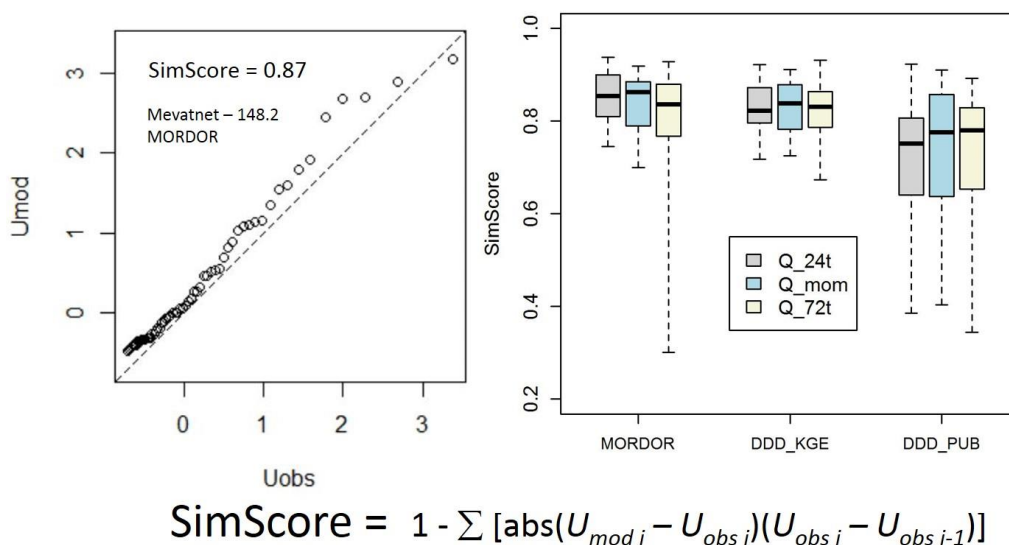


Figur 6.3: Fordelinger av 24-t nedbørintensitet, sesong av forekomst, metningsgrad i nedbørfelt og bidrag av snøsmelting for hendelsene som fører til en 1000-årsflom i Mevatnet (148.2) basert på en SCHADDEX simulering.

kvantifisere hvor godt modellene treffer over-terskel vannføringsverdier med vekt på de høyeste verdiene. Et eksempel for Mevatnet simulert med den kalibrerte MORDOR modellen er vist i figur 6.4 (venstre side). Tallene for alle nedbørfeltene for alle 3 hydrologiske modellen (MORDOR – kalibrerte parametere, DDD_KGE – kalibrerte parametere, og DDD_PUB – regionaliserte parametere) er samlet for hver modell (figur 6.4, høyre side). Tallene er vist for døgn-vannføring (Q_{24t}), momentanvannføring (Q_{mom}), og 72-timers vannføring (Q_{72t}). Sammen-ligningen bekrefter at den kalibrerte versjonen av DDD fungerer nesten så godt som MORDOR (medianverdiene er litt mindre for DDD). Som forventet gir den regionaliserte versjonen av DDD lavere skår og i noen få tilfeller fungerer den ganske dårlig i forhold til de kalibrerte modellene. Likevel er forskjellene mellom metodene for målte felt og umålte felt ikke så store basert på medianverdiene.

6.3 Oppgradering av PQRUT

I tillegg til testing og utvikling av SCHADDEX nedbør-avløpssimuleringsmetoden for bruk i Norge er det også blitt gjort en oppgradering av PQRUT modellen i de siste 4 årene. Dette er i forbindelse med en PhD stipendiat (Valeriya Filipova) ved Høgskolen i Telemark hvor NVE og MET samarbeider i PhD prosjektet. Stipendiaten støttes ikke direkte av FlomQ prosjektet, men prosjektene har blitt kjørt parallelt. PhD prosjektet har sett på andre temaer som også er aktuelle i en diskusjon om retningslinjene for flomberegninger. Først og fremst finnes det en ny kalibrering og regionalisering av PQRUT ligninger (Filipova, m.fl., 2016) med grunnlag i 3-t nedbør- og temperaturdata for hele Norge (Vormoor og Skaugen, 2013) og flere stasjoner med lange tidsserier med vannføringsdata med høytidsoppløsning (55 istedenfor de 22 som ble brukt for den opprinnelige kalibreringen i 1983). Nye metoder for regionalisering er også utviklet. Resultatene og sammenligningene fra arbeidet viser at de



Figur 6.4: Sammenligning av modellene som kan brukes for målte nedbørfelt (MORDOR, DDD_KGE) og umålte nedbørfelt (DDD_PUB). På venstre side er et eksempel på grunnlag for beregning av SimScore for en simulering i et nedbørfelt, der U er den Gumbel variabelen (fig. 2). På høyre er alle SimScore verdiene samlet for de 25 nedbørfeltene for hver modell for døgnvannføring (Q_{24t}), momentanvannføring (Q_{mom}) og 72-timers vannføring (Q_{72t}). Den svarte strekken på hver boksplott viser medianverdien for alle 25 nedbørfeltene.

nye ligningene fører til færre avvikende estimater enn de gamle. PhD stipendiaten jobber også nå med å opprette en stokastisk versjon av PQRUT der sannsynligheten av metning-sgrad, snøsmelting, og nedbørsekvens er tatt hensyn til i hendelsesbasert Monte-Carlo simuleringer med PQRUT modellen. Denne metoden kan kjøres direkte fra seNorge data.

6.4 Anbefalinger

For målte nedbørfelt er SCHADEX metoden blitt testet for 25 nedbørfelt i Norge (figur 6.1), og resultatene viser at det er flere fordeler med metoden i forhold til enklere metoder, bl.a. at den gir et rikt spektrum av resultater som kan sammenlignes med observert vannføring (figur 6.2) og kunnskap om hvordan flomregimet fungerer i et nedbørfelt (figur 6.3). Metoden kreves at hydrologisk modellen kalibreres, og en god kalibrering er avgjørende for å få gode resultater. Metoden er, imidlertid, vesentlig mer komplisert enn den enkle PQRUT metoden fra 1980-tallet. Dersom SCHADEX blir godkjent som en mulig metode for flomberegninger i Norge, må både opplæring om metoden og tilgang på programvare ordnes, og det er flere muligheter for dette. Det kan også nevnes at hvis de nødvendige dataene er på plass (hovedsakelig temperatur, nedbør og vannføringsdata) tar det omtrent 1-2 dager for å opprette og kjøre SCHADEX metoden om man har erfaring med metoden fra før.

For umålte nedbørfelt er SCHADEX metoden med grunnlag i den regionaliserte versjonen av DDD ikke helt klar for bruk som en flomberegningsmetode. De er to ting som må ordnes for å få dette til: 1) mulighet for å ta ut feltparametrene og avstandsfordeling for et gitt nedbørfelt fra f.eks. NEVINA systemet; og 2) tendensen til litt lavere estimater enn andre metoder (figur 8.2) må undersøkes videre. På lengre sikt ser likevel SCHADEX_DDD_PUB ut som en mulig metode som kan erstatte bruk av PQRUT for umålte nedbørfelt.

Mulighet for å ta i bruk den nye kalibreringen av PQRUT bør tas videre av NVE i forbindelse med oppdatering av retningslinjene for flomberegninger.

7 Frekvensanalyse

Kolbjørn Engeland (NVE), Thordis L. Thorarinsdottir (NR), Kristoffer H. Hellton (NR), Erik Holmqvist (NVE), Florian Kobierska (NVE), Lena Schlichting (NVE), Gunnhildur H. Steinbakk (NR), Donna Wilson (NVE)

Flomfrekvensanalyse er en statistisk metode for å estimere størrelsen på en flom med en bestemt sannsynlighet (eller et bestemt gjentaksintervall). Analysen er basert på observerte flomdata, enten analyser av enkeltserier, eller basert på flere sammenliknbare stasjoner, regional flomfrekvensanalyse. En detaljert beskrivelse av dagens metoder for flomfrekvensanalyse i Norge, med relevante referanser finnes i Wilson m.fl. (2011). En sammenlikning av flomfrekvensanalyse i 17 land i Europa finnes i Castellarin m.fl. (2012).

Regional flomfrekvensanalyse er ofte utført i to trinn. I det første trinnet bestemmes indeksflommen Q_M (ofte middelflom eller medianflom). I det andre trinnet bestemmes forholdet Q_T/Q_M hvor Q_T er estimatet av T -års flommen. Dette gjøres ved å anta en bestemt statistisk modell, dvs. frekvensfordelingen, og å estimere parameterne for denne utfra observerte flomhendelser. Et annet alternativ er å bestemme hele fordelingen på en gang ved å estimere Q_M og Q_T/Q_M samtidig.

FlomQ arbeidet innen flomfrekvensanalyse har fokusert på estimeringen av sjeldne flomhendelser basert på observerte årlige maksima av døgnmiddelflommer. Vi har fortatt en systematisk og objektiv sammenligning av forskjellige fordelinger og estimeringsmetoder for lokal flomfrekvensanalyse, sammenlignet usikkerheten fra forskjellige kilder i estimeringsprosessen, vurdert bruk av ikke-systematiserte historiske observasjoner og utviklet en ny modell for regional flomfrekvensanalyse. Nedenfor oppsummerer vi dette arbeidet og diskuterer konklusjonene i forhold til dagens praksis.

7.1 Lokal flomfrekvensanalyse

Innledning

Eksisterende anbefalinger for lokal flomfrekvensanalyse er basert på å bruke årlige maksimalflommer og tilpasse en statistisk fordeling. Deretter kan dimensjonerende flomstørrelser (f.eks. 200- 500- og 1000-års flom) estimeres. Slike estimat er usikre siden vi har et begrenset datagrunnlag, vi kan ha valgt feil statistisk modell, og vi kan ha feil i flommålingene. En viktig effekt av usikkerhet i datagrunnlag er at estimat av dimensjonerende flommer endrer seg etter hvert som flere data blir tilgjengelige. Stabile beregninger av dimensjonerende flommer er derfor ønsket. Usikkerheten kan også føre til at vi kan ha feilvurdert risikoen for flom. Vi ønsker pålitelige beregninger av flomstørrelser.

I eksisterende retningslinjer er pålitelighet og stabilitet for flomestimat tatt hensyn til ved å anbefale ulike tilnærminger avhengig av hvor mye data er tilgjengelig for lokal analyse som vist i Tabell 7.1.

Det finnes flere to- og tre-parameterfordelinger som brukes i praksis (se f.eks. Castellarin m.fl., 2012), og i følge retningslinjene er GEV-fordelingen en mye brukt tre-parameter fordeling mens Gumbel er en mye brukt to-parameter fordeling. En oversikt over ofte brukte fordelinger er gitt i Tabell 7.2.

Det finnes flere metoder som brukes for å tilpasse flomdata til fordelinger, de fire vanligste er moment metoden, l-moment metoden, maximum likelihood og Bayesiansk tilnærming. I hydrologi er l-moment metoden mye brukt siden den gir stabile flomberegninger. Bayesiansk

Tabell 7.1: Anbefalinger fra nåværende retningslinjer (Midttømme m.fl., 2011). Indeks-flommen er indikert ved Q_M og 1000-års flommen ved Q_{1000} .

Antall år	Anbefaling
> 50 år	Q_M beregnes fra observert serie og Q_{1000}/Q_M fra to- eller tre-parameterfordelinger.
30-50 år	Q_M beregnes fra observert serie og Q_{1000}/Q_M fra to-parameterfordelinger.
10-30 år	Q_M beregnes fra observert serie og Q_{1000}/Q_M fra analyse av andre lengre serier i området.
< 10 år	Q_M beregnes ved korrelasjon mot andre serier og/eller fra flomformler i Midttømme m.fl. (2011). Q_{1000}/Q_M beregnes ved analyse av andre lengre serier i området.

Tabell 7.2: Statistiske fordelinger brukt for flomfrekvensanalyse.

Navn	Parametere	Formel
Gumbel	m, α	$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x-m}{\alpha}\right)\right]\right\}$
Generalized extreme value (GEV)	m, α, k	$F(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[1 - k\left(\frac{x-m}{\alpha}\right)\right]^{1/k}\right\} & k \neq 0 \\ \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x-m}{\alpha}\right)\right]\right\} & k = 0 \end{cases}$
Gamma	α, k	$F(x) = \frac{1}{\Gamma(k)} \gamma\left(k, \frac{x}{\alpha}\right)$
Pearson III	m, α, k	$F(x) = \frac{1}{\Gamma(k)} \gamma\left(k, \frac{x-m}{\alpha}\right)$
Generalized logistic (GL)	m, α, k	$F(x) = \begin{cases} \left\{1 + \left[1 - k\left(\frac{x-m}{\alpha}\right)\right]^{1/k}\right\}^{-1} & k \neq 0 \\ \left\{1 + \exp\left[-\left(\frac{x-m}{\alpha}\right)\right]\right\}^{-1} & k = 0 \end{cases}$

tilnærming brukes mye i forskningssammenheng, men er også anbefalt i operasjonell bruk (Ball m.fl. 2016).

I FlomQ ønsket vi å undersøke systematisk hvilken kombinasjon av statistisk fordelingsfunksjon estimeringsmetode som bær anbefales og spesielt undersøke om anbefalinger bør være avhengig av lengde på dataserier.

Metode

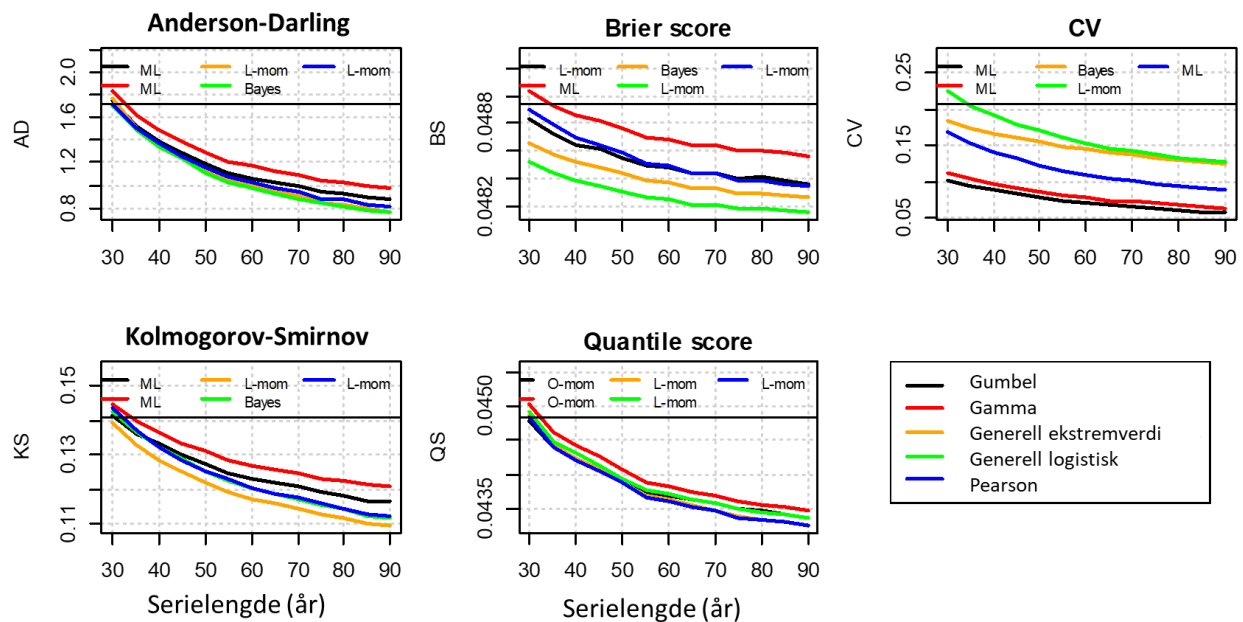
Datsettet består av alle 280 stasjoner med mer enn 30 år med data fra datsettet beskrevet i kapittel 3. Vi brukte en tilnærming basert på bootstrapping for evaluering:

- (i) For hver stasjon
- (ii) For $n = 30, 35, \dots, 90$ år
- (iii) Trekk med tilbakelegging $k = 50$ sett med lengde n
- (iv) Tilpass de fem statistisk fordelingene i Tabell 7.2 til data med fire ulike estimeringsmetoder
- (v) Beregn evalueringskriterier hvor hvert sett og ta gjennomsnittet over de 50 settene
- (vi) Vis evalueringskriteriene som funksjon av n .

For å måle pålitelighet ble test-statistikk for Komogorov-Smirnov og Anderson-Darling testene brukt for å sammenligne foredlinger estimert på de settene som trekkes i (iii) med det opprinnelige flomdatsettet. Begge disse testene måler hvor godt fordelingen passer til data. For å måle mer spesifikt for godt modellene klarer å beregne flomkvantiler, ble Brier- og Quantile score brukt. Disse scorene måler hvor godt en estimert fordeling passer til uavhengige data som ikke ble brukt i estimeringen med fokus på de høye kvantilene i fordelingen. Variasjonskoeffisient for de 50 flomestimatene ble brukt for å beskrive stabilitet.

Resultater og oppsummering

Figur 7.1 oppsummerer resultatene for de ulike evalueringskriteriene som funksjon av lengde på dataserier. Merk at de laveste verdiene viser den beste prestasjonen for de ulike kriteriene. Merk at for hver fordeling vises kun den estimeringsmetoden som gav de beste resultatene. Vi ser at den beste tilpasningen får man for de lengste dataseriene (90 år).



Figur 7.1: Evalueringsskriterier som funksjon av lengde på dataserier. Lave verdier indikerer de beste tilpasningene. For hver fordeling vises resultater for den estimeringsmetoden som gav lavest verdi for evalueringsskriteriene.

Basert på resultatene ser vi at

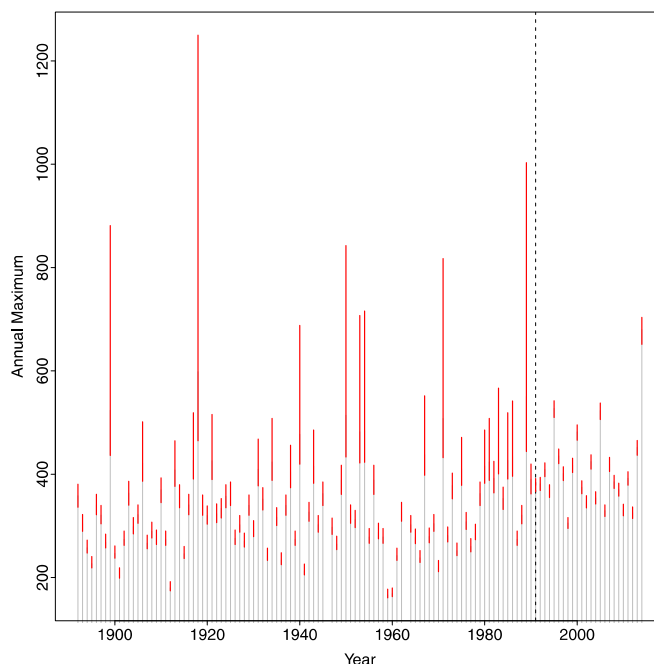
- GEV og GL fordelingene er de mest pålitelige, der GEV er mer stabil enn GL for dataserier kortere enn 60 år.
- L-moment og Bayesiansk metode anbefales for å estimere parametre for alle 3-parameter fordelinger.
- Maksimum-likelihood metoden bør ikke brukes for 3-parameter fordelinger siden resultatene kan bli ustabile.
- Brukes Gumbel-fordelingen, anbefales l-moment metoden foran Bayesiansk metode.
- Det er ingen klar terskel for når man skal gå over fra 2-parameter til 3-parameter fordeling.

Anbefalinger:

- Bruk av Gumbel-fordeling for serier kortere enn 50 år og GEV fordeling for serier lengre enn 50 år (som i dagens retningslinjer).
- Estimer parameter ved bruk av L-moment eller Bayesiansk metode med a priori informasjon (presisering av dagens retningslinjer).

7.2 Usikkerhet fra forskjellige kilder

Usikkerheten i statistisk flomfrekvensanalyse beregnes vanligvis ved å anslå usikkerheten i parameterestimaterne i den valgte statistiske fordelingen. To forskjellige dataserier med observerte flomhendelser som representerer den samme underliggende prosessen vil gi litt forskjellige parameterestimater. Usikkerheten i parameterestimaterne er derfor et mål for usikkerheten i datagrunnlaget. Ved bruk av Bayesianske estimeringsmetoder beregnes denne usikkerheten automatisk da estimeringsprosessen resulterer i estimerte fordelinger for hver parameter. De andre estimeringsmetodene estimerer et verdi for hver parameter og usikkerheten i parameterestimaterne kan da beregnes i etterkant (f. eks. Renard m.fl., 2013).

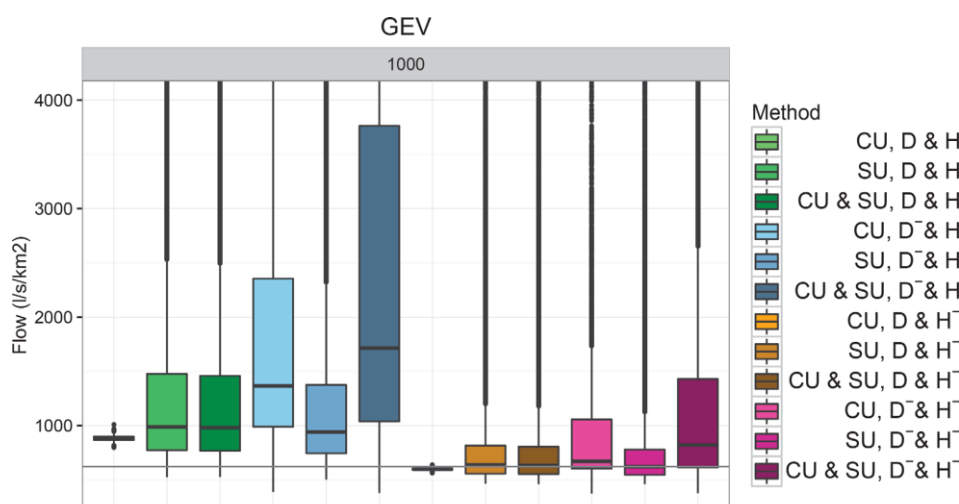


Figur 7.2: Vannføringsserie fra målestasjonen Bulken fra 1892 til 2014. Estimater av årlig maksimum vannføring for døgnmiddelflokker er gitt ved sorte punkter. De røde strekene angir 99.5% usikkerhet i disse estimatene. Endringer i elveprofilen i 1991 har ført til at det estimeres to vannføringskurver, før og etter 1991.

Flomfrekvensanalyse estimerer størrelsen på sjeldne flommer i form av vannføring og vi bruker derfor vannføringsdata som datagrunnlag i estimeringsprosessen. Som diskutert i kapittel 4.1, så måles vannføring ved flom ikke direkte, men estimeres basert på målinger av vannstand i elven. Hvis dette krever ekstrapolering av vannføringskurven kan det være betydelig usikkerhet i disse estimatene, se figur 7.2. Denne usikkerheten er det vanligvis ikke tatt hensyn til i flomfrekvensanalysen.

Vi har undersøkt hvilken betydning de forskjellige usikkerhetskilder har på estimater av dimensjonerende flom ved å vurdere tre forskjellige scenarier (Steinbakk m.fl., 2016):

- Kurveusikkerhet: Vi gjentar estimeringen av den dimensjonerende flommen flere ganger hvor datagrunnlaget (vannføringsdataene) endrer seg hver gang i forhold til den estimerte usikkerheten i vannføringskurven.
- Sampleusikkerhet: Vi bruker et datagrunnlag, men bruker den estimerte usikkerheten i parameterne til den statistiske fordelingen til å estimere usikkerheten i estimatet av den dimensjonerende flommen.
- Vi tar hensyn til både kurve- og sampleusikkerhet og ser på den samlede usikkerheten.



Figur 7.3: Estimerer av 1000-års flommen ved Bulken når vi inkluderer kurveusikkerhet (CU), sampleusikkerhet (SU) eller begge dele (CU & SU). I tillegg undersøkes det forskjeller ved å bruke alle tilgjengelige vannstand-vannføringsdata (D), å ekskludere de tre største vannstand-vannføringsmålingene (D-), å bruke hele vannføringsserien (H), samt å ekskludere den store flommen i 2014 (H-). Det beste estimatet for hver metode vises med et sort strek, de fargete boksene indikerer 50% usikkerhetsintervaller. Størrelsen på den store flommen i 2014 er indikert med en grå linje.

Resultater fra en analyse på Bulken er vist i figur 7.3. Vi har i tillegg undersøkt effekten av å måle vannføringen ved store vannføringer i det at vi har gjentatt øvelsen med en estimert vannføringskurve hvor vi har utlatt de tre største vannførings-målingene. Tilsvarende har vi utført beregningene med og uten den store flommen i 2014.

Resultatene i figur 7.3 demonstrerer de generelle konklusjonene fra studien:

- Sampleusikkerheten er vanligvis den største usikkerhetskilden i estimeringen av dimensjonerende flommer (jf. grønne og brune bokser). Det omvendte gjelder hvis ekstrapoleringsgraden av vannføringskurven er stor (jf. blå og lilla bokser).

- Sampleusikkerheten avtar vanligvis når flere målinger blir tilgjengelig. Det omvendte kan gjelde hvis en ny måling er en sjelden, stor flom (jf. endring fra brune/lilla bokser til grønne/blå bokser).
- Bare noen få vannføringsmålinger ved høy vannstand kan føre til betydelig reduksjon i usikkerheten på vannføringsestimaterne og redusere bias i estimatene på den dimensjonerende flommen. En kombinasjon av en sjelden, stor måling og høy ekstrapoleringsgrad kan føre til overestimering av den dimensjonerende flommen pga. kombinasjonen av to skjeve fordelinger (jf. blå bokser).

7.3 Plotteposisjon og valg av fordeling

Et plot som estimerte flomkvantiler som en funksjon av returperioden sammen med den empiriske fordelingen for flomdataene basert på plottingsposisjoner brukes ofte som et visuelt verktøy for å velge fordelingen som passer best til data. Flere komponenter i dette plottet er usikkert:

- Den estimerte fordelingen bl.a. pga sample-usikkerhet.
- De observerte flomdataene pga usikkerhet i vannføringskurver.
- Plotteposisjon pga sample-usikkerhet.

Plotteposisjon blir brukt for å beregne overskridelsessannsynlighet for flommer. Det finnes flere mulige ligninger for å beregne plotteposisjon. Hvis flommene fra en serie på n år ordnes i synkende rekkefølge, er overskridelsessannsynligheten u_i for flommen q_i med rank i er gitt av en av ligningene i Tabell 7.3. Gjentakintervallet er gitt ved $T_i = 1/u_i$. Vi ser at estimert gjentakintervall for største verdi variere fra $n+1$ år til $2n$ år avhengig av valg av plotteposisjon.

Tabell 7.3: Plotteposisjoner (Stedinger m.fl, 1993).

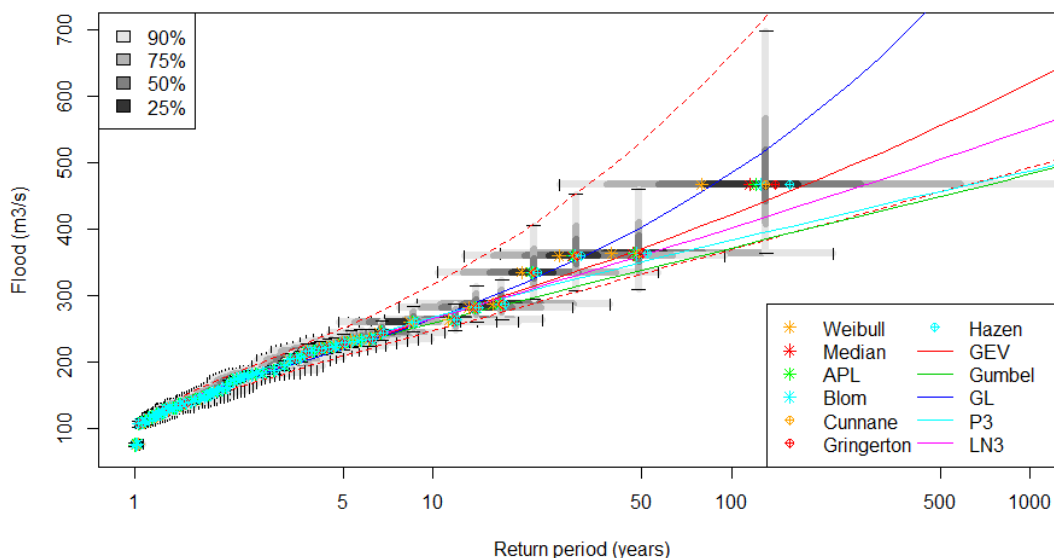
Navn	Ligning	T_{\max}
Weibull	$i / (n+1)$	$n+1$
Median	$(i-0.3175) / (n+0.365)$	$1.47*n+0.5$
APL	$(i-0.35)/n$	$1.54n$
Blom	$(i-3/8)/(n+1/4)$	$1.60n+0.4$
Cunnane	$(i-0.40)/(n+0.2)$	$1.67n+0.3$
Gringerton	$(i-0.44)/(n+0.12)$	$1.79n+0.2$
Hazen	$(i-0.5)/n$	$2n$

Selve plotteposisjonen følger en Beta-fordeling (Stedinger m.fl., 1993):

$$E(U_i) = \frac{i}{n+1}, \text{Var}(U_i) = \frac{i(n-i+1)}{(n+1)^2(n+2)}$$

Dette betyr at gjentakintervallet som tilordnes de observerte flomverdiene er usikkert. I kapittel 7.2 forklares hvordan man kan beregne usikkerhet i flomverdier og i tilpassa fordelinger.

I Figur 7.4 vises flere fordelinger tilpasset flomdata fra Driva der vi har 78 år med data. De liggende grå søylene illustrerer usikkerhet i plotteposisjon mens de vertikale søylene illustrerer usikkerhet i flomverdier. Usikkerhet i estimert fordeling er kun vist for GEV-fordelingen. Figuren illustrerer at hvilken plotteposisjon som brukes, kan avgjøre hvilken fordeling som velges på grunnlag av en visuell sammenligning. I dette eksempelet ser en GL fordeling til å passe best til data hvis Weibull plotteposisisjon brukes, mens en GEV fordeling ser ut til å passe best hvis man bruker Hazens plotteposisisjon. Figur 7.4 synligjør også den store usikkerheten i plotteposisjon for de største flomverdiene når den vises som gjentaksintervall. For Driva med 78 med data er et 50% konfidensintervall fra 57 til 270 år. Selv for lange tidsserier er usikkerheten betydelig. Har man 125 år med data er et 50% intervall fra 91 til 432 år.



Figur 7.4 Fem ulike fordelinger (heltrukne linjer) tilpasset 78 årlige maksimalflommer fra Driva sammen med empiriske fordelinger (punkt) ved bruk av 7 forskjellige plotteposisjoner. Usikkerhet i tilpasset GEV-fordeling er vist i form av stiplede linjer. De liggende grå søylene illustrerer usikkerhet i plotteposisjon mens de vertikale søylene illustrerer usikkerhet i flomverdier.

Anbefalinger

Det bør undersøkes videre hva som kan bli en anbefalt beste praksis for valg av fordeling ved lokal flomfrekvensanalyse. Mulige alternativer er anbefalte standardfordelinger, bruk av objektive statistiske mål for hvor godt ulike fordelinger passer til data og visuell vurdering ved bruk av plotteposisjon

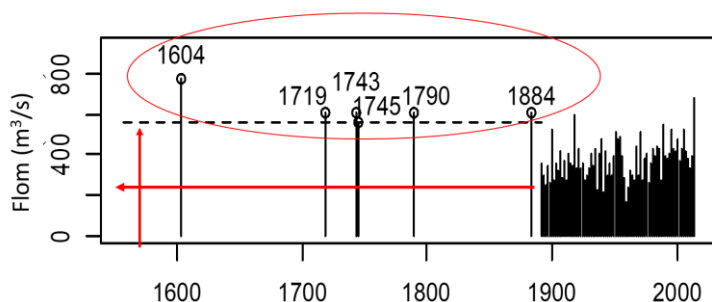
7.4 Bruk av historisk informasjon

For å beregne størrelse på en 200-års flom brukes flom-observasjoner fra vannføringsstasjoner. Ved de fleste målestasjonene har vi færre enn 50 år med observasjoner, og de lengste måleseriene vi har er på 125 år (se kapittel 3). Derfor er en 200- 500- eller 1000-års flom som regel ikke observert. Vi må derfor ekstrapolere flomstørrelser ut over data-grunnet ved å tilpasse en statistisk ekstremverdi-modell til de dataene vi har. Men, på grunn av det begrensede data-materialet er usikkerheten i flomberegninger store (se, for eksempel, kapittel 7.2).

For å øke presisjonen, dvs. redusere usikkerheten og redusere systematiske feil, kan vi bruke informasjon om historiske flommer fra før daglige observasjoner startet. Historisk

informasjon kan være flommer på bruer, bygninger eller fjell som viser hvor høyt vannet har stått. Det kan være beskrivelser av flommer som sier noe om hvor høyt vannet har stått, f.eks. hvilke veier eller gårder som ble oversvømmet. En viktig kilde i Norge er oversikter over naturskader lagret i riksarkivet. Lars A. Roald i NVE har laget en omfattende oversikt over tidligere storflommer oppsummert i boka «Flom i Norge» og i egne rapporter. Kjente storflommer inkluderer Storflaumen på Vestlandet i 1743, Storofsen i 1789 og Storeflaumen 1860, begge på Østlandet.

For å kunne bruke historisk informasjon i ekstremverdianalyser, må vi kjenne til alle flommer som overskrider en høy terskel over en gitt periode (Figur 7.4). Vi kan enten kjenne til størrelsen på flommene over terskelen eller antall flommer over terskelen. I tillegg må størrelsen på terskelen spesifiseres. En ekstra utfordring er å bestemme lengden på den historiske perioden. Slutten på perioden er som regel da systematiske vannføringsmålinger startet, mens starten på perioden er mer usikker. En robust tilnærming er å beregne midlere avstand mellom historiske flommer og legge dette tidsintervallet i forkant av den første historiske flommen.



Figur 7.4: Historiske og direkte observerte flommer ved Bulken.

Tabell 7.4: Flommer i Voss 1604-1884. Merk at i 1865-1870 ble vannstanden i Vangsvatnet senket slik at flomnivåer ble ca 6 fot (1.9 meter) lavere. For flommene før 1860 er vannføringen avrundet til nærmeste 50 m³/s grunnet usikkerhet i både observert vannstand og omregning fra vannstand til vannføring (Holmqvist, 2015).

År	Lokal vannstand (m)	Vannstand (moh)	Vannføring (m ³ /s)	Kommentar (Roald, 2013)
1604	11,2	55,47	900	Avmerket på kirkevegg
1719	9,94	54,21	700	Omtrent som i 1743
1743	9,94	54,21	700	Vann til koret i kirken
1745	9,63	53,90	650	Vann opp i kirken
1790	9,94	54,21	700	Omtrent som i 1743
1864	7,36	51,63	400	Postvei oversvømt
1873	7,36	51,63	600	Postvei oversvømt
1884	8,02	52,29	703	16 tommer høyere enn i 1873

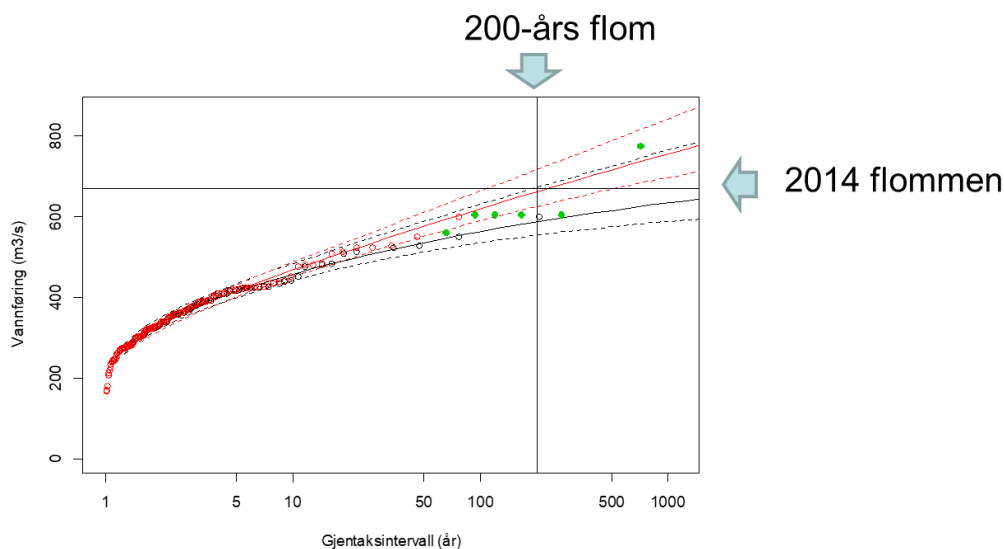
I 2014 ble den største flommen siden målingene startet i 1893 observert på målestasjonen Bulken like ved Voss. I etterkant av flommet har NVE i samarbeid med kommunen, samlet

inn informasjon om historiske flommer og målt inn flomhøyder som vist i tabell 7.4. Vi ser at Voss har opplevd storflommer tidligere, spesielt på 1700-tallet under den lille istiden. Den største flommen kom trolig i 1604. Et merke på kirkeveggen viser hvor høyt vannet stod (figur 7.5). En utfordring ved å bruke denne informasjonen er at utløpet av Vangsvatnet ved Voss ble senket på 1860-tallet. I følge Kanalvæsenet (1888) førte dette arbeidet til at flomnivå ble redusert med opp til 6 fot (1.9 meter). Utløpet av vannet ble igjen modifisert i 1990 for å redusere flomnivå. Denne målestasjonen har derfor 2 vannføringskurver. For å beregne vannføringen for de historiske flommene, brukte vi den eldste vannføringskurven og justerte flomhøydene med 1.9 meter.



Figur 7.5: Flommerke på kirkeveggen i Voss som indikerer hvor høyt vannet stod i 1604. Foto: Jakob Håheim.

Den historiske informasjonen er videre tatt inn i ekstremverdianalyser. I eksempelet fra Voss har vi brukt data til og med 2013 for å beregne gjentakintervallet på 2014-flommen som vist i figur 7.6. Merk at vannføringene i figur 7.6 er døgnmidler, disse vil alltid være noe lavere enn verdiene gitt i tabell 7.3, som er høyeste verdi i løpet av døgnet.



Figur 7.6: Beregninger av 200-års flom ved Voss. Den svarte heltrukne linjen viser flomestimer for Voss basert på observerte vannføringsdata fra 1892-2013, mens den rød heltrukne linjen viser flomestimer hvor også historisk informasjon tilbake til 1604 er inkludert i analysene. De stipla linjene viser et 90% usikkerhetsintervall. De grønne punktene viser historiske flommer.

Vi ser at kun ved bruk av systematiske flomobservasjoner, får 2014-flommen et gjentaksintervall på over 1000 år. Ved å ta inn den historiske informasjonen, får 2014-flommen et gjentaksintervall på ca 200 år. Kanskje kunne Voss ha vært bedre forberedt på 2014-flommen hvis vi hadde brukt historisk informasjon i flomberegninger.

Mer systematiske evaluering av bruk av historisk informasjon er presentert i Engeland m.fl (2018). Der vises det at det har en merverdi å bruke historisk informasjon og at de største forbedringer i flomestimat oppnås når størrelsen på de historiske flommene er kjent og når lengden på systematiske vannføringsobservasjoner er kort. Men selv ved lange dataserier kan historisk informasjon ha stor nytte, som vist i eksempelet fra Bulken/Voss. Man kan også oppnå betydelig forbedring i flomberegninger når kun antall flommer over en terskel er kjent. Da er forbedringen størst når terskelen er relativt høy.

En stor utfordring ved bruk av historisk informasjon er å overføre kunnskap om flomskader, og hendelser til vannhøyder og vannføring. Endringer i elveløp kan gjøre dette mer komplisert. I tillegg vil ikke-stasjonæritet i flommer bli mer synlig jo lengre perioder de historiske flommene dekker.

Basert på disse erfaringene vil NVE nå legge til rette for å ta i bruk historisk flominformasjon i sine analyser og lagre historiske flomstørrelser i HydraII - databasen.

7.5 Regional flomfrekvensanalyse

Innledning

Regional flomfrekvensanalyse er, som den lokale analysen, basert på å bruke årlige maksimalflommer og tilpasse en statistisk ekstremverdifordeling, men utnytter i tillegg klimatologiske, hydrologiske og geografiske kjennetegn til å overføre informasjon mellom de ulike stasjonene i estimeringen av parameterne i fordelingen. Slik kan man beskrive den romlige variasjonen mellom stasjonene som er et resultat av ulikt terreng og klima og estimere flomfordelingen i umålte felt eller for stasjoner med lite data.

Regional flomfrekvensanalyse er ofte basert på estimering av en indeksflom, der man antar at en flomfrekvenskurve er lik over en definert region foruten en stasjon-spesifikk skalering. Indeksflom-metoden baserer seg på (1) identifisering av en homogen region eller gruppe med stasjoner, (2) estimering av indeksflom, og (3) bestemmelse av en vekstkurve som gir skaleringen av en indeksflom til et passende returnnivå. I dette rammeverket er dagens regionale flomfrekvensanalyse, som nå benyttes i Norge, basert på (1) fastsatte geografiske regioner, (2) lineær regresjon av transformerte variabler, og (3) en spesifikk vekstkurve for hver region (Saelthun m.fl., 1997), men metoden kan ikke benyttes til å kvantifisere usikkerheten i regresjonsmodellen eller vekstkurvene. Modellusikkerhet oppstår som en følge av valg av egenskaper brukt i regresjonsanalysen, mens parameterusikkerhet oppstår på grunn av begrenset utvalgsstørrelse og målefeil. Med en Bayesiansk tilnærming kan denne usikkerheten kvantifiseres, samtidig som man sørger for et estimat av flomstørrelser for alle gjentaksintervaller.

Data

Dataene består av årlige maksimalflommer fra 203 målestasjoner fra den norske hydrologiske data-basen Hydra II, med minst 20 års flomobservasjoner etter kvalitetskontroll, se kapittel 3. Videre benyttes geografiske og hydrologiske egenskaper ved tilhørende nedbørs-

felt, temperatur og nedbørsinformasjon som beskrevet i Tabell 7.5. Feltstørrelsen er mellom 50 og 18.110 km² med en median på 274 km². Andel regnbidrag av flommer er estimert ved å beregne andel akkumulert regn og snøsmelting i en fast periode før hver flom og midle over alle flommer (se figur 3.3).

Tabell 7.5: Geografiske, hydrologiske og meteorologiske forklaringsvariabler brukt i den regionale flomfrekvensanalyse.

Egenskap	Forklaring
Breddegrad	(desimalgrader)
Lengdegrad	(desimalgrader)
Effektive sjøprosent	(%)
Andel regnbidrag	Gjennomsnittlig andel regnbidrag til flommer (tall mellom 0 og 1)
Feltstørrelse	Total størrelse av nedbørsfelt, inkludert områder utenfor Norge (km ²)
Årsavrenning	Gjennomsnittlig avrenning per år (mm/år)
Nedbør i april	Gjennomsnitt over perioden 1960-1990 (mm/måned).
Nedbør i august	Gjennomsnitt over perioden 1960-1990 (mm/måned).
Snøsmelting i mars	Gjennomsnitt over perioden 1960-1990 (mm/måned).
Feltgradient	Høydemeterdifferanse mellom 20- og 90-persentilen i hypsografisk kurve til feltet, standardisert ved lengden (km) av nedbørsfeltet (m/km)
Snaufjell	Prosent av snaufjell (%)
Feltbredde	Areal (km ²) av nedbørsfeltet, relativt til lengden av nedbørsfeltet (km).

Modell

Modellen antar at hver årlig maksimalflom følger en GEV-fordeling med tre stasjon-spesifikke parametere (m_s, α_s, k_s) (se kapittel 7.1), som beskriver middelnivå, skalering og form, for hver stasjon s ,

$$F(x; s) = \exp\left\{-\left[1 - k_s \left(\frac{x - m_s}{\alpha_s}\right)\right]^{1/k_s}\right\}.$$

Slik er kvantilen p , eller flomstørrelsen for gjentaksintervallet $1/(1 - p)$, gitt av følgende kvantilfunksjon, den inverse GEV-fordelingsfunksjonen:

$$z_s^p = m_s - \frac{1}{k_s \alpha_s} \{1 - [-\log(p)]^{-k_s}\}.$$

Bayesiansk hierarkisk modell

Hver av de tre parameterne i GEV-fordelingen spesifiseres ved en lineær modell av forklaringsvariablene i et Bayesiansk rammeverk, slik at for eksempel lokasjonsparameteren er gitt ved

$$m_s = \theta_0^m + \theta_1^m f_{s,1} + \dots + \theta_{s,12}^m f_{s,12},$$

hvor $\theta_1^m, \dots, \theta_{12}^m$ er koeffisientene for hver av forklaringsvariablene $f_{1,1}, \dots, f_{s,12}$ gitt i tabell 7.4. Denne lineære modellen antar at variabiliteten i parameterne over de ulike stasjonene er utelukkende gitt av forklaringsvariablene. I praksis vil det oppstå ytterligere forskjeller som ikke kan forklares ut fra tilgjengelige forklaringsvariabler. Derfor innføres det en stasjons-spesifikk tilfeldig effekt som er normalfordelt med en stasjon-spesifikk varians, dvs.

$$m_s = \theta_0^m + \theta_1^m f_{s,1} + \dots + \theta_{s,12}^m f_{s,12} + \tau_s^m, \quad \tau_s^m \sim N(0,1/\sigma^m),$$

med tilsvarende lineære modeller for $\log(\alpha_s)$ og k_s . Modellen beregnes gjennom en Monte Carlo Markovkjede (MCMC) algoritme som genererer et utvalg med 100.000 parameter-sett, som beskriver den fulle fordelingen av estimatene.

Koeffisientene θ_j^m , $\theta_j^{\log(\alpha)}$ og θ_j^k kan estimeres til nøyaktig null for $j = 1, \dots, 12$ slik at den estimerte lineære modellen utelater forklaringsvariabel j , en fremgangsmåte for automatisert modellvalg. Basert på hvor ofte en forklaringsvariabel har koeffisient forskjellig fra null over MCMC-realiseringene kan man kvantisere inklusjonssannsynlighet, og dermed identifisere viktige forklaringsvariabler. Ved å kombinere denne typen modellvalg med en blandingsfordeling får man en implisitt Bayesianisk modellblanding (Bayesian model averaging) siden de resulterende modellene aggregeres i én fordeling. Slik oppnås en ekstremverdifordeling som er mer pålitelig og stabil (robust).

Ved estimering av dimensjonerende flommer ved stasjoner uten observasjoner brukes verdiene av de hydrologiske og geografiske forklaringsvariablene for stasjonen direkte i modellen for å finne den ønskede kvantilen. I tillegg simuleres fra de tilfeldige effektfordelingene for τ_s^m , $\tau_s^{\log(\alpha)}$ og τ_s^k for å ta hensyn til avvik fra den lineære modellen da dette gir bedre estimater. Estimeringsusikkerheten blir her noe større enn hvis data fra stasjonen er tatt med i beregningen da τ_s^m , $\tau_s^{\log(\alpha)}$ og τ_s^k estimeres direkte for alle stasjoner med tilgjengelige data.

Resultater

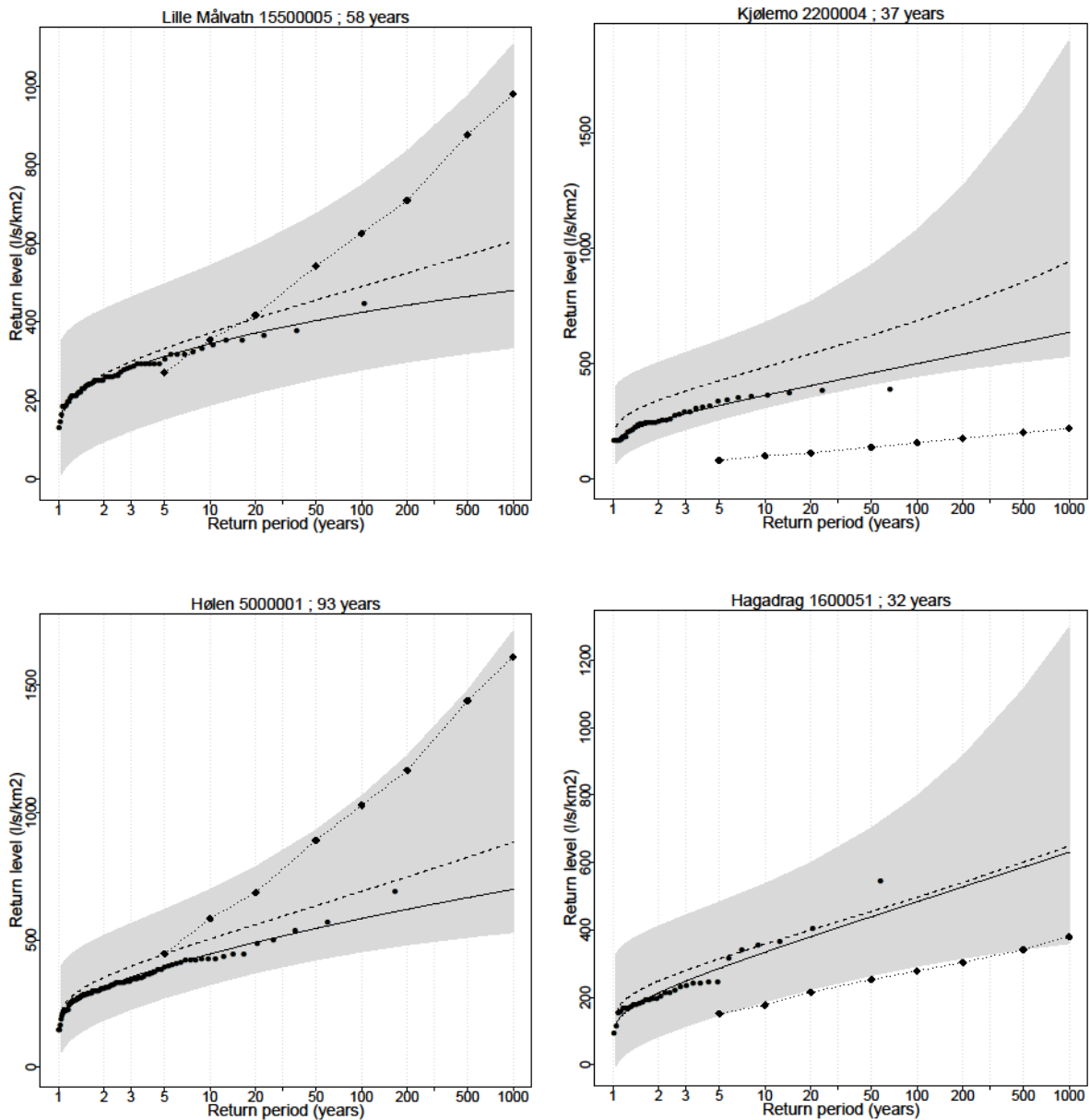
Tabell 7.6 viser inklusjonssannsynlighet (%) over alle MCMC-realiseringene for alle forklaringsvariabler for hver av lokasjons-, skalerings- og formparameteren (m_s , α_s , k_s) i GEV-fordelingen. Den romlige plasseringen av stasjonene, dvs. lengde- og breddegrad, er svært viktig med en tydelig romlig struktur som går langt øst-vest- og nord-syd-aksen. Videre er den effektive sjøprosenten viktig for m_s og α_s da en dominerende sjø i nedbørsfeltet kan dempe middelflornivået og årlige variasjoner. Samtidig er gjennomsnittlig nedbør i april og august viktig, da mer nedbør øker både middelnivået og variabilitet. Relativ nedbørsfeltstørrelse er svært viktig for skaleringen α_s , noe som antyder at «lange» nedbørsfelt (strukket langs lengderetningen) opplever mindre variabilitet på grunn av en dempende effekt. Andel snaufjell og helningsgrad påvirker på andre siden bare middelnivået, da mer berggrunn og brattere gradient øker det gjennomsnittlige flornivået. Sist er formparameteren k_s hovedsakelig forklart av andel regnbidrag, og i noe mindre grad av feltstørrelse, relativ størrelse og årsavrenning. Områder med lavere regnbidrag sammenlignet med snøsmelting vil oftere ha vårflommer som årsmaksima, og disse er i større grad begrenset av en øvre skranke. En slik sammenheng kan forklares av en negativ formparameter.

Tabell 7.6: Inklusjonssannsynlighet (%) for alle forklaringsvariabler for lokasjons-, skalerings- og formparametere.

Forklaringsvariabel	m_s	α_s	k_s
Konstant	100	100	100
Breddegrad	53	99	6
Lengdegrad	84	100	8
Effektive sjøprosent	98	100	2
Årsavrenning	6	11	9
Andel regnbidrag	3	22	58
Feltstørrelse	2	5	12
Nedbør i april	42	75	5
Nedbør i august	100	100	5
Snøsmelting i mars	8	16	4
Feltgradient	45	12	2
Snaufjell	22	8	2
Feltbredde	13	95	11

For å kvantifisere modellens evne til å predikere (out-of-sample) valideringsdata, ble 27 stasjoner utelatt fra modelltilpasningen og predikert etter tur, i en såkalt kryssvalideringsprosedyre. Figur 7.7 viser de estimerte flomstørrelsene mot gjentaksintervall (på log-skala) for fire ulike stasjoner med kort, medium og lang observasjonsserie. Figurene viser at den nye modell gir bedre, og i noen tilfeller svært mye bedre, prediksjoner enn dagens modell brukt i Norge. Videre er det god overenstemmelse mellom den Bayesianske regionale modellen og den lokale modellen. Den lokale modellen er alltid innenfor 80% usikkerhets-intervallet, også når observasjonsserien er lang. Standardverktøy for evaluering av pålitelighet viste at den regionale modellen er velkalibrert for flertallet av de 27 stasjonene, mens noen få blir (svært) over- og underestimert. Boksplokk av gjennomsnittsparemeterverdiene over alle kryssvalidering-iterasjonene viste at modellene er svært stabile; kun estimatene for andel regn og feltstørrelse for formparameteren er noe mindre stabile, se Thorarinsdottir m.fl. (2018) for detaljer.

For å sammenligne den Bayesianske modellen med dagens regionalmodell benyttes Quantile score, som kvantifiserer avviket mellom en realisert observasjon og en prediktiv fordeling for et spesifisert gjentaksintervall. En høyere score betyr et større avvik mellom observasjoner og prediktiv fordeling, slik at en lavest mulig verdi er ønskelig. Tabell 7.7 viser Quantile score for den nye og den gamle regionale modellen for tre gjentaksintervaller og viser at den nye Bayesianske modellen gir en substansielt bedre prediksjon av valideringsdata enn dagens modell.



Figur 7.7: Plot over returnviå for fire stasjoner. Figurene viser de observerte dataene (svarte punkter), medianestimatet for den lokale modellen (svart heltrukken linje), estimatet fra den Bayesianske modellen (stiplet linje) med punktvis 80% kredibilitetsbånd (grått område) og dagens modell (punktvis linje).

Tabell 7.7: Sammenligning av dagens modell (Sælthun m.fl., 1997) og den nye Bayesianske modellen. Gjennomsnittlig Quantile score for ulike returperioder (T år) for 1305 flomobservasjoner på 27 stasjoner med 90% usikkerhetsintervaller basert på bootstrapping. Lave verdier indikerer bedre tilpassing.

	T = 10	T = 50	T = 100
Dagens modell	6.71 [6.23, 7.20]	4.04 [3.63, 4.46]	3.17 [2.80, 3.55]
Bayesiansk modell	2.94 [2.72, 3.17]	1.01 [0.87, 1.17]	0.62 [0.51, 0.75]

Anbefalinger og diskusjon

Basert på resultatene kan de anbefales å ta i bruk en ny regionalmodell for flomestimering i Norge for større felter med areal over 50 km². Den nye Bayesianske modellen er vesentlig mer komplisert enn dagens metode. Dagens metode anvender forholdsvis enkle regresjonsligninger for å estimere indeksflommen; både disse og de tilhørende vekstkurver er angitt i retningslinjene (Midttømme m.fl., 2011). Gitt at en har tilgang til nødvendige hydrologiske og geografiske forklaringsvariabler for en stasjon kan hvilken som helst programvare brukes til å beregne flomestimatene for den stasjonen. For å den Bayesianske modellen kan brukes i praksis må resultatene (MCMC-realiseringene) knyttes til et verktøy (for eksempel NEVINA verktøyet diskutert i kapittel 9) hvor slutt-brukeren kan angi hydrologiske og geografiske forklaringsvariabler og å få ut flomestimatene samt den tilhørende usikkerhet. De underliggende MCMC-realiseringene skal da gjerne oppdateres regelmessig, for eksempel en gang i året når nye årsmaksima blir tilgjengelig.

Den viktigste forklaringsvariabelen for formparameteren er andel regnbidrag til flommer. En presis fastslåelse av denne forklaringsvariabelen krever minst noen få år med observasjoner. Hvis disse ikke er tilgjengelige er det mulig å estimere forklaringsvariabelen utfra meteorologiske informasjon i området. Det er ikke blitt undersøkt i hvor stor grad dette ville føre til presise estimater.

NVE utvikler for tiden en alternativ regionalmodell til den nye metoden beskrevet her. Dette alternativet er basert på indeksflom-metoden og det fortas to separate beregninger, en for å estimere indeksflommen Q_M og en for å fastslå forholdet Q_T/Q_M mellom indeksflommen og høyere gjentaksintervaller. Metodikken bak de individuelle trinnene ligner den beskrevet her. De kan anbefales å vente til de to tilnærmingene kan sammenlignes på ordentlig vis før direkte anbefalinger til endring i dagens praksis angis.

8 Sammenlikning av nedbør-avløps-modeller og frekvensanalyse

Deborah Lawrence (NVE), Thordis L. Thorarinsdottir (NR)

En utfordring med flomberegninger for damsikkerhet er at flomestimer beregnes for tilløpsflom med lange gjentaksintervall, f.eks. 500- og 1000-års tilløpsflommen. Gjentaksintervallet er mye lengre enn lengde på tidsserier med observerte vannføring, så det er ikke mulig å vurdere påliteligheten av en beregningsmetode med hensyn til hvor godt det treffer en 500- og 1000-års vannføring. I praksis er estimer beregnet med statistisk flomfrekvensanalyse derfor ofte sammenliknet med estimer fra PQRUT nedbør-avløpsmetoden. Vi bruker også denne tilnærmingen her for å vise noen forskjeller mellom metodene som brukes per i dag og metodene utviklet i løpet av FlomQ prosjektet med fokus på metoder for umålte nedbørfelt. De nye nedbør-avløpsmetoder ble testet på 25 felt (se kapittel 6.1) og den nye regionale flomfrekvensmodellen ble testet på 27 felt (se kapittel 7.4). 18 av disse feltene er de samme. Metodene sammenlignes her ved å se på estimer fra de 18 nedbørsfeltene.

Nedbør-avløpsmetoder

Estimer for 1000-års døgnvannføring var beregnet for 18 av de 25 nedbørfeltene vist i figur 6.1 med to nedbør-avløpsmetoder: 1) PQRUT med en 1000-års arealnedbørssekvens beregnet av MET (Engen-Skaugen og Førland, 2011) fra grid-basert seNorge data for perioden 1957-2008 med bruk av metoden beskrevet i Alfnes (2007); og 2) SCHADEx-DDD-PUB med grunnlag i seNorge data for nedbør og temperatur (for perioden 1985-2014) og med bruk av metodene beskrevet i kapittel 6.2. I begge tilfeller ble nedbørfeltene behandlet som umålte, dvs. at regionaliserte ligninger, istedenfor en lokal til-passet kalibrering, var brukt for å fastsette modellparametere. Avhengig av risikosesong for ekstremvannføring for nedbørfeltet, ble et bidrag fra snøsmelting også lagt til nedbørførløpet for PQRUT basert på anbefalingene gitt i Midttømme m.fl., 2011.

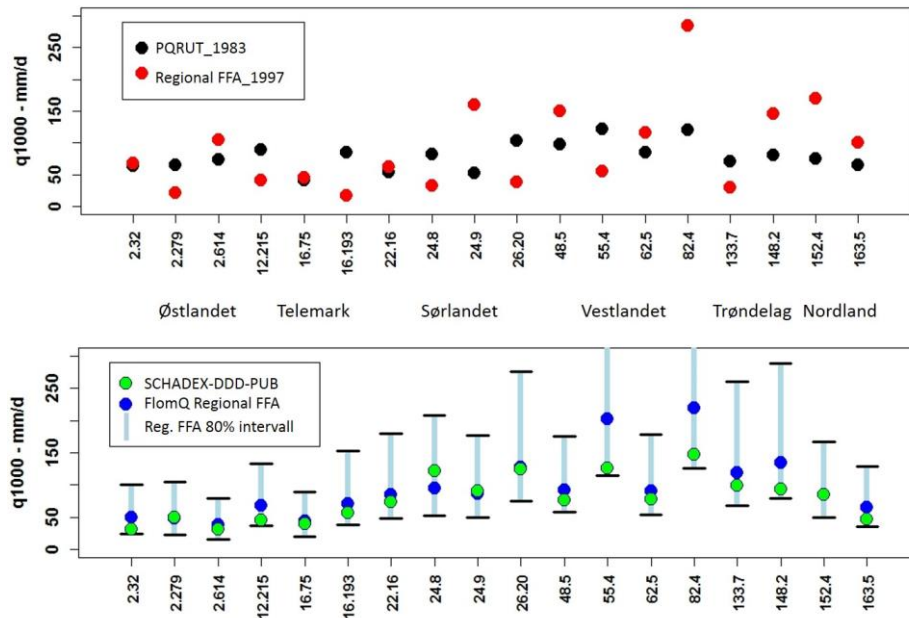
Statistiske metoder for flomfrekvensanalyse

Estimer for de samme 18 nedbørsfeltene ble beregnet med regional flomfrekvensanalyse på to forskjellige måter: 1) Basert på den regionale modellen utviklet av Saelthun m.fl. (1997) ved bruk av formlene beskrevet i Midttømme m.fl. (2011); og 2) ifølge den nye Bayesianske modellen beskrevet i kapittel 7.4 hvor data fra det ene nedbørfeltet var utelatt fra data-grunnlaget for hvert estimat. Kartet som beskriver inndeling i flomregioner for dagens modell (figur 5.4 i Midttømme m.fl., 2011) er blitt digitalisert for å automatisere tildelingen av regioner under denne modellen.

Sammenlikning av metoder

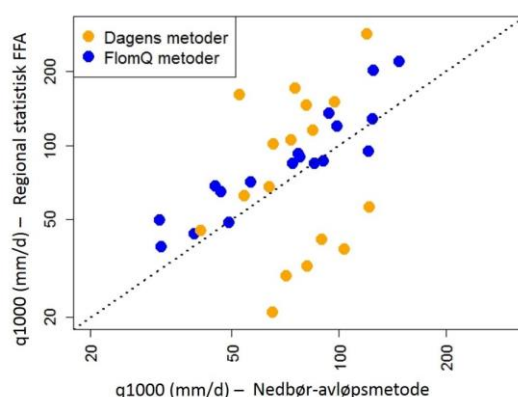
Figur 8.1 viser estimer for 1000-års døgnavrenning (mm/d) beregnet med de 4 metodene beskrevet ovenfor. Estimaterne beregnet med dagens metoder, PQRUT med kalibreringen fra 1983 og de regionale ligningene fra 1997, er sammenliknet i den øvre figuren, og estimatene beregnet med metodene utviklet i FlomQ, SCHADEx kjørt med DDD modellen for umålte nedbørfelt (PUB) og de nye regionale ligningene er vist i den nedre. I 4 av 6 tilfeller gir PQRUT høyere estimer enn de regionale ligningene (1997) i området Østlandet/Telemark. I andre deler av landet gir de to metodene også ulike resultater, og det er en tendens for større

variasjoner i resultatene fra de regionale ligningene enn fra PQRUT modellen. For de FlomQ metodene, gir både nedbør-avløpsmetoden SCHADEX-DDD-PUB og de nye regionale ligningene like resultater i 15/16 av 18 nedbørfelt. I alle tilfeller ligger SCHADEX-DDD-PUB estimatet innenfor det 80% konfidensintervallet for estimatet beregnet med de regionale ligningene utviklet i FlomQ prosjektet.



Figur 8.1: Estimatere for 1000-års døgnavrenning (mm/d) med bruk av PQRUT (1983) og de regionale ligningene (1997) i den øvre figuren og med bruk av metodene utviklet i FlomQ i den nedre figuren.

De samme estimatene er vist i figur 8.2 der estimatet beregnet fra nedbør-avløpsmetoden (x-akse) er plottet mot estimatet beregnet fra regionale ligninger (y-akse). Hvis det er en perfekt overensstemmelse mellom de to metodene vil punktet ligge på den 1:1 stiplede linjen. Overalt ligger punktene for metodene utviklet i FlomQ nærmere den 1:1 linjen enn punktene som representerer dagens metoder. Figuren viser også at SCHADEX-DDD-PUB gir litt lavere estimater enn regionalformelen i de fleste tilfellene.



Figur 8.2: Samsvaret mellom estimatene for 1000-års døgnavrenning beregnet med metodene som brukes i praksis per i dag (gule punkter) og metodene utviklet i FlomQ prosjektet (blå punkter).

9 NEVINA

Kolbjørn Engeland (NVE), Thomas Væringstad (NVE), Astrid Voksø (NVE), Nils Kristian Orthe (NVE)

For å sikre at resultater fra forskningsprosjekter blir til nytte for sluttbrukere, er implementering i effektive, robuste og brukervennlige verktøy en løsning. Slike verktøy er også en viktig kanal for formidling av forskningsresultater. For FlomQ-prosjektet er NEVINA et av verktøyene der resultater implementeres.

NEVINA (Nedbørfelt-Vannføring-INdeks-Analyse) er et interaktivt kartbasert verktøy der brukeren får beregnet oppstrøms nedbørfelt for et selvvalgt punkt i et elvenett. Deretter bregner NEVINA en rekke klimatiske og fysiografiske parametere for det valgte nedbørfeltet. Basert på denne informasjonen, brukes statistiske modeller for å estimere flere vannførings-indeksler.

Forløperen til NEVINA er lavvannskartet for Norge (Engeland et al., 2008) der målet var å gi estimater for lavvannsindeksler i umålte felt. Resultatene ble implementert i et nettbasert verktøy tilgjengelig for publikum. Dette verktøyet har vært populært blant sluttbrukere siden det var effektivt, brukervennlig og gav nødvendig informasjon. For flere prosjekter relatert til beregning av dimensjonerende flommer (ExPrecFlood og Flomkart, i tillegg til FlomQ) så man at lavvannskartet kunne utvides til å estimere dimensjonerende flom i umålte felt. Navnet ble derfor endret til NEVINA (Nedbørfelt-Vannføring-Indeks-Analyse) i 2015. Samtidig ble regionale formler momentanfommer i små felt (resultater NIFS-prosjektet, Glad et al., 2014) lagt inn i NEVINA.

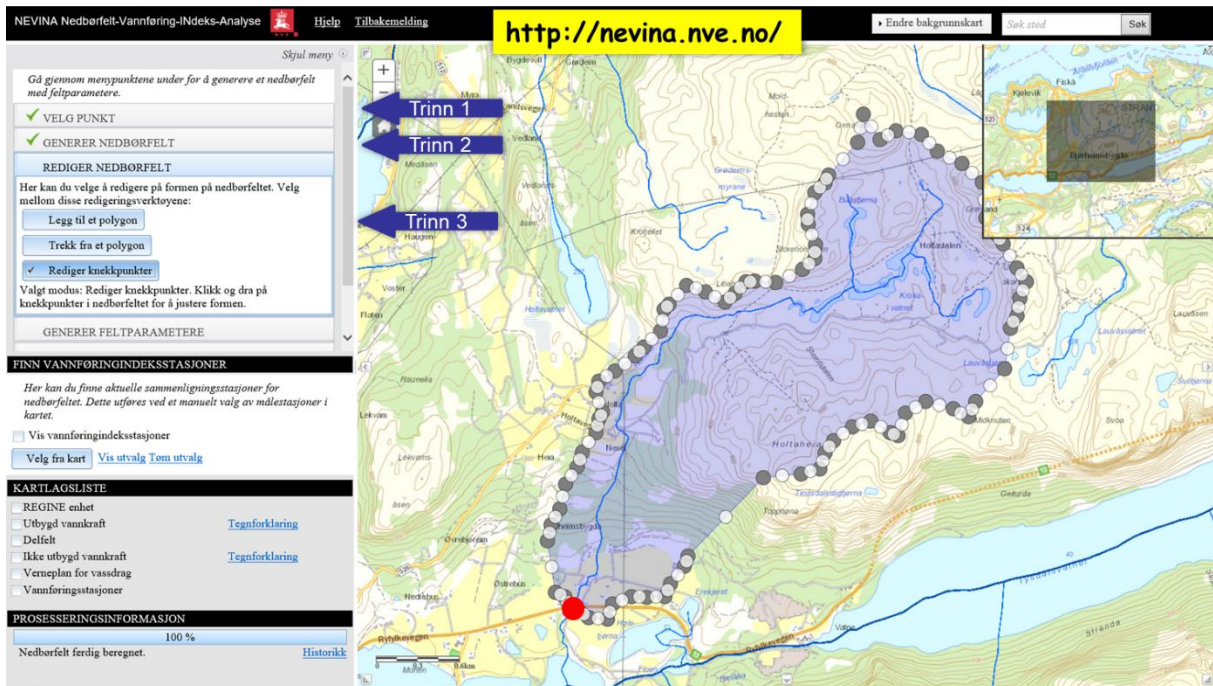
En viktig utfordring ved bruk av NEVINA er at det kan være feil i de underliggende dataene eller at den statistiske modellen som brukes til estimering kan gi systematiske feil. Brukere blir derfor bedt om å gi tilbakemelding om åpenbare feil. Det er også mulig å endre på mye av informasjonen som genereres automatisk. NEVINA egner seg godt for foreløpige vurderinger av mulige tiltak. For mer detaljert planlegging av et foreslått tiltak, må estimater fra NEVINA suppleres med en profesjonell hydrologisk vurdering. Omfanget av en slik vurdering avhenger av tiltakets art.

9.1 Kort brukerveiledning

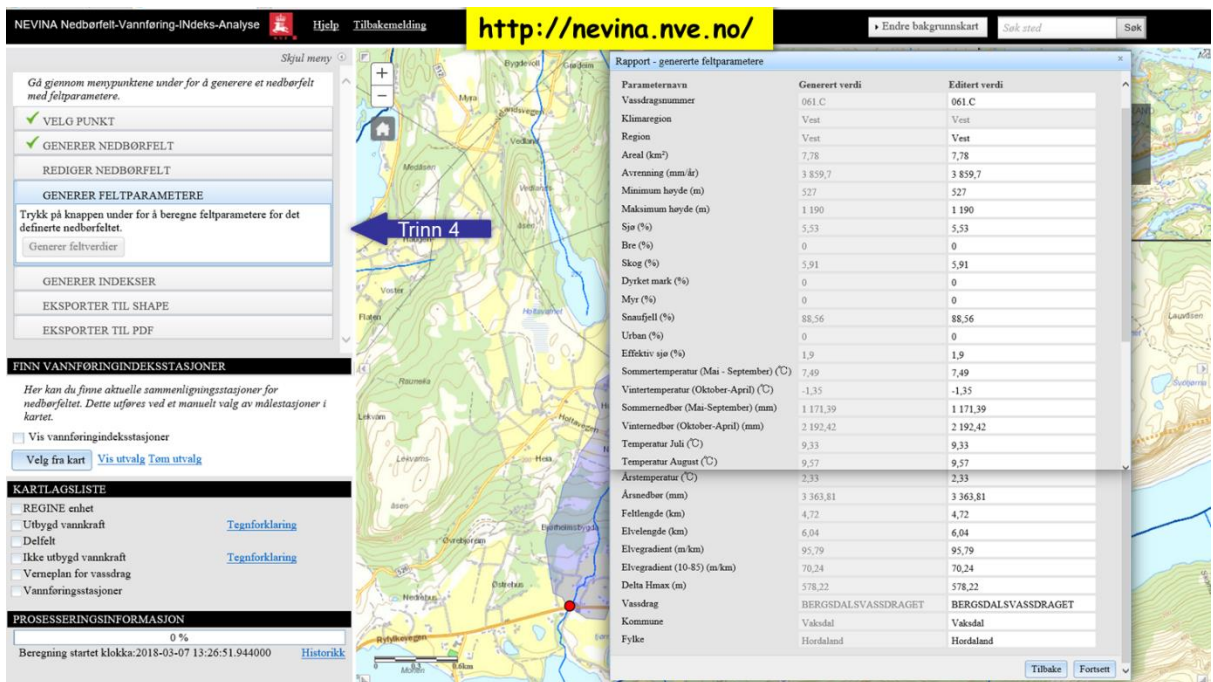
NEVINA ligger på <http://nevina.nve.no>. Når NEVINA er åpnet, må brukeren zoome inn på kartet til en skala som er tilstrekkelig for å se elvenettverket i området av interesse. Deretter følger brukeren menyen til venstre ved å starte på toppen. Det første trinnet er å velge et punkt i et elvenettverk ("VELG PUNKT"). Punktet bør ikke være mer enn 100 meter fra et elvesegment og det må være mer enn 100 meter fra en et elvekryss eller utløp. Oppstrøms nedbørfelt genereres deretter ved å kjøre "GENERER NEDBØRFELT". I tredje trinnet ("REDIGER NEDBØRFELT") kan nedbørfeltgrensene redigeres dersom det oppdages feil i de automatisk genererte grensene (figur 9.1).

Det fjerde trinnet er å generere feltparametre. Flere av parametrene kan redigeres av brukeren hvis det oppdages feil (figur 9.2). Det femte trinnet er å generere indeksene, inkludert estimat av dimensjonerende flom. I det sjette trinnet kan resultatene eksporteres enten som en pdf-rapport eller til en shape-fil (figur 9.3). Flomestimer og/eller lavvannsindeksler fra nærliggende målestasjoner kan også hentes ut fra NEVINA som

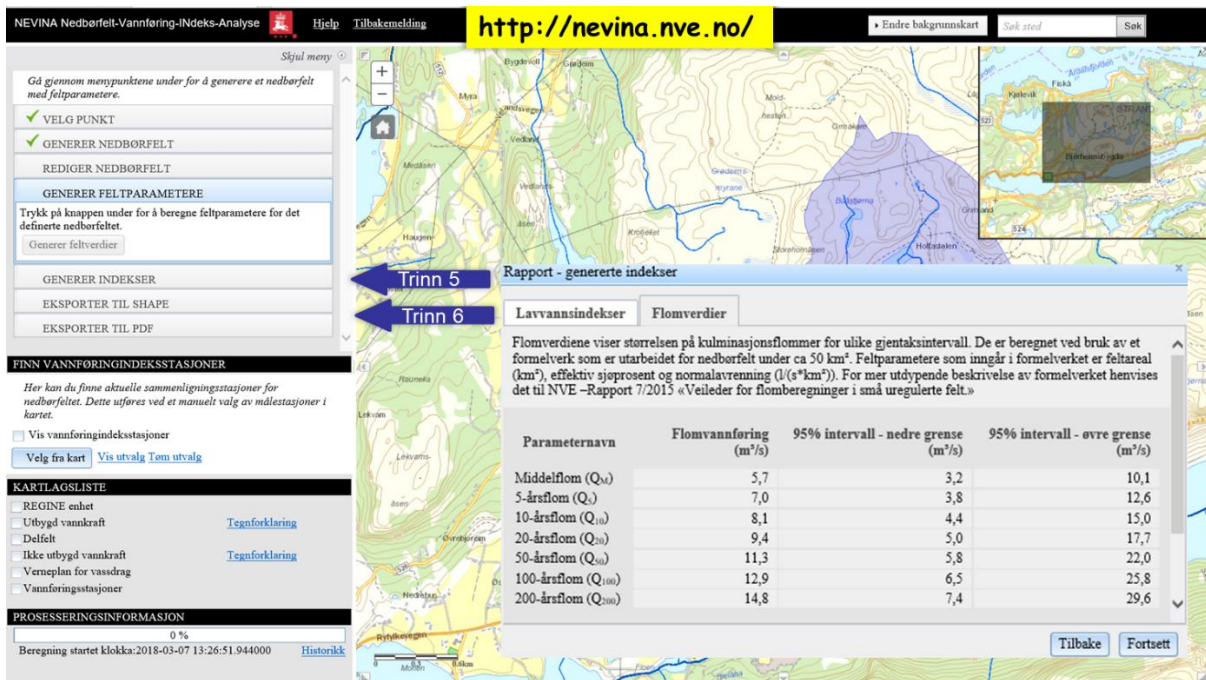
illustrert på figur 9.4. Da kan brukeren sammenligne den estimerte dimensjonerende flommene fra den regionale modellen med estimater basert på lokal flomfrekvensanalyse.



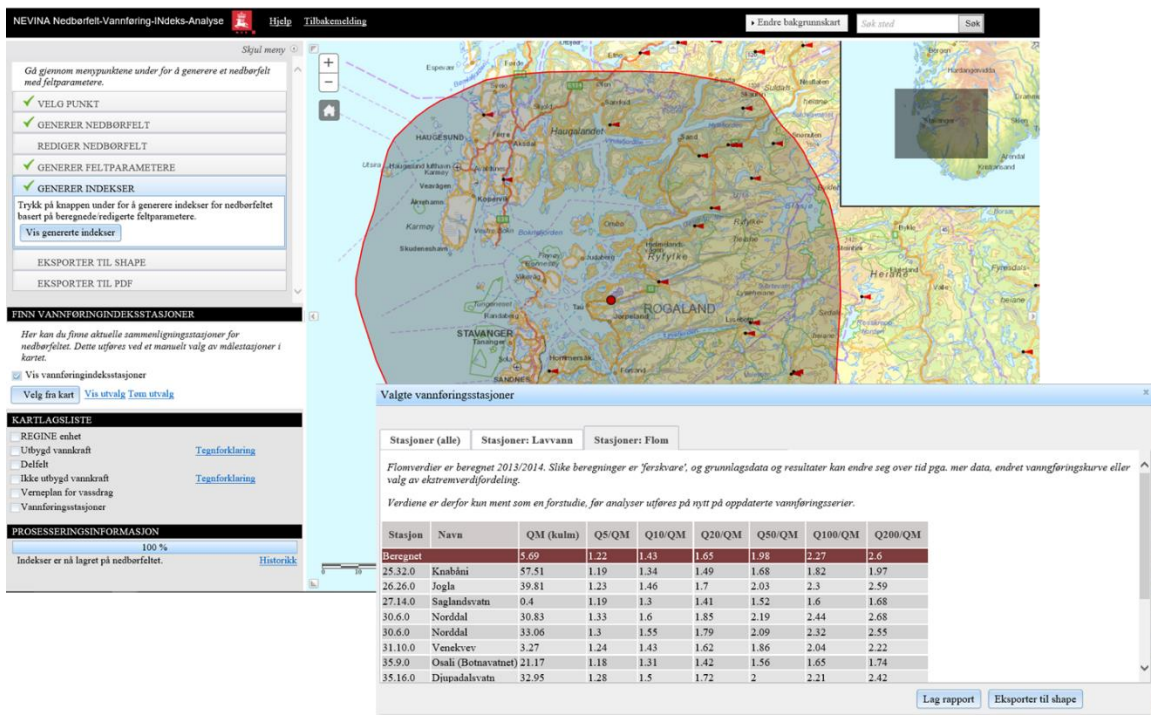
Figur 9.1: De første trinnene er å velge et punkt i en elv, generere grenser for oppstrøms nedbørsfelt, og hvis nødvendig endre på feltgrensene.



Figur 9.2: Det fjerde trinnet er å generere feltparametere. Flere av disse kan bli endret av brukeren.



Figur 9.3: Det femte trinnet er å generere vannføringsindekser, både lavvannsindekser og flomverdier. I det sjette trinnet eksporteres resultatene til en pdf og/eller shape-fil.



Figur 9.4: Data fra nærliggende vannføringsstasjoner kan bli hentet ut for å vise lavvannsindekser og lokalt beregnede flomverdier.

PDF-rapporten fra NEVINA gir også anbefalte verdier for en klimafaktor som kan brukes for å vurdere fremtidige virkninger av klimaendringer på dimensjonerende flommer. Disse faktorene er for tiden kun gitt for nedbørfelt med areal <50 km². De anbefalte faktorene for små nedbørfelt er 1,2 for døgnmiddelflommen og 1,4 for momentanflommen. Den første av disse er basert på resultatene og anbefalinger for vurdering av klimaendringer på fremtidig flom i Norge utgitt av NVE (Lawrence and Hisdal, 2011; Lawrence, 2016) hvor bruk av en

klimafaktor på minst 20% anbefales for små nedbørfelt. Se egen rapport fra ExcPrecFlood-prosjektet for flere detaljer (Sorteberg m.fl., 2018).

9.2 Data og algoritmer

Avgrensning av oppstrøms nedbørfelt

Beregningen av oppstrøms nedbørfelt er basert på følgende GIS-datasett som dekker hele Norge og, om nødvendig, delfelt som drenerer inn i Norge fra Sverige eller Finland.

- Dreneringsretning og oppstrøms areal (flow accumulation) med en romlig oppløsning på 25 meter. Griddene er beregnet ved NVE basert på en DTM fra Statens kartverk og et kart over elvenett som senker gridcellene krysset av et elvesegment med 30 meter.
- REGINE - polygoner med grenser for ca 30.000 delfelt i Norge, inkludert delfelt som drenerer til Norge fra nabolandene.
- Elvenett - et geometrisk nettverk av elvesegmenter, inkludert strømningsretning. For innsjøer brukes midtlinjer som elvesegmenter.

Punktet valgt av brukeren må være maksimalt 100 meter fra et elvesegment og mer enn 100 meter fra et elvekryss eller utløp. Dreneringsretnings-griddet brukes til å avgrense oppstrøms nedbørsfelt opp til nærmeste delfelt definert i REGINE datasettet.

Beregning av feltparametre

Følgende datasett brukes til å beregne feltparametre

- DTM25 for beregning av hypsografisk kurve og høydeforskjeller.
- Digitale data fra kart på 1:50.000 som brukes til å beregne prosenter av arealdekning.
- Elvenett for beregning av elvelengde og gradienter.
- Griddet datasett (1x1 km²) av klimatologi for perioden 1961-1990 for beregning av nedbør, temperatur og avgangstatistikk.

Beregning av dimensjonerende flom

Beregningen av dimensjonerende flommer er basert på i Glad et al. (2014). Det blir benyttes en indeksflom-tilnærming der en regresjonsligning brukes for å estimere middelflom (brukt som indeksflom) og vekstkurven beregnes basert på feltparametre. 95% troverdighetsintervaller er også gitt. Ligningene ble estimert ved å bruke momentanflommer fra 165 stasjoner med oppstrøms feltareal mindre enn 50 km².

9.3 Planlagte utvidelser av NEVINA

Innen 2018 er følgende utvidelser av NEVINA planlagt for å implementere resultater fra FlomQ og ExPrecFlood:

- Nye feltparametre. Spesielt vil klimatologien beregnes fra SeNorge datasettet versjon 2.1.
- Nye algoritmer for å estimere dimensjonerende flommer i umålte felt ved å implementere resultater fra FlomQ / Flomkart.
- Nye algoritmer for estimering av klimafaktorer i umålte felt.
- Nye ensides skreddersydde rapporter.
- En dynamisk kobling til den hydrologiske databasen for å hente ut beregnede flomstørrelser ved målestasjoner.

Referanser

- Alfnes, E. (2007): Ekstremnedbør beregnet fra serier med gridbasert arealnedbør. Met.no report (Climate) no. 1/2007, 21 s.
- Andersson, A. G., Andreasson, P., Staffan Lundström, T. (2014): CFD-Modelling and Validation of Free Surface Flow During Spilling of Reservoir in Down-Scale Model. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 7, 159-167.
- Azdin, M. C., Emiroglu, M. E. (2013): Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Measurement and Instrumentation*, 29, 1-8.
- Azdin, M. C., Öztürk, M., Yücel, A. (2015): Experimental and numerical investigation of self-priming siphon side weir on a straight open channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 45, 140-150.
- Ball J., Babister M., Nathan R., Weeks W., Weinmann E., Retallick M., Testoni I.(eds) (2016): Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation, © Commonwealth of Australia (Geoscience Australia).
- Benedict, I., Ødemark, K., Moore, R., Nipen, T. (2018): Large-scale dynamics inducing atmospheric rivers and extreme precipitation over Norway, submitted to *Mon. Wea. Rev.*
- Bengtsson, L., Andrae, U., Aspelien, T., Batrak, Y., Calvo, J., De Rooy, W., Gleeson, E., Hansen-Sass, B., Homleid, M., Hortal, M., Ivarsson, K-I., Lenderink, G., Niemelä, S., Nielsen, K. P., Onvlee, J., Rontu, L., Samuelsson, P., Santos Muñoz, D., Subias, A., Tijn, S., Toll, V., Yang, X., Køltzow, M.Ø. (2017): The HARMONIE-AROME Model Configuration in the ALADIN-HIRLAM, NWP System, *Mon. Wea. Rev.*, 145, 1919-1935, DOI: 10.1175/MWR-D-16-0417.1
- Blanchet, J., Touati, J., Lawrence, D., Garavaglia, F., Paquet, E. (2015): Evaluation of a compound distribution based on weather pattern subsampling for extreme rainfall in Norway. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 2653-2667.
- Brigode, P., Bernardara, P., Paquet, E., Gailhard, J., Garavaglia, R., Merz, R., Micovic, Z., Lawrence, D. & Ribstein, P. (2014): Sensitivity analysis of SCHADEX extreme flood estimations to observed hydrometeorological variability. *Water Resour. Res.*, 50, 353-370.
- Castellarin A., Kohnová S., Gaál L., Fleig A., Salinas J. L., Toumazis A., Kjeldsen T. R., Macdonald N. (2012): European Procedures for Flood Frequency Estimation: Review of Applied-Statistical Methods For Flood-Frequency Analysis in Europe. NERC/Centre for Ecology and Hydrology, Lancaster, UK. ISBN: 978-1-906698-32-4.
- Chanel, P. G. & Doering, J. C. (2008): Assessment of spillway modeling using computational fluid dynamics. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35, 1481-1485.
- Coles, S.G. (2001): *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer Series in Statistics. London: Springer-Verlag.
- Dargahi, B. (2006): Experimental study and 3D numerical simulations for a free-overflow spillway. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 132, 899-907.
- Di Baldassarre, G. & Claps, P. 2010. A hydraulic study on the applicability of flood rating curves. *Hydrology Research*, 42, 10.
- Di Baldassarre, G., Laio, F. & Montanari, A. (2012): Effect of observation errors on the uncertainty of design floods. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 42-44, 85-90.
- Di Baldassarre, G. & Montanari, A. (2009): Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 913-921.
- Domenghetti, A., Castellarin, A. & Brath, A. (2012): Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 1191-1202.
- Dyrddal, A.V., Skaugen, T., Stordal, F., Førland, E.J. (2016): Estimating extreme areal precipitation in Norway from a gridded dataset, *Hydrological Sciences Journal*, 61:3, 483-494.
- Engeland, K., Hisdal, H., Orthe, N.K. Petersen-Øverleir, A. Voksø, A. (2008): Low flow map for Norway (in Norwegian: Lavvannskart for Norge), NVE oppdragsrapport A No. 5/2008, 60 s.
- Engen-Skaugen, T. & Førland, E. (2011): Future changes in extreme precipitation estimated in Norwegian catchments. Met.no report (Climate) no.13/2011, 28 s.
- Feurich, R., Olsen, N. R. B. (2014): Finding Free Surface of Supercritical Flows - Numerical Investigation. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 6, 307-315
- Filipova, V., Lawrence, D. & Klempe, H. (2016): Regionalisation of the parameters of the rainfall-runoff model PQRUT. *Hydro. Res.*, 47(4), 748-766.
- Fleit, G., Bihs, H. & Baranya, S. (2017): CFD Modeling of Varied Flow Conditions Over an Ogee-Weir. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*.
- Førland E. J. (1992). Manual for beregning av påregnelige ekstreme nedbørverdier, DNMI Rapport 21/92 Klima
- Garavaglia, F., Gailhard, J., Paquet, E., Lang, M., Garçon, R. & Bernardara, P. (2010): Introducing a rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 951-964.
- Garavaglia, F., Lang, M., Paquet, E., Gailhard, J., Garçon, R. & Renard, B. (2011): Reliability and robustness of rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 519-532.
- Gessler, D. (2005): CFD Modeling of Spillway Performance. *World Water and Environmental Resources Congress 2005*. American Society of Civil Engineers.
- Glad, P., Reitan, T. and Stenius, S. (2014): Regional equations for flood estimation in small catchments (in Norwegian: Regionalt formelverk for flomberegninger i små nedbørfelt), NVE Rapport 62/2014, 52 s.

- Gumus, V., Simsek, O., Soydan, N. G., Akoy, M. S., Kirkgoz, M. S. (2016): Numerical modeling of submerged hydraulic jump from a sluice gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142.
- Hanssen-Bauer, I., E. J. Førland, I. Haddeland, H. Hisdal, S. Mayer, A. Nesje, J. E. Ø, Sandven, A. B. Sandø, A. Sorteberg, B. Ådlandsvik (eds.) (2015): Klima i Norge 2100: Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015, Norwegian Climate Services Centre Report 2/2015.
- Herschy, R. W. (2009): *Streamflow measurement, third ed.*, New York, NY, USA, Taylor & Francis.
- Jansson, A. Tveito, O.E., Pirinen, P., Scharling, M. (2007): NORDGRID -a preliminary investigation on the potential for creation of a joint Nordic gridded climate dataset, met.no report 03/2007-Climate.
- Johnson, M. C. & Savage, B. M. (2006): Physical and numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence of tailwater. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 132, 1353-1357.
- Kirkgoz, M. S., Akoz, M. S., Oner, A. A. (2008): Experimental and theoretical analyses of two-dimensional flows upstream of broad-crested weirs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35, 975-986.
- Kuczera, G. (1996): Correlated rating curve error in flood frequency inference. *Water Resources Research*, 32, 2119-2127.
- Lang, M., Pobanz, K., Renard, B., Renouf, E. & Sauquet, E. (2010): Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 55, 883-898.
- Lawrence, D. (2016): Klimaendring og framtidige flommer i Norge, NVE Rapport 81/2016.
- Lawrence, D., Hisdal, H. (2011): Hydrological projections for floods in Norway under a future climate, NVE Report 5/2011.
- Lawrence, D., Paquet, E., Gailhard, J. & Fleig, A.K. (2014): Stochastic semi-continuous simulation for extreme flood estimation in catchments with combined rainfall-snowmelt flood regimes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1283-1298.
- Lundquist, D. (2013): Bladet fra munnen: Retningslinjer for subjektivt skjønn? *Vann*, 3-2013, 313-314.
- Lussana, C., Saloranta, T., Skaugen, T., Magnusson, J., Tveito, O. E., and Andersen, J. (2018): seNorge2 daily precipitation, an observational gridded dataset over Norway from 1957 to the present day, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 235-249.
- Midttømme, G.H., Pettersson, L.E., Holmqvist, E., Nøtsund, Ø., Hisdal, H. & Sivertsgård, R. (2011): Retningslinjer for flomberegninger, Retningslinjer nr. 4/2011, NVE, 59 s.
- Moyeed, R. A. & Clarke, R. T. (2005): The use of Bayesian methods for fitting rating curves, with case studies. *Advances in Water Resources*, 28, 807-818.
- Norum, D.T., Gundersen, S., Midttømme, G.H. & Østvold, H.M. (2014): Veileder for klassifisering av vassdragsanlegg. Veileder nr. 3/2014, NVE, 42 s.
- Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A. & Reeve, D. E. (2010): *Hydraulic modelling - an introduction*, London, New York, Spon Press.
- Ohara, N., Kavvas, M. L., Kure, S., Chen, Z. Q., Jang, S., Tan, E. (2011): Physically Based Estimation of Maximum Precipitation over American River Watershed, California, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 16, No. 4, 351-361.
- Olsen, N. R. B. (2015): Numerisk modellering av kapasitet på flomløp - et litteraturstudium. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology.
- Olsen, N. R. B. & Kjellsvig, H. M. (1998): Three-dimensional numerical flow modelling for estimation of spillway capacity. *Journal of Hydraulic Research*, 36, 775-784.
- Pathiraga, S., Westra, S. & Sharma, A. (2012): Why continuous simulation? The role of antecedent moisture in design flood estimation. *Water Resource Research* 48, W06534.
- Paquet, E., Garavaglia, F., Garçon, R. & Gailhard, J. (2013): The SCHADDEX method: a semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation. *Journal of Hydrology(495)*, 23-37.
- Pedersen, Ø., Aberle, J. & Rüther, N. (2018a): Hydraulic scale modelling of the rating curve for a gauging station with natural control.
- Pedersen, Ø., Fleit, G., Pummer, E., Tullis, B. P. & Rüther, N. (2018b): Reynolds-Averaged Navier-Stokes Modeling of Submerged Ogee Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144, 04017059.
- Pedersen, Ø. & Rüther, N. (2016a): Hybrid Modeling of a Gauging Station Rating Curve. *Procedia Engineering*, 154, 433-440.
- Pedersen, Ø. & Rüther, N. (2016b): Numerical modeling of submerged flow over ogee-weirs. River Flow - Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2016, 249-256.
- Pedersen, Ø. & Rüther, N. (2018): CFD modelling as part of a hybrid modelling approach for a gauging station with challenging geometry.
- Petersen-Overleir, A., Soot, A. & Reitan, T. (2008): Bayesian Rating Curve Inference as a Streamflow Data Quality Assessment Tool. *Water Resources Management*, 23, 1835-1842.
- Qu, J., Ramamuthy, A. S., Tadayon, R., Chen, Z. (2009): Numerical simulation of sharp-crested weir flows. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36, 1530-1534.
- Reitan, T. & Petersen-Overleir, A. (2009): Bayesian methods for estimating multi-segment discharge rating curves. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23, 627-642.
- Renard, B., Kochanek, K., Lang, M., Garavaglia, F., Paquet, E., Neppel, L., Najib, K., Carreau, J., Arnaud, P., Aubert, Y., Borchi, F., Soubeyrou, J.-M., Jourdain, S., Veysseire, J.-M., Sauquet, E., Cipriani, T. & Auffray, A. (2013): Data-based comparison of frequency analysis methods: A general framework, *Water Res. Res.*, 49, 825-843.
- Sarker, M. A., Rhodes, D. G. (2004): Calculation of free-surface profile over a rectangular broad-crested weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 215-219.

- Savage, B. M., Crookston, B. M., Paxson, G. S. (2016): Physical and Numerical Modeling of Large Headwater Ratios for a 15° Labyrinth Spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142, 04016046.
- Savage, B. M. & Johnson, M. C. (2001): Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 127, 640-649.
- Shao, Q., Dutta, D., Karim, F. & Petheram, C. (2018): A method for extending stage-discharge relationships using a hydrodynamic model and quantifying the associated uncertainty. *Journal of Hydrology*, 556, 154-172.
- Skaugen, T. & Onof, C. (2013): A rainfall-runoff model parameterized from GIS and runoff data, *Hydrological Processes*, 28, 4529-4542.
- Skaugen, T., Peerebom, I. O. & Nilsson, A. (2015): Use of a parsimonious rainfall-runoff model for predicting hydrological response in ungauged basins, *Hydrological Processes*, 29, 1999-2013.
- Slotnick, J., Khodadoust, A., Alonso, J., Darmofal, D., Gropp, W., Lurie, E. & Mavriplis, D. (2014): CFD Vision 2030 Study: A Path to Revolutionary Computational Aerosciences. Hanover, MD USA: NASA.
- Sorteberg A., Lawrence D., Dyrddal A. V., Mayer S. and Engeland K. (2018): Climatic changes in short duration extreme precipitation and rapid onset flooding - implications for design values. Norwegian Centre for Climate Services (NCCS) Report no. 1/2018.
- Stedinger, J.R., R.M. Vogel & E. Foufoula-Georgiou (1993): Frequency Analysis of Extreme Events, Chapter 18, Handbook of Hydrology, D. Maidment (ed.), McGraw-Hill, Inc., New York.
- Steinbakk, G.H., Thorarinsdottir, T.L., Reitan, T., Schlichting, L., Hølleland, S. & Engeland, K. (2016): Propagation of rating curve uncertainty in design flood estimation. *Water Resour. Res.*, 52, 6897-6915.
- Svelle, K., Petersen-Øverleir, A. & Bogetveit, L. J. (2007): Setting up rating curves using HEC-RAS. *Vann (Journal of the Norwegian Water Association)*, 1, 182-189.
- Sælthun, N. R. (1996): The Nordic HBV Model, NVE Publication No. 7.
- Sæter (2000): Resultat fra ekstrapolering av vannføringskurven for målestasjon 124.12 Hegra Bru ved hjelp av Hec-Ras.
- Hisdal, H., Thorarinsdottir, T.L., Alfredsen, K., Lawrence, D., Lundquist, D., Løland, A., Midttømme, G.H., Tveito, O.E. & Wilson, D. (2013): Status for og veier til bedre flomestimering i Norge. NR rapport nr. SAMBA/23/13, 39 s., http://publications.nr.no/1389949484/Flom_Thorarinsdottir.pdf.
- Thorarinsdottir, T.L., Hellton, K.H., Steinbakk, G.H., Schlichting, L. & Engeland, K. (2018): Bayesian regional flood frequency analysis for large catchments. arXiv: 1802.09278.
- Tullis, B. P. (2011): Behavior of Submerged Ogee Crest Weir Discharge Coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137, 677-681.
- Tullis, B. P. & Neilson, J. (2008): Performance of submerged ogee-crest weir head-discharge relationships. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 134, 486-491.
- Tveito, O.E., Wegehenkel, M., v.d. Wel, F. Dobesch, H. (2008): The use of Geographic Information Systems in Climatology and Meteorology, Final report of COST Action 719, Cost Office, Brussels, EUR 23461, 246pp
- Tveito, O.E., Bjørndal, I., Skjelvåg, A.O., Aune, B. (2005): A GIS-based agro-ecological decision system based on gridded climatology, *Meteorological Applications*, 12:1:57-68
- USBR (1987): *Design of Small Dams*, Washington, D.C., U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Vormoor, K., Lawrence, D., Heistermann, M., Brostert, A. (2015): Climate change impacts on the seasonality and generation processes of floods – projections and uncertainties for catchments with mixed snowmelt/rainfall regimes, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 913–931.
- Vormoor, K. & Skaugen, T. (2013): Temporal disaggregation of daily temperature and precipitation grid data for Norway. *Journal of Hydrometeorology*, 14, 989-999.
- Wilson, D., Fleig, A., Lawrence, D. Hisdal, H., Pettersson, L.-E. & Holmqvist, E. (2011): A review of NVE's flood frequency estimation procedures. NVE Technical Report nr 9:2011, NVE, Oslo.
- WMO (2010): *Manual on Stream Gauging*, WMO-No. 1044, Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization.
- WMO (2009): *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*, WMO-No. 1045, WMO, Geneva, 257 s.
- Zeng, J., Zhang, L., Ansar, M., Damisse, E., González-Castro, J. (2016): Applications of Computational Fluid Dynamics to Flow Ratings at Prototype Spillways and Weirs. I: Data Generation and Validation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 04016072.

Appendiks A: Publikasjoner og formidling fra prosjektet

Vitenskapelige publikasjoner

- Bakke, S.J. (2018); Flomtilsig fra magasindata, NVE rapport 50, 2018. 67 sider.
- Benedict, I., Ødemark, K., Moore, R. & Nipen, T. (2018): Large-scale dynamics inducing atmospheric rivers and extreme precipitation over Norway. Sent inn til *Monthly Weather Review*.
- Engeland, K. & Holmqvist, E. (2017): Lærdom fra flomhistorien. forskning.no 25.11.2017, <https://forskning.no/2017/11/laerdom-fra-flomhistorien>.
- Engeland, K., Wilson, D., Borsányi, P., Roald, L. & Holmqvist, E. (2018): Use of historical data in flood frequency analysis: a case study for four catchments in Norway. *Hydrology Research* 49 (2), 466-486.
- Filipova, V., Lawrence, D. & Klempe, H. (2016): Regionalisation of the parameters of the rainfall-runoff model PQRUT. *Hydrology Research* 47(4), 748-766.
- Kobierska, F., Engeland, K. & Thorarinsdottir, T. (2018): Evaluation of design flood estimates – a case study for Norway. *Hydrology Research* 49 (2), 450-465.
- Lawrence, D., Paquet, E., Gailhard, J. & Fleig, A.K. (2014): Stochastic semi-continuous simulation for extreme flood estimation in catchments with combined rainfall-snowmelt flood regimes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14, 1283-1298.
- Pedersen, Ø., Aberle, J. & Rüther, N. (2018a): Hydraulic scale modelling of the rating curve for a gauging station with natural control. Sent inn til *Hydrology Research*.
- Pedersen, Ø., Fleit, G., Pummer, E., Tullis, B. P. & Rüther, N. (2018b): Reynolds-Averaged Navier-Stokes Modeling of Submerged Ogee Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144, 04017059.
- Pedersen, Ø. & Rüther, N. (2016a): Hybrid Modeling of a Gauging Station Rating Curve. *Procedia Engineering*, 154, 433-440.
- Pedersen, Ø. & Rüther, N. (2016b): Numerical modeling of submerged flow over ogee-weirs. *River Flow - Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2016*, 249-256.
- Pedersen, Ø. & Rüther, N. (2018): CFD modelling as part of a hybrid modelling approach for a gauging station with challenging geometry. Sent inn til *Engineering Applications of Computational Fluid Dynamics*.
- Steinbakk, G.H., Thorarinsdottir, T.L., Reitan, T., Schlichting, L., Hølleland, S. & Engeland, K. (2016): Propagation of rating curve uncertainty in design flood estimation. *Water Resources Research* 52, 6897-6915.
- Thorarinsdottir, T.L., Hellton, K.H., Steinbakk, G.H., Schlichting, L. & Engeland, K. (2018): Bayesian regional flood frequency analysis for large catchments. Under revisjon hos *Water Resources Research*.

Foredrag og posters

Denne listen inkluderer ikke foredrag på workshops og møter organisert i regi av FlomQ prosjektet.

- Alfredsen, K. (2014): FlomQ - status på FoU-prosjekt. NNCOLD Fagseminar; 2014-11-13 - 2014-11-13.
- Engeland, K. (2015): Flood frequency analysis – the challenge of using historical data. EGU 2015; 2015-04-12 - 2015-04-17.
- Engeland, K. (2015): FlomQ, siste nytt fra prosjektet. Vassdragsteknisk forum sitt vintermøte; 2015-01-28.
- Engeland, K. & Steinsland, I. (2018): Flood frequency analysis – assessment of uncertainties in flood data, plotting positions and fitted distributions, EGU2018-12360, EGU 2018, Wien, Østerrike
- Engeland, K. & Holmqvist E. (2018): Flood frequency analysis including historical data: A case study for catchments in Norway, EGU2018-12285, EGU 2018, Wien, Østerrike.
- Kobierska, F. & Engeland, K. (2016): Evaluation of design flood estimates with respect to sample size. EGU 2016; 2016-04-18 - 2016-04-22.
- Lawrence, D., Paquet, E. R., Blanchet, J. & Skaugen, T. (2015): Stochastic semi-continuous simulation for extreme flood estimation for dam safety assessments in Norway. 3rd Conference on "Modelling Hydrology, Climate and Land Surface Processes"; 2015-09-07 - 2015-09-09.
- Lawrence, D., Thorarinsdottir, T.L., Paquet, E., Skaugen, T. & Engeland, K. (2017): FlomQ: Improving flood estimation methods for dam safety in Norway. EnergiForsk HUVA dagen, Stockholm, Sverige; 2017-12-07.
- Pedersen, Ø. (2015): 3D hybrid modellering av vannføringskurver ved ekstremflom. Hydraulikksamling; 2015-01-28.
- Pedersen, Ø. (2015): Eggafossen skalamodel. NVE seminar; 2015-04-11.
- Pedersen, Ø. (2015): Improved flood forecasting - 3D-hybrid modelling of rating curves. High-North workshop; 2015-05-12.
- Pedersen, Ø. (2016): PhD - Hydraulisk modellering av vannføringskurver. NVE seminar; 2016-01-29.
- Pedersen, Ø. (2016): Hydraulic modeling of rating-curves – A case study. NVE seminar; 2016-10-18.
- Pedersen, Ø. (2016): Modelling rating curves. Seminar on hydraulic modelling; 2016-04-01.
- Pedersen, Ø. (2016): Numerical modeling of submerged flow over ogee-weirs. Riverflow 2016; 2016-07-11 - 2016-07-14.
- Pedersen, Ø. (2016): Hybrid modeling of a gauging station rating curve. Hydroinformatics conference; 2016-08-21 - 2016-08-26.
- Schlichting, L., Vormoor, K. & Engeland, K. (2015): Estimation of flood generating processes in gauged catchments. 3rd Conference on Modelling Hydrology, Climate and Land Surfaces; 2015-09-07 - 2015-09-09.
- Skaugen, T. (2015): Ny Hydrologisk modell basert på kartdata og observasjoner. Kraftverkshydrologi og miljøforhold; 2015-03-17 - 2015-03-18.
- Steinbakk, G. H., Thorarinsdottir, T. L., Reitan, T., Schlichting, L., Hølleland, S. & Engeland, K. (2016): Propagation of rating curve uncertainty in design flood estimation. Poster på EGU 2016; 2016-04-18 - 2016-04-22.
- Thorarinsdottir, T. L. (2014): FlomQ - flomberegningsprosjekt. Regionsmøte i Vassdragsteknisk forum vest; 2014-09-02.

- Thorarinsdottir, T. L. (2014): FlomQ - A robust flood estimation framework for Norway. High North Seminar; 2014-10-28.
- Thorarinsdottir, T. L. (2016): FlomQ - Hvor sikkert kan dimensjoneringsgrunnlaget bestemmes? Produksjonsteknisk konferanse; 2016-03-08.
- Thorarinsdottir, T. L., Steinbakk, G. H., Engeland, K., Lenkoski, A. & Schlichting, L. (2016): Regional flood frequency analysis for Norway. Workshop on spatial and space-time statistics, Smögen, Sweden; 2016-08-15 - 2016-08-18
- Thorarinsdottir, T. L., Steinbakk, G. H., Engeland, K., Lenkoski, A. & Schlichting, L. (2016): Regional flood frequency analysis for Norway. Karlsruhe Institute of Technology Stochastics Seminar; 2016-05-17.
- Thorarinsdottir, T. L., Steinbakk, G. H., Engeland, K., Lenkoski, A. & Schlichting, L. (2016): Regional flood frequency analysis for Norway. University of Exeter Statistics Seminar; 2016-05-12.
- Thorarinsdottir, T. L., Lenkoski, A., Hellton, K., Steinbakk, G. H., Dyrddal, A.V., Stordal, F., Schlichting, L. & Engeland, K. (2018): On developing general and efficient inference algorithms for complicated hierarchical models. 13th Germany Probability and Statistics Days, Freiburg, Germany; 2018-02-28.
- Thorarinsdottir, T. L., Hellton, K., Steinbakk, G. H., Schlichting, L. & Engeland, K. (2018): Statistical estimation of extreme floods. Extremes 2018, Hannover, Germany; 2018-03-18.
- Thorarinsdottir, T. L., Lawrence, D., Engeland, K., Hellton, K. & Steinbakk, G. H. (2018): FlomQ: Et nytt rammeverk for flomestimering i Norge. NR lunsjseminar; 2018-04-27.
- Ødemark, K., Moore, R., Tveito, O.E., Berntsen, T. & Benedict, I. (2016): Extreme precipitation in Norway and the connection to atmospheric rivers. 2016 International Atmospheric Rivers Conference, La Jolla, CA, USA; 2018-08-08.