

Status for og veier til bedre flomestimering i Norge



Notatnr
Forfattere

SAMBA/23/13

Hege Hisdal
Thordis L. Thorarinsdottir
Knut Alfredsen
Deborah Lawrence
Dan Lundquist

Anders Løland
Grethe Holm Midttømme
Ole Einar Tveito
Donna Wilson

Dato

20. desember 2013

Forfatterne

Deborah Lawrence is a Senior Research Scientist, Donna Wilson is a Research Scientists and Hege Hisdal is Head of the Hydrological Modeling Section at the Hydrology Department of the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE). Thordis L. Thorarinsdottir is Senior Research Scientist og Anders Løland is Chief Research Scientist at Norwegian Computing Center. Knut Alfredsen is Professor of Hydrology at Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Grethe Holm Midttømme is Senior Engineer at the Section for Dam Safety of NVE. Dan Lundquist is Senior Hydrologist at Norconsult AS. Ole Einar Tveito is Head of the Section for Data and Spatial Analysis in the Division for Climate Services of the Norwegian Meteorological Institute.

Norsk Regnesentral

Norsk Regnesentral (NR) er en privat, uavhengig stiftelse som utfører oppdragsforskning for bedrifter og det offentlige i det norske og internasjonale markedet. NR ble etablert i 1952 og har kontorer i Kristen Nygaards hus ved Universitetet i Oslo. NR er et av Europas største miljøer innen anvendt statistisk-matematisk modellering og har et senter for forskningsdrevet innovasjon, Statistics for Innovation – (sfi)², med finansiering fra Norges forskningsråd. Det jobbes med et bredt spekter av problemstillinger, for eksempel finansiell risiko, jordobservasjon, estimering av fiskebestander og beskrivelse av geologien i petroleumsreservoarer. NR er ledende i Norge innen utvalgte deler av informasjons- og kommunikasjonsteknologi. Innen IKT-området har NR innsatsområdene e-inkludering, informasjonssikkerhet og smarte informasjonssystemer.

NRs visjon er forskningsresultater som brukes og synes.

Tittel **Status for og veier til bedre flomestimering i Norge**

Forfattere **Hege Hisdal** <hhi@nve.no>
Thordis L. Thorarinsdottir <thordis@nr.no>
Knut Alfredsen <knut.alfredsen@ntnu.no>
Deborah Lawrence <dela@nve.no>
Dan Lundquist <Dan.Lundquist@norconsult.com>
Anders Løland <anders.loland@nr.no>
Grethe Holm Midttømme <ghm@nve.no>
Ole Einar Tveito <ole.einar.tveito@met.no>
Donna Wilson <dowi@nve.no>

Dato 20. desember 2013

Publikasjonsnummer SAMBA/23/13

Sammendrag

Estimater av ekstreme flomhendelser er nødvendig for å kunne dimensjonere viktig infrastruktur som for eksempel dammer. I denne rapporten gis en oversikt over status for forskriftskrav og utførte flomberegninger for dammer i Norge. Videre beskrives kvaliteten i observerte hydrologiske data og dimensjonerende nedbørdata, samt spesielle utfordringer knyttet til observasjoner av flom. Det gis en oversikt over de to hovedgruppene av metoder som brukes for å beregne dimensjonerende flom: flomfrekvensanalyse og nedbør-avløps-modellering. Metodenes forutsetninger, usikkerhetskilder og fordeler og ulemper beskrives. Pågående og planlagte forsknings- og utviklingsaktiviteter er oppsummert med fokus på hva som gjøres i Norge. Avslutningsvis og gjennom tre forprosjektanalyser beskrevet i separate vedlegg, gis anbefalinger om videre aktiviteter både innen flomfrekvensanalyse, nedbør-avløps-modellering og sammenlikning av metoder, som vil kunne bidra til mer robuste standarder for beregning av dimensjonerende flom i Norge. Bildet på forsiden er tatt av Nedre Eiker kommune.

Emneord damsikkerhet, datakvalitet, flomberegninger, hydrologisk modell, flomfrekvensanalyse, nedbør-avløps-modeller

Målgruppe Arbeidsutval for damsikkerhet

Tilgjengelighet Åpen

Prosjekt Forprosjekt om flomberegninger

Prosjektnummer 220614

Satsningsområde Teknologi, industri og forvaltning

Antall sider 48

© Copyright Norsk Regnesentral og forfatterne

Innhold

1	Innledning	7
2	Status forskriftskrav og utførte flomberegninger for dammer i Norge	8
2.1	Datakvalitet i eksisterende flomberegninger	10
3	Data	11
3.1	Dimensjonerende nedbør	11
3.1.1	Endringer i nedbørklima?	12
3.1.2	Intensitet/varighet	12
3.1.3	Forskningsutfordringer og områder	12
3.2	Vannføringsdata	13
3.2.1	Usikkerhet i vannføringsdata	14
3.2.2	Modellering av vassføringskurver	15
3.3	Kvalitetskontroll	16
3.4	Feltegenskaper	17
4	Frekvensanalyse	17
4.1	Analyse av enkeltserier	18
4.1.1	Utvalg av flomhendelser	18
4.1.2	Valg av statistisk fordeling	19
4.1.3	Valg av parameterestimeringsmetode og plotteposisjon	20
4.2	Regional flomfrekvensanalyse	21
4.2.1	Inndeling i homogene regioner	22
4.2.2	Bestemme indeks-flommen	22
4.2.3	Valg av regional frekvensfordeling	22
4.3	Pågående og planlagt FoU	23
5	Nedbør-avløps-modeller	25
5.1	“Hendelsesbaserte” metoder	25
5.1.1	Eksempel på bruk av PQRUT	26
5.2	“Semi-kontinuerlig” og “kontinuerlig” modellering	28
5.3	Pågående og planlagt FoU	28
6	Konklusjon	29
	Referanser	30
A	Flomfrekvensanalyse av korte dataserier og potensielle forbedringer ved bruk av historiske data	34
A.1	Historiske hendelser med kjent størrelse	34
A.2	Historiske hendelser med ukjent størrelse	36

B	Sammenlikning av PQRUT nedbør-avløpsmetoden og to andre modelleringsmetoder med statistisk flomfrekvensanalyse	37
C	Sammenlikning av parameterestimeringsmetoder i statistisk flomfrekvensanalyse	40
C.1	Robusthet.	43
C.2	Prediktiv ytelse.	46

1 Innledning

Pålitelige estimater av ekstreme flomhendelser er nødvendig for å kunne dimensjonere viktig infrastruktur som for eksempel dammer og bruer og generelt i vannressursforvaltning for eksempel for å fremstille faresonekart til bruk i arealplanleggingen. Vi kan dele metodene for flomberegninger inn i to hovedgrupper: flomfrekvensanalyser og nedbør/avløpanalyser.

Flomfrekvensanalyser er en måte å estimere ekstreme verdiene på ved bruk av observert vannføring. Analysene er basert på prinsippet om at analyser av tidligere observerte flomhendelser kan gi estimater av fremtidige ekstreme hendelser ved ekstrapolasjon. Siden vi bare har observasjoner for begrensede perioder, er det lite sannsynlig at vi faktisk har målt en svært ekstrem hendelse. Totalt sett er derfor utvalget observasjoner av ekstreme hendelser alltid lite. Spørsmålet blir da hvordan man kan bruke de observasjonene man har for å få et best mulig estimat av de sjeldne og store flommene.

Flomfrekvensanalyse kan brukes lokalt, på en tidsserie, eller regionalt (regional flomfrekvensanalyse). Sistnevnte metode brukes for å øke utvalget observerte flomhendelser og man kan si at "rom erstatter tid". På denne måten reduseres usikkerheten og påliteligheten øker i estimatet, dersom man har få eller ingen observasjoner på det aktuelle stedet.

Et alternativ til de statistiske metodene er nedbør-avløps-modellering. Dersom påregnelig maksimal flom skal beregnes er nedbør-avløps-modellering eneste mulighet. Da gjennomføres analysen basert på en kombinasjon av informasjon om nedbør og avløp enten bare ved hjelp av statistiske analyse eller kombinert med å bruke hydrologiske modeller for å omforme nedbør til vannføring. To hovedgrupper av metoder finnes, basert på: hendelsesbaserte simuleringer og kontinuerlige simuleringer. For små nedbørfelt brukes også empiriske metoder.

I de fleste land i Europa er det operasjonelle etablerte metoder for gjennomføring av beregningene, både for frekvensanalyse og nedbør-avløps-modellering. Forbedring av metodene og utvikling av nye metoder er et tema for forskning. I en rekke land vurderes nyere metoder opp mot eksisterende operasjonelle metoder for om mulig å forbedre estimatene. Når vi snakker om forbedrede estimater mener vi ofte en reduksjon i usikkerheten. I praksis er det ulike varianter av frekvensanalyse og nedbør-avløps-modeller, men prinsippene er de samme. Ofte er tradisjon eller hva man erfaringsmessig vet fungerer godt for et lite utvalg nedbørfelt utslagsgivende for hvilken variant av en metode som velges i et land. I Europa er det i dag et prosjektsamarbeid, en såkalt COST-action (2010-2014), hvor formålet er å sammenlikne metodene som brukes og å gi en objektiv vurdering av de ulike metodene for de ulike klimatiske og geografiske forhold man finner i Europa og med ulik datatilgjengelighet. I prosjektet er det arbeidsgrupper for å vurdere flomfrekvensanalysemetoder, nedbør-avløps-modeller og metoder for bruk ved systematisk endring av flomstørrelsene over tid på grunn av inngrep i vassdraget eller klimaendringer.

Hensikten med denne rapporten er å gi en kort oversikt over tilgjengelige metoder og hva

som er de største kildene til usikkerhet når dimensjonerende flommer beregnes. Rapporten er i hovedsak basert på mer detaljert oversikter over metodene som brukes i Norge (Sælthun, 1999; Wilson mfl., 2011) og Europa (Castellarin mfl., 2012; Paquet mfl., 2013). Fleig og Wilson (2013) gir en oversikt over metoder for flomberegninger i små nedbørfelt, men disse er ikke inkludert her.

Konsekvensene av dambrudd er store. Derfor er det særlige krav knyttet til flomberegninger for dammer og disse finnes i forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften) med tilhørende retningslinjer for flomberegninger (Midttømme mfl., 2011). Det er Norges vassdrags- og energidirektorat som forvalter forskriften med hjemmel i vannressursloven. I denne rapporten beskrives først en status for forskriftskravene og utførte flomberegninger for dammer i Norge. Deretter omhandles dimensjonerende nedbørdata og vannføringsdata med fokus på kvaliteten til flomdata. I to separate kapitler beskrives flomfrekvensanalyse og nedbør-avløps-modellering med forutsetninger som ligger til grunn for metodene, usikkerhetskilder, hvilke metoder man bruker i Norge og pågående og planlagt FoU-aktiviteter. Rapporten konkluderer med noen generelle betraktninger om flomberegninger og usikkerhet.

Til slutt er tre forprosjektanalyser beskrevet i separate vedlegg. Vedlegg A beskriver en test på bruk av Bayesianske metoder i frekvensanalyse. I Vedlegg B er resultatene fra flomfrekvensanalyse sammenliknet med resultatene fra nedbør-avløps-modellering for to nedbørfelt i Norge med ulik flomgenererende prosess. Studien i Vedlegg C sammenlikner Bayesiansk parameterestimering i frekvensanalyse med tre andre parameterestimeringsmetoder.

2 Status forskriftskrav og utførte flomberegninger for dammer i Norge

Dammer klassifiseres etter hvilke bruddkonsekvenser de har. For dammer med betydelige konsekvenser (konsekvensklasse 1-4) gjelder forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften/dsf), gjort gjeldende fra 01.01.2010. De viktigste kravene knyttet til datakvalitet og flomberegninger fins i damsikkerhetsforskriften §5-4, §5-7, §7-2 og §7-5.

Krav til flomberegninger for dammer i konsekvensklasse 1-4 er gitt i §5-7 i forskriften, se tabell under, mens for dammer i konsekvensklasse 0 gir NVE anbefalinger om å bruke en 200-års flom som dimensjonerende flom.

Videre i §5-7 stilles det krav om at flomberegninger (rapporter) skal inkludere en presentasjon av eventuelle observerte flommer i vassdraget for sammenlikning med beregnede verdier, og at kvaliteten på datagrunnlaget beskrives (se Tabell 1). I §5-4 stilles det krav om at "der datagrunnlaget for flomberegninger er mangelfullt, skal det tillegges en sikkerhetsmargin ved dimensjonering og kontroll av dam og flomløp".

Flomberegninger skal utføres og kontrolleres av kvalifiserte fagpersoner i fagområde IV (flomhydrologi), deriblant minst en NVE-godkjent fagansvarlig. For komplekse flomavledningsarrangementer skal det også benyttes godkjente fagansvarlige i fagområde V (hydraulikk og flomavledning). Beregningene skal godkjennes av NVE.

Tabell 1. Krav til flomberegninger

Klasse	Bruddgrensetilstand – flomstørrelser for dimensjonering av dam med flomløp (dimensjonerende flom, Q_{dim})	Ulykkesgrensetilstand – flomstørrelser for kontroll av dammens sikkerhet mot brudd (ulykkesflom)	
	Generelt krav (alle dammer) ¹	Generelt krav (alle dammer)	Tilleggskrav for anlegg med manøvrerbare flomløp
4 og 3	Q_{1000}	Q_{PMF}	Q_{1000} med lukesvikt
2	Q_{1000}	$1.5 (Q_{1000}/Q_{PMF})^2$	Q_{1000} med lukesvikt
1	Q_{50}	$1.5 (Q_{500}/Q_{PMF})^2$	Q_{500} med lukesvikt

Det er krav om å gjøre nye beregninger av tilløpsflommer minimum hvert 15. år (konsekvensklasse 2-4) og 20. år (konsekvensklasse 1), eller dersom det er gjort endringer på damanlegg eller er avdekket store feil eller usikkerheter i datagrunnlaget (dsf §7-5). NVE har mulighet til å pålegge innsamling av data for revurdering av dammer, jf. damsikkerhetsforskriften §7-2. Dette kan gi hjemmel for å pålegge etablering av målestasjoner for innsamling av vannføringsdata til flomberegninger, men pr i dag er det ikke vanlig praksis å gjøre dette.

Vannføringsstasjoner pålegges pr i dag primært gjennom konkretisering av konsesjonsvilkår om hydrologiske observasjoner. Til nå har NVE operert med seks hovedbegrunnelser til å kunne pålegge måling av vannstand/vannføring, deriblant:

- Sikre datagrunnlag for hydrologiske beregninger i aktuelle felt, og eventuelt erstatte målestasjoner som etter et vassdragstiltak ikke lenger gir representative data.
- Skaffe data for rekonstruksjon av naturlige forhold (inkludert tilsigsforhold) i et regulert vassdrag.
- Skaffe data for økt sikkerhet og beredskap i vassdraget. Dette gjelder både funksjons-sikkerhet ved vassdragstiltaket, trygghet mot ulykker på is og bre, og beredskap mot flom, inkludert offentlig flomvarsling.

1. Der det er fare for redusert flomavledningskapasitet som følge av tilstopping av overløp, og det ikke er mulig å gjøre avbøtende tiltak, skal dam og flomløp dimensjoneres for den avløpsflom og flomvannstand som følger av kombinasjonen dimensjonerende tilløpsflom og tilstopping av overløpet. Krav om å vurdere tilstopping gjelder bare i bruddgrensetilstand.

2. For dammer i klasse 1 og 2 gir forskriftene adgang til å benytte en annen flom enn Q_{PMF} , dvs. $1.5Q_{dim}$, til kontroll av dammenes sikkerhet mot brudd. I slike tilfeller er det tilløpsflommen som skal ganges med 1.5.

Det er lagd retningslinjer for hvordan flomberegning for dammer skal gjennomføres for å oppfylle damsikkerhetsforskriftens krav (Midttømme mfl., 2011). Disse retningslinjene bygger på tidligere retningslinjer utgitt i 2002. Andre beslektede retningslinjer til damsikkerhetsforskriften er; retningslinjer for overvåking og instrumentering av vassdragsanlegg (som inkluderer måling av vannstand i magasin) og retningslinjer for flomløp. I tillegg fins det veiledere til hydrologiske pålegg.

Allerede i retningslinjene fra 2002 ble det innført en anbefaling om å vurdere kvaliteten på datagrunnlaget og gi det en klassifisering (uten at det var forskriftskrav). I den siste utgaven av retningslinjer for flomberegninger er kriteriene for klassifiseringen av datagrunnlaget videreført, se Tabell 2.

Tabell 2. Klassifisering av flomberegninger

Klasse	Klassifiseringskriterier
1	Godt hydrologisk datagrunnlag, med observasjoner i vassdraget.
2	Brukbart hydrologisk datagrunnlag, med observasjoner i eller nært vassdraget.
3	Brukbart hydrologisk datagrunnlag, men store gradienter i spesifikke flomstørrelser i området.
4	Begrenset hydrologisk datagrunnlag.
5	Begrenset hydrologisk datagrunnlag og store gradienter i spesifikke flomstørrelser i området.

Klassifiseringen skal ikke tolkes som et mål på kompetansen til den som utfører flomberegningen, eller på nøyaktigheten ved utførelsen. Klassifiseringen skal knyttes til det tilgjengelige hydrologiske datagrunnlaget og hvordan det er benyttet i flomberegningen.

Siden 2010 har det blitt et forskriftskrav at datakvaliteten skal vurderes (se over, dsf §5-7) og at mangelfullt datagrunnlag skal utløse krav om ekstra sikkerhetsmarginer ved kontroll og dimensjonering av dammer og flomløp (se over, dsf §5-4). Flomberegningsklassene er altså et viktig grunnlag for å vurdere om det skal legges på sikkerhetsmarginer på flomverdiene i ht §5-4. Der datagrunnlaget er dårlig/usikkert, anbefaler NVE at det gjøres en følsomhetsanalyse av flomvannstandene, dvs hvordan de påvirkes av endringer i tilløpsflommene.

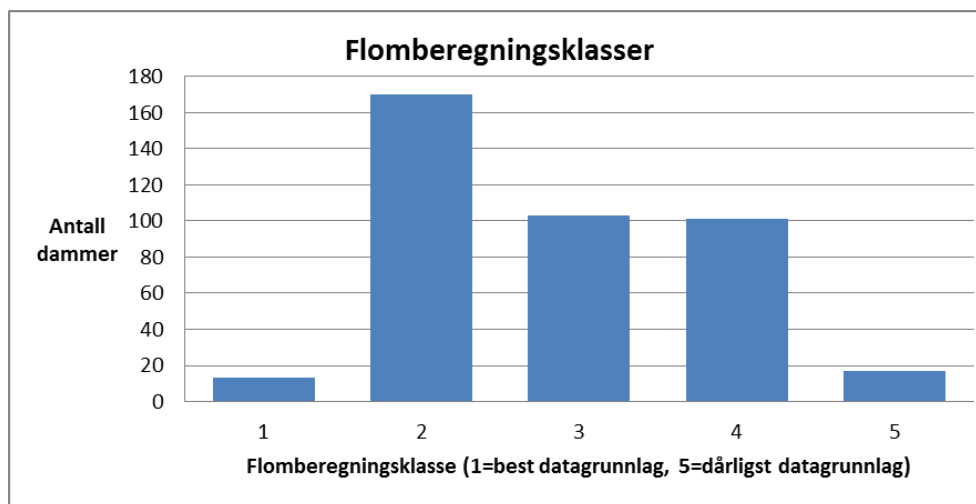
Eventuelle usikkerheter i beregningsmetoder blir ikke fanget opp av damsikkerhetsforskriften, men retningslinjer for flomberegninger (Midttømme mfl., 2011) gir anbefalinger om valg av metode og hvordan man kan evaluere utførte flomberegninger ved å sammenlikne med resultater fra forskjellige metoder, erfaringstall og andre utførte flomberegninger i samme område.

2.1 Datakvalitet i eksisterende flomberegninger

For de aller fleste flomberegninger mangler fortsatt en vurdering av datagrunnlaget, og for noen beregninger er ikke flomberegningsklassen registrert i damdatabasen SIV enda.

Siden det skal gjøres flomberegninger for alle dammer i konsekvensklasse 1-4 hvert 15.-20. år (dsf §7-5), og det nå er et krav at kvaliteten på datagrunnlaget skal beskrives (dsf §5-7), vil dette endre seg gradvis.

Av de totalt 2371 dammene som er registrert i konsekvensklasse 1-4 i SIV, er det registrert flomberegningsdata for 1572 dammer. Pr. 23.05.2013 er det registrert flomberegningsklasse for 404 av disse dammene, primært dammer med nyere flomberegninger (utført etter 2010). Av disse 404 dammene, der datagrunnlaget for flomberegninger er vurdert, er 221 av beregningene utført med datagrunnlag i flomberegningsklasse 3, 4 og 5, se Figur 1. Totalt 183 beregninger er utført med relativt gode data (flomberegningsklasse 1 og 2).



Figur 1. Mer enn 50% av dammene i konsekvensklasse 1-4 der datagrunnlaget for flomberegninger er vurdert, har flomberegninger basert på usikkert datagrunnlag pr. mai 2013.

For flomberegninger utført med dårlig datagrunnlag, vil det være aktuelt å legge til ekstra sikkerhetsmarginer ved planlegging av tiltak eller bygging av ny dam. Dette kan naturligvis føre til at noen dammer blir "overdimensjonert" da det ofte vil være vanskelig å si om flomverdiene er konservative, eller ikke. Man vet bare at flomverdiene er et resultat av beregninger med store usikkerheter i datagrunnlaget.

3 Data

3.1 Dimensjonerende nedbør

Meteorologisk institutt (MET) er pålagt å levere beregninger for ekstrem nedbør for norske nedbørfelt. Gjeldende retningslinjer for disse beregningene er beskrevet i Førland (1992). Beregningene er basert på metodikk utviklet av NERC (UK) i 1975 og modifisert for norske forhold på 1980-tallet (Førland, 1987; Førland og Kristoffersen, 1989). Ekstremverdiene (ulike returperioder og Påregnelig Maksimal Nedbør (PMP)) beregnes ved bruk av empiriske vekstfaktorer, og punktverdier omregnes til arealnedbør ved bruk av empiriske Areal Reduksjons Faktorer (ARF). Metoden er tidkrevende og resultatene kan i stor grad påvirkes av subjektive vurderinger.

Dimensjonerende nedbørverdier er tradisjonelt basert på døgnlige målinger fra vær- og nedbørstasjoner. Tilgjengeligheten til, og valg av observasjonsserier kan ha stor betydning for representativiteten til beregningene.

Met.no arbeider nå med alternativ metodikk basert på romlig fordelt nedbør (gridda data, seNorge.no, Jansson mfl., 2007; Tveito mfl., 2005, 2008) kombinert med GEV - fordelingen (Dyrrdal mfl., 2013). Dette er bl.a. tema i en doktorgrad som utføres på met.no i samarbeid med UiO og NVE.

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

3.1.1 Endringer i nedbørklima?

Foreliggende scenarier tyder på at intensiteten i ekstremnedbør vil øke frem til år 2100 (Hanssen-Bauer mfl., 2009). De senere årenes intense nedbør- og flom-hendelser (f.eks. Kvam 2013, Eiker 2012, Notodden 2011 og Tydal 2011) kan være en indikasjon på det. Endringer i temperaturregimet (varmere vintre, mindre tydelige sesongvariasjoner, endring i snøforhold) vil også kreve ny tilnærming til tradisjonell flomfrekvensanalyse (Sæltun mfl., 1997).

3.1.2 Intensitet/varighet

Datagrunnlaget for å vurdere nedbørintensiteter for varighet < 24 timer har vært sparsomt. I det tradisjonelle observasjonsprogrammet til met.no har nedbør vært observert 1-2 ganger pr. døgn. For mange formål, bl.a. flom i urbane områder og små nedbørfelt trengs nedbørintensitet for korte varigheter (< 1 time). I nåværende metodikk beregnes nedbørintensitet for varigheter under ett døgn ved empiriske omregningsfaktorer.

Nettverket av automatiske nedbørmålere og nedbørintensitetsmålere med minutt oppløsning utvides stadig, noe som etter hvert vil gi bedre data for å generere robuste Intensitet-Varighet-Frekvens (IVF)-estimat. I tillegg ligger det et uutnyttet potensiale i det etter hvert store antallet vektpluviografer (f.eks. GEONOR målere) ved å redusere samplingsintervallet fra typisk en time i dag til ≤ 10 min. Met.Inst. vil fra og med 2013 gradvis oppdatere sine Geonor-målere til å foreta 10-minutters målinger.

Det er òg planer om å generere gridda datasett med en times tidsoppløsning basert på observasjoner fra nedbørstasjoner og radar kombinert med numeriske og statistiske modeller.

3.1.3 Forskningsutfordringer og områder

Utvikle metodikk for robust nedbørfrekvensstatistikk for ulike varigheter og for å beregne dimensjonerende nedbørverdier (for punkt og areal). Dette er en tradisjonell tilnærming som i stor grad inngår i PhD-arbeidet som utføres på MET i samarbeid med UiO og NVE. I denne sammenheng vil optimal utnyttelse av tradisjonelle og nye datakil-

der (bakkemålinger, radar, satellitt, finskala numeriske atmosfæremodeller) for å gi bedre gridda nedbørdata med høy oppløsning i rom og tid være viktig.

Utvikle ny metodikk for beregning av Påregnelig Maksimal Nedbør (PMP) basert på fysiske atmosfæremodeller. PMP er en kritisk verdi for damsikkerhet og flomberegning (Midttømme mfl., 2011). Nåværende metodikk er basert på empiriske vekstfaktorer (Førland, 1992). Statistiske metoder basert på observasjoner vil ha begrensninger for virkelig store gjentaksintervall (> 500-1000 år). Så behandling av de mest ekstreme nedbørverdiene og PMP krever at alternative tilnærminger benyttes. I den nye 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. Ohara mfl. (2011) har studert maksimal nedbør for et nedbørsfelt i California ved å anvende en regional skala atmosfæremodell. Vi foreslår å bruke en tilsvarende tilnærming for Norge ved å maksimere modellens initial- og grensebetingelser. Slik tvinges modellen til å beskrive ulike "worst- case" PMP scenarier for forskjellige nedbørsfelt. Tilnærmingen vil også gjøre oss i stand til å studere hvilke kombinasjoner av atmosfæriske forhold som kan føre til PMP i ulike deler av Norge. Analysene skal baseres på historiske hendelser, og re-analysedata vil bli benyttet som atmosfæriske initial og grensebetingelser (Cardoso mfl., 2012; Ohara mfl., 2011). Et slikt modellrammeverk vil i tillegg til å beregne PMP som foreslått av Ohara mfl. (2011) også brukes som verktøy for å beskrive ekstremnedbørklima og for å analysere historiske ekstreme (flomdannende) nedbørsepisoder. Det vil også gi mulighet for å vurdere effekten av klimaendringer på PMP og PMF estimater.

3.2 Vannføringsdata

Vannføringen i et vassdrag er et mål for volumet vann som passerer et tverrsnitt av elven i løpet av en tidsenhet. Vanligvis er det vannstanden som måles kontinuerlig, mens vannføring estimeres ved hjelp av en vannføringskurve som gir relasjonen mellom den vannstanden som måles og vannføringen. Vannføringskurven er bestemt ved at det er utført vannføringsmålinger i et tverrsnitt av elven ved ulike vannstander. I tillegg må ofte kurven ekstrapoleres til store vannføringer, da det av praktiske årsaker mangler målinger for de store og sjeldne vannføringene.

Flomberegninger skal normalt gjøres basert på data som ikke er påvirket av reguleringer, og det er datakvaliteten til uregulerte data som omtales i det følgende. Datakvaliteten vil ha betydning for usikkerheten i en flomberegning. Hvis data fra observerte flommer er usikre, kan det gi systematiske feil når vi skal ekstrapolere fra de usikre observasjonene til hendelser som er så sjeldne (store) at de ikke har vært observert.

Usikkerhet i datagrunnlag kan også skyldes at det er korte dataserier, eller at det mangler dataserier i nedbørsfeltet for aktuell dam. Usikkerheten er da knyttet til hvor representative dataene er. Dette diskuteres i kapitlet om frekvensanalyse og nedbør-avløpsmodellering.

3.2.1 Usikkerhet i vannføringsdata

Det kan være unøyaktigheter og feil i vannstandsmålingene som gir seg utslag i unøyaktige vannføringsestimater. Feil kan også oppstå når verdier skal overføres fra en målestasjon til databasen. I tillegg kan flommene ødelegge måleutstyret slik at data for den høyeste vannføringen i en flomepisode mangler eller må estimeres.

Norges vassdrags- og energidirektorat er den nasjonale faginstusjonen i hydrologi, og har ansvaret for den nasjonale hydrologiske databasen. De eldste dataene i databasen er basert på manuelle daglige observasjoner av vannstanden. Disse observasjonene antas å representere gjennomsnittsverdier for et døgn, men kan avvike i større eller mindre grad fra det faktiske døgngjennomsnittet. I dag registreres vannstanden automatisk og kontinuerlig.

Viktigst for å få mest mulig presise flomvannføringer er det å ha vannføringsmålinger under flomforhold slik at man reduserer behovet for ekstrapolasjon av vannføringskurven. Ideelt sett bør man etablere vannføringskurven for et tverrsnitt av elven hvor vannføringen ikke går over elvebredden ved flomvannføring. I de aller fleste tilfeller vil imidlertid store flommer gi oversvømmelser. Fordi segmentet ved oversvømmelse er vesentlig endret fra segmentet ved lavere vannføring, kan feilene ved ekstrapolasjon bli store. For å sikre et riktig forhold mellom vannstand og vannføring i slike tilfeller, er det spesielt viktig å gjennomføre vannføringsmålinger under flom.

Et annet problem er at flommene er kortvarige og sjeldne slik at det er vanskelig å være på målestedet når vannføringen når maksimum. I tillegg kan det være forbundet med så stor risiko å måle vannføring under flom, at det ikke kan gjøres. Selv om man i Norge de siste årene har hatt stort fokus på å måle vannføring under flom, og måleutstyret generelt har blitt bedre og metoder for automatisk måling av flomvannføring er under utvikling, lar flommålinger seg ikke alltid gjennomføre i praksis. Basert på et utvalg vannføringsstasjoner (864) vet vi at ca 22% har dårlige/meget dårlig kurvekvalitet på flom, 33% har middels gode kurver på flom og 45% har bra/meget bra kurver på flom.

I Svelle mfl. (2006) beskrives hvordan man kan bruke en endimensjonal (1D) hydraulisk modell, HEC-RAS, som hjelpemiddel for å bestemme vannføringskurven for flomverdier. Metoden brukes også i praksis både for å ekstrapolere vannføringskurver som har svakt datagrunnlag for høye vannføringer, og for å etablere foreløpige vannføringskurver for nye stasjoner med minimalt målegrunnlag. Usikkerheten ved ekstrapolasjon av vannføringskurver basert på HEC-RAS vil variere avhengig av hvor mange vannføringsmålinger som er tilgjengelige for kalibrering av modellen samt om elva endrer karakter (strømforhold) ved større vannføringer som ikke lar seg modellere i en 1D-modell. Avhengig av antall vannføringsmålinger, vannhastighet ved vannstandsmålestedet, utformingen av elvestrekningen og type bunnsstrat i elvestrekket vil usikkerheten grovt anslått ligge på mellom 5 og 30%.

Noen steder har man valgt å støpe profiler slik at man har et kjent entydig forhold mellom vannstand og vannføring. I Norge er det mer vanlig å ha et naturlig profil. Målestedet velges da i størst mulig grad slik at profilendringer over tid unngås, for eksempel fast fjell,

men det kan likevel skje endringer. Under flom vil profilene være særlig utsatt for forandringer, for eksempel på grunn av avsetning av sedimenter eller bortvasking av stein og sedimenter i profilet. Det er gjennomført flere studier knyttet til usikkerhet i vannføringskurven og muligheter for å redusere denne usikkerheten. Her har fokuset vært på bruk av statistiske metoder som avanserte sannsynlighetsbetraktninger, "resampling" og Bayesianske metoder. Det er blant annet sett på ulike metoder for inferens og hvordan usikkerheten forplanter seg i videre hydrologiske analyser som for eksempel flomfrekvensanalyse. Arbeidene inkluderer Petersen-Øverleir (2004, 2006); Petersen-Øverleir og Reitan (2005); Reitan og Petersen-Øverleir (2008, 2009).

3.2.2 Modellering av vassføringskurver

Ei kjelde til uvisse for å finne dimensjonerande flom for dammar (Q_{500} og Q_{1000}) er vassføringskurva for målestasjonane, det vil seie for svært høge vassføringar. Vassføringskurvene må i dei fleste tilfeller ekstrapoleras til dei høgaste verdiane sidan det kan vere ei utfordring å få målt på dei mest ekstreme flomverdiane på grunn av tilgang til målestad, logistiske og metodiske problem og fare for personell ved arbeid under ekstreme tilhøve. Mange norske målestasjonar har difor berre målingar opp til nivå rundt middelflom. Og der det er mogleg å måle på høgare nivå kan det ta svært lang tid å etablere gode kurver for flomvassføringar, då det naturlegvis går lang tid mellom dei store flommane. Målingar før cirka 1995 (da ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler, ble tatt i bruk) har i tillegg stor uvisse på grunn av avgrensingar tilknytt teknologi og måleutstyr. Dette er ein grunn for å søke etter alternative metodar som vil sikre kurvekvalitet ved ekstreme vassføringar.

To aktuelle metodar som kan brukast for å etablere kurver for svært høge vassføringar er fysiske laboriemodellar og numeriske simuleringsmodellar. I den siste kategorien finn vi éindimensjonale (1D) vannlinjemodellar som til dømes HEC-RAS og to- og tredimensjonale (2D og 3D) hydrauliske modellar som til dømes Mike2D eller SSIIM.

HEC-RAS er allereie brukt av NVE for å simulere vannlinjer for høge vassføringar for ein del målestasjonar, til dømes Sæther (2000) og Svelle mfl. (2006). I fleire tilfelle viser modellen at den er i stand til å produsere gode resultat samanlikna med målingar, men det er og rapportert vanskar ved å bestemme Manningstal der vi har kompliserte straumtilhøve. Fordelen med bruk av 1D-modellar er relativ enkel oppmåling av profil og at programmet er enkelt i bruk. Ulemper er knytt til kalibrering av modellen (bestemme Manningstal) for store vassføringar, der vi ofte ikkje har data, og vi ender ofte opp med å ekstrapolere kalibreringa frå lågare vassføring. Det er og uvisse knytt til korleis 1D-tilnærminga handterer hydraulikken ved ekstreme vassføringar og der geometrien gir komplisert straum.

Eit alternativ til bruk av 1D-modellar er å bruke ein 3D hydraulisk modell som kan handtere kompliserte straumtilhøve. I ein slik modell er ein ikkje like avhengig av god kalibrering av modellen for å få gode resultat i og med at 3D-modellen simulerer hastighet i alle dimensjonar og dermed handterer langt fleire straumtilhøve enn det ein kan få til i ein 1D-modell. Så langt vi veit er det ikkje rapportert bruk av 3D-modellar for å fin-

ne vannstand-vassføringskurver for målestasjonar, men slike modellar har i dei seinare åra vore brukt til å simulere overløpskurver for dammar ved NTNU (Jacobsen og Olsen, 2010; Vingerhagen, 2011). Simuleringar av vassføringskurver vil på mange måtar vere lik simuleringar for overløpskurver med tanke på data og gjennomføring. Resultata frå desse modelleringsprosjekta viser at den numeriske modellen kan reprodusere overløpskurvene som er funne ved fysiske skalamodellar på ein svært god måte, og der vi har kompliserte hydrauliske tilhøve. Samanlikna med den 1-dimensjonale modellen krev 3D-modellen meir data om geometrien rundt målestasjonen for å få godt resultat, men til gjengjeld har modellen større potensiale til å handtere komplisert hydraulikk og straumforhold som ikkje 1D-modellen kan handtere på ein god måte. Med utvikling av oppmålingsteknologi er det og stadig enklare og relativt rimelegare å skaffe godt data-grunnlag for 3D-modellering.

Det finst eksempel på fysisk modellering av vassmerke med spesielt utfordrande hydraulikk, til dømes gjorde Traae og Grøttå (1987) og Aarnseth (1988) ei studie av vassmerket Byrteåi i Telemark i vassdragslaboratoriet. Dette er eit vassmerke som har vanskelege straumtilhøve og tilhøyrande usikker oppmålt vassføringskurve. Bruk av laboratoriemodell krev og grundig oppmåling av geometridata i felt, samt bygging av den fysiske modellen i laboratoriet før eksperiment kan køyrast.

3.3 Kvalitetskontroll

Alle data i NVEs databaser skal kvalitetskontrolleres før de lagres. I retningslinjer for flomberegninger (Midttømme mfl., 2011) kreves i tillegg at data som skal benyttes i en flomfrekvensanalyse gjennomgår en ny kvalitetskontroll. Dette inkluderer en vurdering av kvaliteten på vannføringskurven for høye vannføringer og en vurdering av de mest ekstreme vannstandene for å avdekke mulige registreringsfeil. Informasjon om kvaliteten på vannføringskurven for ulike vannføringsnivåer finnes i NVEs databaser, men ofte mangler kommentarer om datakvaliteten. Det ville for eksempel vært nyttig om det forelå informasjon om hvorvidt en verdi var observert, estimert basert på nabostasjoner eller modellert. Det kan også skje at man er klar over at datakvaliteten er dårlig uten at det er lagt inn informasjon om dette i databasen.

NVE har gjennomført en evaluering av metodene som brukes for flomberegninger, inkludert en vurdering av informasjon om datakvalitet (Wilson mfl., 2011). Det er også startet et prosjekt, "Kvalitetsløftet" blant annet med formål å vurdere og å systematisere informasjon om datakvaliteten i NVEs databaser. Vannføringsserier som er egnet for flomberegninger skal merkes, og man skal åpne for muligheten til å gi mer utfyllende kommentarer om kvaliteten på deler av en tidsserie. Det er foreslått å utarbeide spesifikke kriterier for å bestemme god, middels og dårlig datakvalitet.

Fordi det kan være vanskelig å kvantifisere datakvaliteten er det i "Retningslinjer for flomberegninger" (Midttømme mfl., 2011), tatt inn en bestemmelse om en kvalitativ klassifisering av usikkerhet basert på det tilgjengelige hydrologiske datagrunnlaget og hvordan dette er benyttet i flomberegningen (se Kap. 2).

3.4 Feltegenskaper

Ved bruk av regionale flomformler og beregning av modellparametrer i nedbør-avløp-modeller må man kjenne bestemte fysiografiske og klimatiske egenskaper ved nedbørfeltet, såkalte feltegenskaper. Nedbørfeltets areal vil alltid være nødvendig å kjenne. Andre aktuelle feltegenskaper er midlere spesifikke årsavløp, midlere årsnedbør, effektiv sjøprosent, snaufjellprosent, feltaksens lengde, hovedelvas gradient og høydeforhold. Disse egenskapene kan bestemmes ut fra et godt kartgrunnlag, for eksempel kan de hentes/beregnes på NVEs karttjeneste på www.nve.no. Men, feltegenskapene er også beheftet med en viss usikkerhet. Særlig gjelder dette de klimatiske egenskapene.

4 Frekvensanalyse

Flomfrekvensanalyse er en statistisk metode for å estimere størrelsen på en flom med en bestemt sannsynlighet (eller et bestemt gjentakintervall). Analysen er basert på observerte flomdata, enten analyser av enkeltserier, eller basert på flere sammenliknbare stasjoner, regional flomfrekvensanalyse. En kort vannføringsserie kan også forlenges ved hjelp av modellberegninger før en flomfrekvensanalyse gjennomføres. En detaljert beskrivelse av flomfrekvensanalyse i Norge, med relevante referanser finnes i Wilson mfl. (2011). En sammenlikning av flomfrekvensanalyse i 17 land i Europa, inkludert planlagte forskningsaktiviteter finnes i Castellarin mfl. (2012). I det følgende gis kun et kort sammendrag som i hovedsak er basert på disse rapportene.

En flomfrekvensanalyse er basert på forutsetningen om at vi har en identisk og uavhengig fordeling:

- At de observerte flomhendelsene representerer samme underliggende prosess og at denne kan beskrives ved hjelp av en sannsynlighetsfordeling
- De observerte flomhendelsene er tilfeldige, uavhengige hendelser

Brudd på disse forutsetningene gjør estimatene mer usikre. Dette er ikke et stort problem ved estimater av de mindre sjeldne flomhendelsene med lave gjentakintervaller. Ved estimater av store flommer, derimot, kan et brudd på forutsetningene føre til svært usikre estimater.

Antakelsen om samme underliggende prosess stemmer ikke dersom man blander flomhendelser som har ulik årsak, regnflommer, snøsmelteflommer og flommer som skyldes en kombinasjon av disse prosessene. I Norge har mange store innlandsvassdrag årvisse vårflommer som hovedsakelig skyldes snøsmelting. Flomstørrelsene her stiger bare moderat mot høyere gjentakintervaller. Høstflommene som skyldes regn, stiger ofte raskere mot høyere gjentakintervaller

Klimaet fluktuerer på en slik måte at våte og tørre år har en tendens til å følge etter hverandre. Vi snakker om den såkalte "Josef-effekten" fra bibelen, med sju fattige og sju rike år. Med klimaendringer kan vi også få gradvise systematiske endringer, for eksempel en

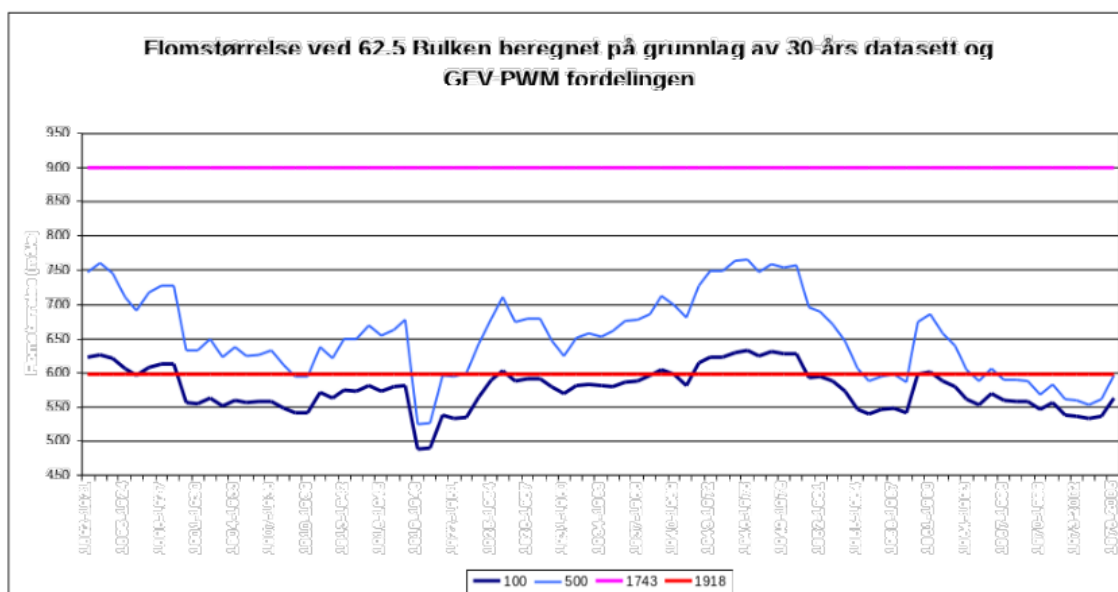
gradvis økning i flomstørrelsene. Dessuten kan menneskelige inngrep i et vassdrag som reguleringer, vannuttak og avskoging, føre til brå eller gradvise endringer i flomforholdene.

Ved beregning av dimensjonerende flom må også momentanverdier estimeres. Dersom tilstrekkelig lange tidsserier med fin tidsoppløsning foreligger, anbefales at man gjør flomfrekvensanalyse direkte på momentanverdiene. Døgnmiddelverdier er imidlertid mer vanlig, særlig over en lengre periode. Momentanverdier estimeres da ved hjelp av en empirisk sammenheng mellom døgnmiddel- og momentanverdi. De empiriske likningene kan gi urealistiske verdier, særlig for store nedbørfelt og nedbørfelt med mye innsjø.

4.1 Analyse av enkeltserier

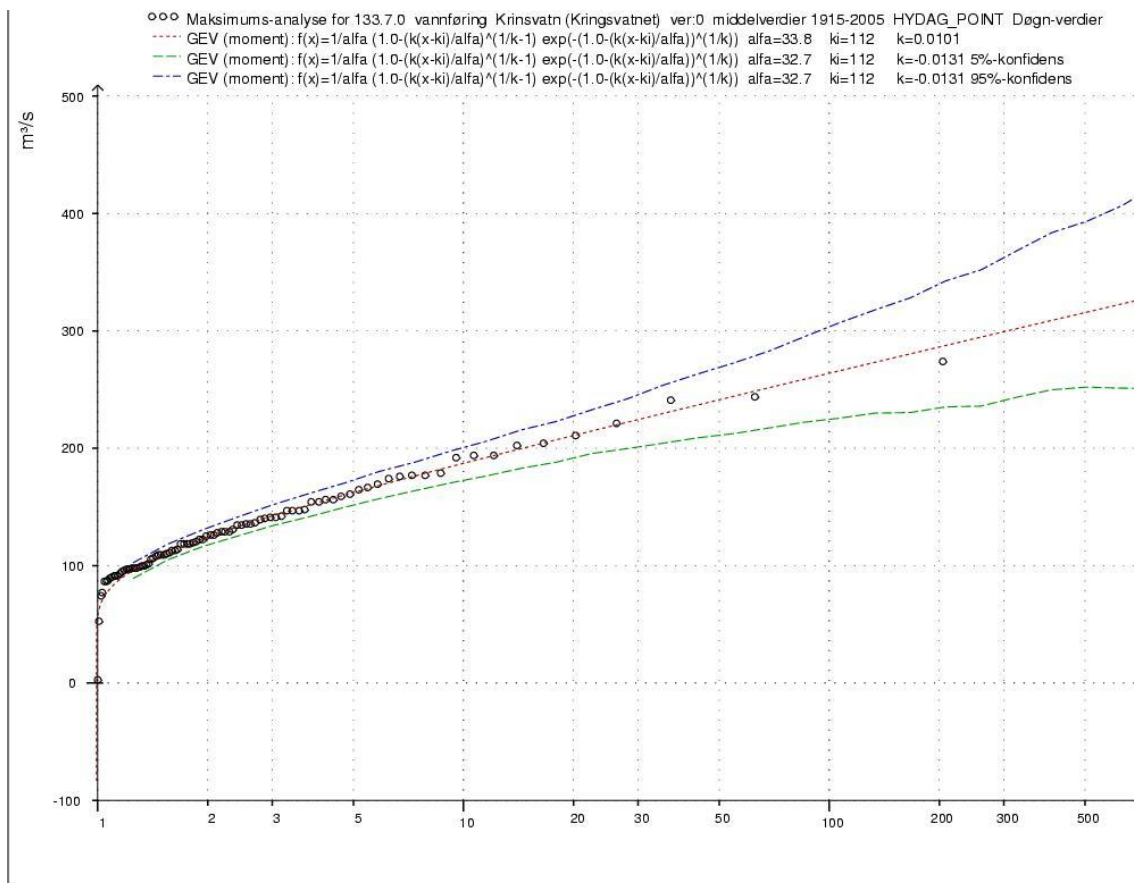
4.1.1 Utvalg av flomhendelser

Selv om vi har en relativt lang tidsserie med observasjoner, vil den bare representere et utvalg av de vannføringene som har vært ved stasjonen. Det finnes tommelfingerregler for hvor mange observasjoner en bør ha for å beregne flommer med bestemte gjentakintervall, for eksempel at man ikke bør estimere gjentakintervaller større enn to ganger serielengden. Slike regler kan ofte ikke følges i praksis, men man kan gjøre estimatene mer robuste ved å legge inn anbefalinger om valg av bestemte fordeling eller metoder avhengig av utvalgets størrelse.



Figur 2. Variasjoner i estimatet av 100- og 500- årsflom av underliggende 30-års periode (Bulken målestasjon i Vosso).

Utvalgsusikkerheten kan estimeres på flere måter. I Figur 2 er et eksempel på hvordan 100-års og 500-års-flommen endres avhengig av hvilken 30års periode som ligger til grunn for beregningen. Antatt vannføring for to historiske flommer er også vist. I Figur 3 er usikkerheten estimert ved å gjenta beregningen for ulike utvalg av samme tidsserie, såkalt bootstrap. Vi ser hvordan usikkerheten øker med økende gjentakintervall.



Figur 3. Eksempel på usikkerhetsanlag (95% konfidensintervall) bestemt ved bootstrap. Estimatorene er basert på 91 observerte flomhendelser.

Det er to hovedmåter å velge ut flomhendelser fra en tidsserie, enten den største verdien hvert år (årlig maksimumsserie, AMS) eller alle verdier over en bestemt størrelse ("peak over threshold" serie, POT). Ved å velge dens tørste verdien hvert år eller den største flomverdien med en bestemt flomgenererende prosess, sikres større grad av uavhengighet mellom hendelsene. Ved å velge alle hendelser større enn en bestemt verdi, får en et større utvalg av hendelser, men det vil lettere oppstå avhengighet mellom hendelsene. Det finnes ulike metoder for å sikre uavhengighet mellom hendelser, for eksempel et minimum antall dager mellom verdiene som plukkes ut (et eksempel fra Norge finnes i Engeland m. fl., 2004).

4.1.2 Valg av statistisk fordeling

Det finnes mange statistiske fordelinger som benyttes for flomfrekvensanalyse. For flere av disse er det ingen teoretisk vurdering som forsvarer at de benyttes bortsett fra at de er fleksible og gir god tilpasning til det utvalget av flomhendelser man har. I Coles (2001) beskrives hvordan et utvalg av maksimumsverdier fra blokker med lik størrelse (for eksempel årsmaksimumsverdier) går mot en Generalized Extreme Value-fordeling (GEV), og maksimumsverdier over en høy terskelverdi går mot en Generalized Pareto-fordeling (GP). En diskusjon om temaet finnes i Engeland mfl. (2004). I Castellarin mfl. (2012) er det vurdert hvilken fordeling som i gjennomsnitt passer best for AMS-serier fra Europa

(17 land). Det viser seg ikke uventet, at dette er GEV-fordelingen.

I noen land i Europa eller i noen regioner i ett land, har man valgt å bruke en standardfordeling eller sterke anbefalinger om bruk av standardfordelinger. Av de 17 landene som er sammenliknet i Castellarin mfl. (2012), anbefaler Østerrike, UK og Finland og tre regioner i Tyskland og Spania én standard fordeling. I Italia benyttes to fordelinger. I områder med stor variabilitet i flomforholdene sammenliknes ofte en rekke ulike fordelinger, men det er gjerne noen fordelinger som passer oftere enn andre (gir best tilpasning til observasjoner). I Norge er dette Gumbel med 2 parametre (EV1) eller GEV med 3 parametre. Det er imidlertid viktig ikke bare å tenke på hvilken fordeling som gir best tilpasning til dataene. Hvis en fordeling har et stort antall parametre kan man få en svært god tilpasning til det utvalget man har, men risikerer å få en svært dårlig tilpasning hvis utvalget endres, særlig hvis man får inn en hendelse som avviker fra de opprinnelige, en "outlier". I Norge har man derfor valgt å anbefale at 3-parameter fordelinger bare benyttes dersom man har mer enn 50 år med data. En 2-parameter fordeling anbefales hvis man har 30-50 år med data. For 10-30 års serier anbefales at man i tillegg gjør flomfrekvensanalyse for andre stasjoner i nærheten med lengre serier. Ved mindre enn 10 år med data eller for umålte felt kan regional flomfrekvensanalyse (kap 3.2) benyttes.

4.1.3 Valg av parameterestimeringsmetode og plotteposisjon

Parameterne i en fordeling estimeres basert på de observerte flommene. Det finnes ulike metoder som vil gi ulik tilpasning. For små utvalg anbefales ofte L-momenter (tilsvarer Probability Weighted Moments) som en robust metode (Hosking og Wallis, 1997). Den såkalte Maximum Likelihood-metoden er fleksibel og gir muligheter for å ta hensyn til det hvis dataene ikke er stasjonære, men er mindre robust. Studien i Vedlegg C sammenlikner de ulike parameterestimeringsmetodene på to datasett. I Norge benyttes ofte begge metoder og man velger den metoden som gir best tilpasning til observasjonene. I tillegg vil metoden for plotting av observasjonene, den såkalte plotteformelen, ha betydning for hvilken fordeling som sammenfaller best med observasjonene. Dette diskuteres i Wilson mfl. (2011).

En visuell vurdering av tilpasningen av observerte flomhendelser til ulike fordelinger kan være en fordel fordi man da kan vie de største flommene og "outliere" spesiell oppmerksomhet. Ulempen er at valget er subjektivt og to personer vil da kunne få ulikt resultat. Generelt gjelder at jo mer man standardiserer metodene som brukes jo større grad av enhetlige estimater vil man få, uavhengig av hvem som gjør estimatet. Problemet er at man da risikerer å ikke bruke viktig informasjon om flomforholdene i et vassdrag som kan bidra til å redusere usikkerheten i et estimat. Wilson mfl. (2011) konkluderer med at erfarne flomberegnere bør gis frihet til å bruke sin ekspertise i en beregning, men større grad av standardisering er mulig. Blant annet kan man redusere og standardisere fordelingene som benyttes, bruke bare en parameterestimeringsmetode (L-momenter) og en plotteformel.

4.2 Regional flomfrekvensanalyse

Regional flomfrekvensanalyse benyttes når man ikke har tilstrekkelig data til å kunne gjennomføre en analyse av en enkeltserie. Flomdata fra en eller flere stasjoner i en "region" brukes for å få et estimat på det aktuelle stedet. Vi kan si at informasjon om flommer i regionene erstatter informasjon om flommer på det aktuelle stedet. En detaljert beskrivelse av prinsippene for regional frekvensanalyse finnes for eksempel i Hosking og Wallis (1997). Som for analysen av enkeltserier, gjelder antakelsen om at observasjonene i et målepunkt er identisk og uavhengig fordelt. I tillegg forutsettes: Observasjonene ved forskjellige målepunkter er uavhengige av hverandre. Frekvensfordelingen i forskjellige målepunkter er identiske bortsett fra en skaleringsfaktor. Den matematiske beskrivelsen av en regional vekstkurve er korrekt spesifisert.

Det er sannsynlig at det er avhengighet mellom observasjonene i nærliggende målepunkter. Dette betyr at utvalget av flomhendelser i realiteten er mindre og usikkerheten i estimatene øker. De to siste antakelsene stemmer sjelden, men man kan ved å bruke robuste metoder, likevel få relativt gode estimater av flommer med høye gjentaksintervall.

Det er flere steg i en regional flomfrekvensanalyse:

- Kvalitetskontroll av hver enkelt serie, inkludert at dataene er identisk, uavhengig fordelt
- Definisjon av homogene regioner. En region er da et utvalg stasjoner hvor frekvensfordelingen (etter en passende skalering) er omtrent den samme. Man behøver ikke å ha geografisk sammenhengende regioner, men det er viktig at de egenskapene som bestemmer frekvensfordelingen har omtrent samme verdi. Homogeniteten til den enkelte region må testes, for eksempel ved bruk av L-momenter (de statistiske momentene i en fordeling).
- Bestemme indeks-flommen (ofte middelflom eller medianflom). Dersom estimatet skal gjøres for et nedbørfelt uten målinger, må en indeks-flom for feltet bestemmes. Oftest gjøres dette ved hjelp av såkalt regional regresjon. Det betyr at man ved hjelp av stasjonene med målinger har funnet en regresjonssammenheng mellom indeks-flommen og felt- og klimaegenskaper for nedbørfeltet.
- Valg av passende regional frekvensfordeling. Her finnes ulike tester for å finne den fordelingen som er best egnet.
- Estimering av frekvensfordeling for regionen, for eksempel ved hjelp av en regional L-moment algoritme.

Hvordan man kan gjennomføre disse stegene er beskrevet i Wilson mfl. (2011). Metoden brukt i Norge er beskrevet i detalj i Sælthun mfl. (1997). Generelt anbefales ikke metoden for små nedbørfelt (< 50 km²) og den må brukes med forsiktighet for nedbørfelt < 100 km².

4.2.1 Inndeling i homogene regioner

Det finnes mange statistiske metoder for inndeling i regioner uten at man kan si at den ene er bedre enn den andre. Ofte brukes en inndeling i geografiske regioner basert på geografiske, hydrologiske og klimatiske feltegenskaper. Deretter benyttes Cluster-analyse som er basert på korrelasjonen mellom flommene på ulike stasjoner, for inndeling i homogene grupper. Et alternativ er den såkalte Region of Influence metoden (ROI) brukt i Italia og UK (Castellarin mfl., 2012). Da estimeres frekvensfordelingen basert på en gruppe stasjoner med like egenskaper til det umålte feltet. Disse egenskapene kan for eksempel være feltareal, årsmiddelnedbør, innsjøprosent og bratthet i nedbørfeltet. Stasjoner med mest like egenskaper vektet høyere. I Østerrike benyttes en metode kalt top-kriging som tar hensyn til elvenettverket og nedbørfeltets areal. Denne metoden egner seg best dersom man har et tett målenett og mange målestasjoner i samme nedbørfelt. Til syvende og sist er det viktigste at de endelige regionene er noenlunde homogene.

I Norge er landet først delt inn i tre klasser basert på når på året årets største flom normalt opptrer (1: snøsmelteflom om våren, 2: sommer-/høstflom generert av intens nedbør, 3: regnflom når som helst på året). For de tre første klassene er det så gjennomført en hierarkisk cluster-analyse. Den resulterte i 9 regioner. I tillegg kommer en bre-region.

En metode som ikke er forsøkt i Norge, er å generere en spesielt homogen region til et spesielt punkt i et vassdrag. Det vil si at man, hvis det er mulig, velger serier som har egenskaper som også er typiske for det nedbørfeltet man skal gjøre beregningen for. Her kan prinsippene for ROI-metoden benyttes.

4.2.2 Bestemme indeks-flommen

Vanligvis brukes middelflommen eller medianflommen som indeks-flom. For et nedbørfelt med lite eller ingen data bestemmes indeks-flommen basert på nærliggende målestasjoner eller regionale regresjonslikninger. Undersøkelser har vist at regionale regresjonslikninger gir vesentlig større usikkerhet i estimatet enn hvis det foreligger noen få målinger.

I Norge brukes oftest middelflommen som indeks-flom, men medianflommen brukes også. Hvis data er tilgjengelig ved en nærliggende stasjon bestemmes indeks-flommen ved å skalere med hensyn på feltareal. Siden feltarealet også har en betydning for spesifikt avløp velges fortrinnsvis nabofelt med omtrent samme feltareal som det umålte feltet. Generelt anbefales 10 år som et minimum for å estimere indeks-flommen, men i Pettersson (2008) vises at minst 30 år vanligvis er nødvendig for å få stabile verdier.

4.2.3 Valg av regional frekvensfordeling

Den regionale frekvensfordelingen bestemmes ved å midle frekvenskurvene for stasjonene i en homogen region. Dette er også gjort for Norge. Ulike fordelinger ble vurdert, men best tilpasning fikk man ved å bruke GEV-fordelingen og L-momenter for å estimere parametrene.

4.3 Pågående og planlagt FoU

I mange land i Europa har det vært gjennomført eller det pågår, nasjonale forskningsprosjekter for å sammenlikne ulike flomfrekvensanalysemetoder. Dette gjelder også i Norge. Metoden som anbefales avhenger delvis av de hydrologiske forholdene (klima og feltegenskaper), datatilgang og kvalitet og hensikten med analysen. I Castellarin mfl. (2012) gis en oversikt pågående arbeid i de enkelte land (inkludert Norge). Arbeidene omfatter:

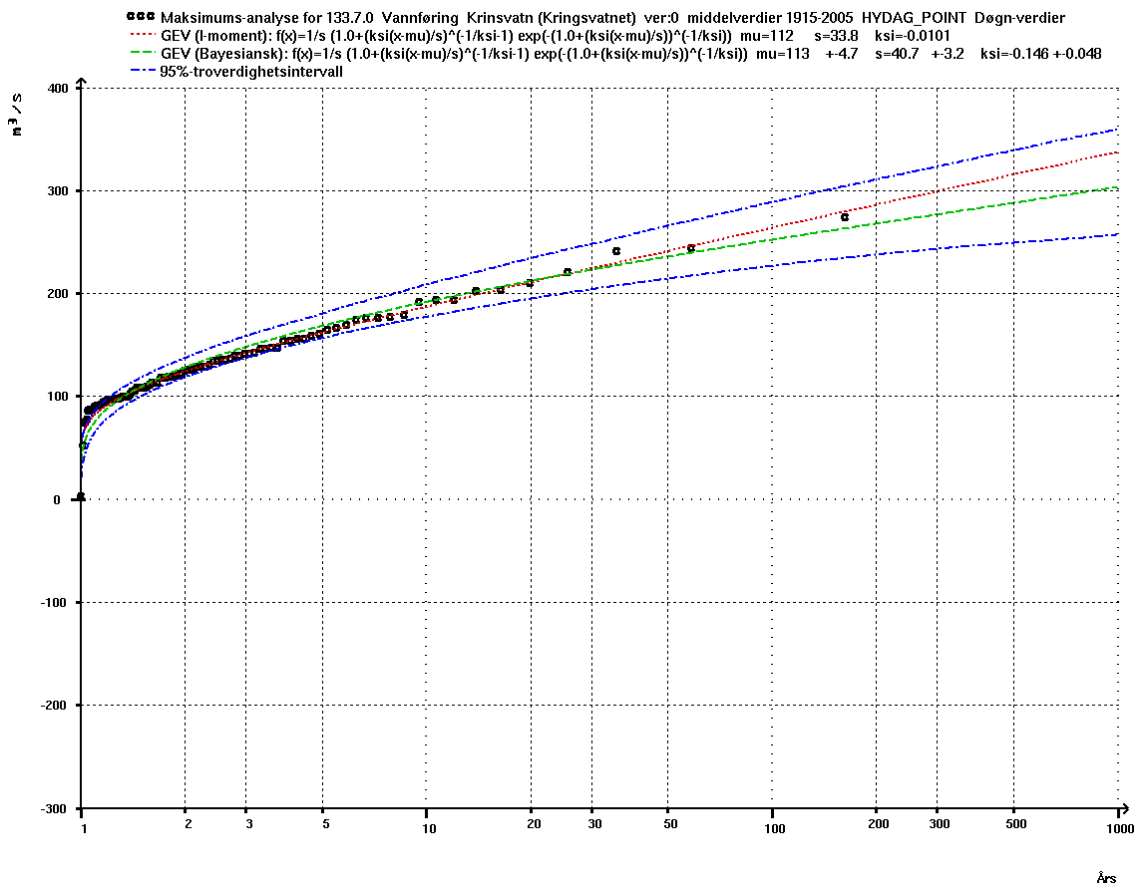
- Systematisering og forbedring av informasjon om feltegenskaper basert på digitale terrengmodeller
- Etablering av flomdatabaser
- Forbedrede estimater av indeks-flommen og L-momenter
- Multivariat analyse av sammenhengen mellom momentanflom, flomvolum og flomvarighet blant annet ved bruk av Copula-funksjoner
- Bruk av Bayesiansk statistikk for å inkludere ikke-systematisert historiske observasjoner av oversvømmelser
- Regional frekvensanalyse basert på simulerte tidsserier (MCMC-basert)
- Oppdatering av regionale frekvensanalyser inkludert uttesting av alternative metoder for inndeling i homogene regioner inkludert ROI-metoden.

Selv om Bayesiansk statistikk så langt ikke har inngått som en del av operasjonelle flomfrekvensanalyser, er dette i økende grad et tema innen forskningen. Også i Norge er Bayesiansk frekvensanalyse lagt inn som en standardmetode (Figur 4) i NVEs programsystem. En sammenlikning av Bayesiansk frekvensanalyse og andre parameterestimeringsmetodene for korte og lange dataserier er omtalt i Vedlegg C.

Metoden er dessuten lovende med hensyn på å øke påliteligheten i flomfrekvensanalyse ved å utvide kunnskapen om flomhendelser enten ved å ta inn informasjon om historiske hendelser fra før tiden med systematiske målinger (for eksempel Reis og Stedinger, 2005) eller ved å kombinere data fra flere stasjoner i en regional analyse (for eksempel Nguyen mfl., 2013). Det er også en stor fordel at metoden gir informasjon om usikkerhet ved at usikkerheten i parameterne i en fordeling tas hensyn til. I Vedlegg A er det gitt et eksempel på hvordan metoden fungerer ved å ta inn informasjon om historiske hendelser når den observerte dataserien er kort.

I mange land pågår også arbeid for å standardisere bruk av metoder og lage anbefalinger og retningslinjer for flomberegninger avhengig av datatilgang, feltstørrelse og gjentakintervall.

Ettersom det er over 15 år siden sist det ble gjennomført en regional flomfrekvensanalyse for Norge, vil det være nyttig å vurdere om en mer optimal regioninndeling er mulig både fordi nye data er tilgjengelig og ved bruk av for eksempel alternative statistiske metoder eller prinsippene i ROI-metoden. Større datautvalg gjør det også mulig å forbedre regresjonslikningene for å bestemme indeks-flommen.



Figur 4. Eksempel på Bayesiansk statistikk (95% troverdighetsintervall) bestemt ved bootstrap. Estimaterne er basert på 91 observerte flomhendelser.

Det arbeides også med en revisjon av den empiriske sammenhengen mellom døgnmidelflom og momentanflom i ulike regioner i Norge.

5 Nedbør-avløps-modeller

Nedbør-avløps-modellering er et alternativ til frekvensanalyse for å bestemme flomstørrelser. I slik modellering beregnes avrenningen basert på en nedbørinput ofte kombinert med snøsmelting. Modellen som beskriver nedbørfeltets respons på nedbør og snøsmelting, kan være mer eller mindre kompleks. Inngangsdataene i modellen kan simuleres på ulik måte. Dersom dimensjonerende flom er påregnelig maksimal flom (i Norge dammer av sikkerhetsklasse 3 og 4) kan denne ikke beregnes ved ren frekvensanalyse av flomvannføring, og man må bruke en form for nedbør-avløps-modell. Bruk av en slik modell er også en fordel dersom tilgangen på nedbørdata er bedre enn tilgangen på vannføringsdata. Dessuten er nedbør generelt mer regional konsistent en vannføring.

Det finnes mange ulike modeller og systemer. Dette er delvis forårsaket av at de hydrologiske prosessene i ulike regioner er forskjellige (for eksempel snøsmelting og fordampning), ulike brukerbehov og varierende tilgang på vannførings- og nedbørdata. En sammenlikning av 3 nedbør-avløp metoder og flomfrekvensanalyse for to nedbørfelt er gitt i Vedlegg B.

5.1 “Hendelsesbaserte” metoder

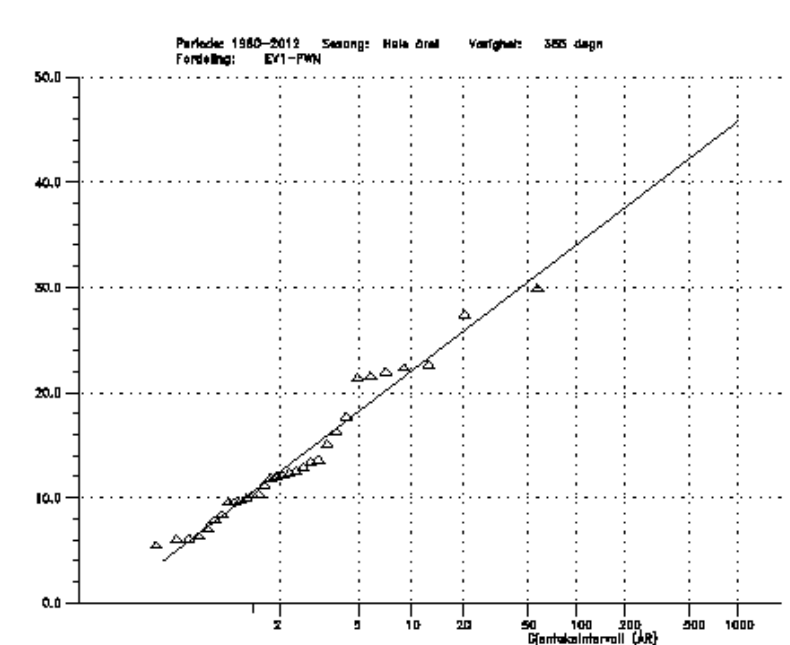
De enkleste formene for beregningene av dimensjonerende flom ved bruk av nedbør-avløps-modeller er såkalt hendelsesbaserte. Slike simuleringer er kjørt for en begrenset tidsperiode (dvs. noen dager), og de omfatter bare nedbørfeltets respons til en ekstrem hendelse (ekstremnedbør ofte kombinert med snøsmelting). Det betyr i praksis at en T-års eller PMP-nedbørsekvens må brukes til å simulere en T-års flom eller PMF. Fordeler med metoden er at den er rask og enkel i operativ bruk og derfor egner seg dersom en skal foreta mange beregninger og hvis personer med begrenset kompetanse om hydrologisk modellering skal bruke metoden. Metoden anses også som relativt robust. Dessuten kan man bruke metoden også for nedbørfelt hvor man ikke har observasjoner fordi de hydrologiske modellene er veldig enkle og kan brukes uten kalibrering. Det er imidlertid en ulempe at man antar at en T-års nedbørhendelse automatisk fører til en T-års flom, siden dette ikke nødvendigvis er i overensstemmelse med virkeligheten, særlig hvis snøsmeltebidraget er stort.

Operasjonelt er det en hendelsesbasert tilnærming som benyttes i Norge. For en detaljert beskrivelse vises det til Wilson mfl. (2011) og Midttømme mfl. (2011). Metoden ble utviklet på 1980-tallet av NVE og er siden noe modifisert. Nedbør-avløps-modellen som vanligvis benyttes, PQRUT, er en enkel modell med 3 parametre. Parameterverdiene bestemmes ved hjelp av empiriske sammenhenger basert på nedbørfelt egenskaper (som årsmiddelavrenning, relieff og effektive sjøprosent), og modellen kalibreres som hovedregel ikke. Input i modellen er nedbør og snøsmelting, mens man gjør en antakelse

om nedbørfeltets metningsgrad basert på antakelser om et initialt markvannsinhold og vannføring. Et alternativ, til den rent hendelsbaserte nedbør-inputen og simulering av en begrenset tidsperiode, er å bruke en bestemt dimensjonerende nedbørsekvens med en lang hydrologisk simulering som tar hensyn til varierende hydrologiske forhold. En slik metode brukes i Sverige, med HBV-modellen som nedbør-avløps-modell. Først kalibreres modellen basert på historiske data. I denne prosessen beregnes blant annet bidraget fra snøsmelting og markvannsinholdet. Så erstattes observert nedbør med den dimensjonerende nedbørsekvensen. Den største flomverdien i den simulerte vannføringsserien benyttes så som dimensjonerende verdi. Denne metoden forutsetter at den verste mulige kombinasjonen av nedbørfeltets metningsgrad og bidrag fra snøsmelting kan simuleres basert på historiske inndata for nedbør og temperatur. Dessuten må man ha tidsserier av nedbør, temperatur og vannføring for å kunne kalibrere modellen eller en strategi for ekstrapolasjon til umålte nedbørfelt.

5.1.1 Eksempel på bruk av PQRUT

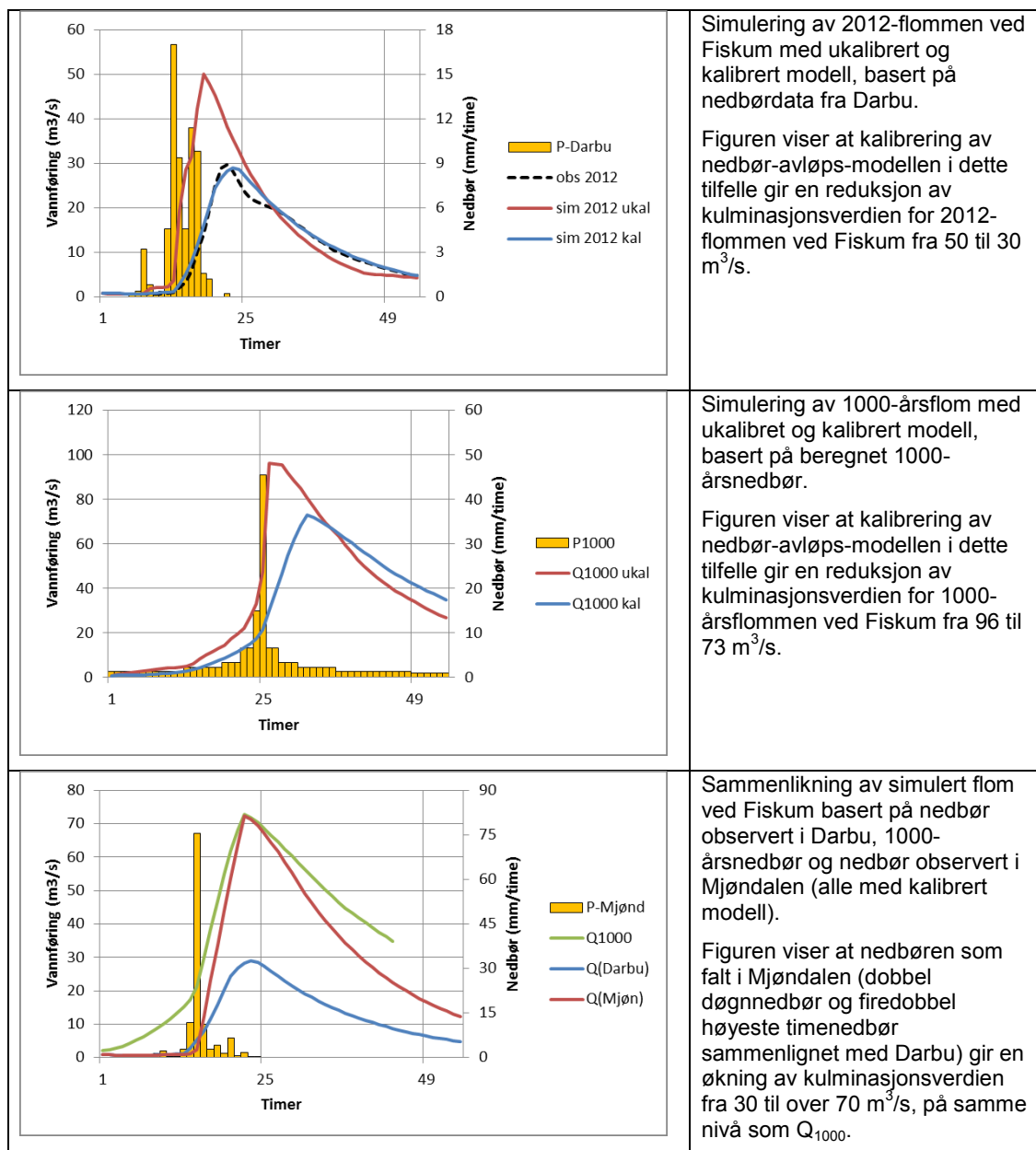
Nedre Eiker opplevet i august 2012 en vær-situasjon med ekstrem nedbør og flom i flere lokale vassdrag. På det meste ble det registrert 80-90 mm på en time i Krokstadelva og Mjøndalen og ca. 140 mm på 24 timer. Basert på en lengre nedbørserie fra Drammen med fin tidsoppløsning tilsvarte dette ca. 3 ganger en 200-års hendelse for de fleste varigheter. Beregning av 1000-års nedbør etter standard metodikk gir for dette området verdier på 50 mm for en time og 135 mm for 24 timer. Ut fra disse verdiene var det tidligere beregnet en flomkulminasjon i Krokstadelva (oppstrøms Årbogen) på 2068 l/s/km². Vannføringsestimater basert på vannlinjebetraktninger utført av NVE antyder en maksimal vannføring lenger nede i vassdraget i 2012 på ca. 1800 l/s/km².



Figur 5. Flomfrekvensanalyse for 12.192 Fiskum (Gumbel-fordelingen - kulminasjonsverdier).

Da det ikke finnes sammenhengende registreringer av flommens forløp i noen av de mest

berørte vassdragene, har data fra den nærliggende vannføringsstasjonen 12.193 Fiskum blitt analysert. Her finnes også nedbørsobservasjoner med timesoppløsning fra Darbu rett ved selve vannføringsstasjonen. Nedbørfeltet til Fiskum er ca. 3 ganger så stort som for Krokstadelva. Figur 5 viser en frekvensanalyse med Gumbelfordelingen for kulminasjonsverdier til årsflommene ved Fiskum, hvor estimert 1000-årsflom tilsvarende ca. 900 l/s/km². Kulminasjonsverdien i 2012 tilsvarte her i underkant av 600 l/s/km².



Figur 6. Simuleringer med PQRUT.

Observerte data for 2012 er sammen med nedbør-avløps-modellen PQRUT benyttet for å belyse problemstillingen rundt bruken av nedbør-avløps-modeller til flomberegninger. Med henvisning til Figur 6 er følgende flomforløp beregnet:

- (1) Observerte forløp ved Fiskum i 2012.

- (2) Simulert forløp basert på nedbørdata fra Darbu og modell-parametere bestemt ut fra ligninger i Midttømme mfl. (2011).
- (3) Simulert forløp basert på nedbørdata fra Darbu og modell-parametere kalibrerte på 2012- flommen.
- (4) Simulert forløp basert på beregnet 1000-årsnedbør fra MI og modell-parametere bestemt ut fra ligninger i Midttømme mfl. (2011).
- (5) Simulert forløp basert på beregnet 1000-årsnedbør fra MI og modell-parametere kalibrerte på 2012-flommen.
- (6) Simulert forløp basert på nedbørdata fra Mjøndalen og modell-parametere kalibrerte på 2012- flommen.

Konklusjonene av dette er at kalibrering av nedbør-avløpsmodellen kan ha stor betydning for resultatet.

5.2 “Semi-kontinuerlig” og “kontinuerlig” modellering

Det er også mulig å benytte stokastisk simulering av nedbøren, for så å simulere 1000 år eller mer med vannføring (kontinuerlig simulering - se Boughton og Droop (2003). Den simulerte vannføringsserien benyttes for å beregne flomfrekvensene. Også i såkalte semi-kontinuerlige simuleringer (Paquet mfl., 2013) simulerer man nedbør, men da mange enkeltstående nedbørhendelser som erstatter nedbørhendelsene som har ført til flomtopper i en observert tidsserie. Disse hendelsene brukes så som input til den hydrologiske modellen og de simulerte flomhendelsene brukes for å bestemme sannsynlighetsfordelingen til flom i nedbørfeltet. Med disse metodene vil nedbørfeltets metningsgrad og bidraget fra snøsmelting beregnes automatisk, men resultatet er svært avhengig av den simulerte nedbørsekvensen. Det finnes et utall måter å simulere nedbøren på. En stor fordel med slike metoder er at en fordeling av flomhendelser som i prinsippet ligner på den observerte flomserien, bygges opp i løpet av simuleringen. Dermed bør det bli en bedre overensstemmelse med statistisk flomfrekvensanalyse.

Ulempen er at metodene krever god erfaring både med nedbøranalyser og hydrologisk modellering. Dessuten er man avhengig av vannføringsdata for å kalibrere nedbør-avløps-modellen. Det er derfor få eller ingen eksempler på operasjonell bruk av semi-kontinuerlig eller kontinuerlig modellering for nedbørfelt uten observasjoner.

5.3 Pågående og planlagt FoU

Det pågår for tiden uttesting av semi-kontinuerlig nedbør-avløps-modellering for nedbørfelt i Norge (SHADEX-metoden) og resultatene sammenliknes både med vår tradisjonelle hendelsesbaserte metode (PQRUT) og metoden som benyttes i Sverige. I Vedlegg B er det vist to eksempler hvor disse metodene er sammenliknet med flomfrekvensanalyse. Dette arbeidet kan utvides, gjerne i samarbeid med pågående aktiviteter i andre land. Blant annet kan dette inkludere utvikling av stokastisk nedbørsimulering basert på vær-typeklassifiseringer for ekstremnedbør i Norge og uttesting av metoden for nedbørfelt som representerer ulike hydrologiske forhold i Norge. Det kan også være aktuelt å se på

en rekke aspekter ved PQRUT:

- Revidere utvalget av representative dimensjonerende nedbørhendelser i ulike regioner og for ulike sesonger i Norge
- Vurdere ulike metoder for å estimere det kombinerte bidraget fra regn og snøsmelting ved beregning av ekstreme flomhendelser
- Spesifisere typiske markvannsverdier før store flomhendelser for ulike sesonger for nedbørfelt i ulike regioner
- Vurdere behovet for bruk av forskjellige empiriske ligninger for parametrene i PQRUT i forskjellige regioner.
- Vurdering av muligheten for å kalibrere parametrene og estimere usikkerheten i parametrene,

Et viktig tema er også kvantifisering av usikkerhet for estimater både basert på frekvensanalyse og nedbør-avløps-modeller og en sammenlikning av usikkerheten ved bruk av ulike metoder.

6 Konklusjon

Uansett hva slags metode som benyttes vil usikkerheten være stor når man skal estimere størrelsen på meget sjeldne flomhendelser. Usikkerheten øker jo færre observasjoner man har og jo dårligere kvaliteten på dataene er.

Når det gjelder flomfrekvensanalyse vil fraværet av en stor flom ett år eller en spesielt stor flomhendelse ett år, kunne ha stor betydning for resultatet, særlig hvis man har få observasjoner og skal estimere høye gjentaksintervaller. Dette illustrerer utvalgsusikkerheten. Brudd på forutsetningene for frekvensanalyse både for analyser av enkeltserier og regionale metoder, øker usikkerheten. Estimater av sjeldne hendelser med gjentaksintervall over 200 år, er meget usikre fordi det kreves ekstrapolasjon ut over det som er observert. Estimater er svært avhengig av hvilken fordeling som velges og til dels hvordan vi velger å estimere parametrene i fordelingen. Ved standardisering av anbefalte fordeling og parameterestimeringsmetode vil man oppnå mer enhetlige estimater, men man risikerer å unngå å ta i bruk verdifull hydrologisk kunnskap som kan gi mer troverdige resultater.

Ved bruk av nedbør-avløps-modeller er usikkerheten knyttet både til nedbøren som er inngangsdata i modellen og selve modellen. Ved bruk av PQRUT i nedbørfelt uten målinger vil følgende faktorer påvirke usikkerheten:

- (1) nedbørsekvensen som brukes (for eksempel kvalitet og tilgjengelighet av observert nedbør i nærheten av nedbørfeltet for beregning av ekstremnedbør)
- (2) PQRUT-parametrene som ikke er kalibrert. De samme parametrene er brukt for hele landet.

- (3) grunnlag for beregning av bidrag fra snøsmeltevann er ganske grovt
- (4) gjentakintervallet for en flom som skyldes T-års nedbør OG snøsmeltevann kan bli noe høyere enn T-år (men dette har ingen betydning om metoden bare brukes for PMF).

Det pågår mye relevant FoU innen temaet, blant annet gjennom COST-samarbeidet Flood-Freq. Det er viktig at denne forskningsaktiviteten fortsetter også etter avslutningen av dette nettverksprosjektet i 2014. Det kan også bli aktuelt å knytte igangsatte PhD'er om ekstremnedbør og flomgenererende prosesser til nye FoU-aktiviteter.

NVE utvikler retningslinjer for flomberegninger. De gjeldende retningslinjene (Midttømme mfl., 2011) 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. En videreutvikling og sammenlikning av ulike metoder, både i forhold til ulike nedbør-avøps-modelleringsystemer og flomfrekvensanalyse, vil kunne bidra til mer robuste standarder for beregningen av dimensjonerende flom i Norge.

Referanser

- Aarnseth, H. (1988). Tre delspørsmål vedrørende Tokkeverkene i Telemark. Master's thesis, Institutt for vassbygging, NTH. Hovedoppgave.
- Alfnes, E. (2007). Ekstremnedbør beregnet fra serie med gridbasert arealnedbør. Technical Report 1/2007, met.no.
- Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., Llasat, M., Francés, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V., Enzel, Y., Bardossy, A., Coeur, D. og Bobée, B. (2004). Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk information. Review of scientific methods. *Natural Hazards*, 31(3):623–643.
- Boughton, W. og Droop, O. (2003). Continuous simulation for design flood estimation - a review. *Environmental Modelling & Software*, 18(4):309–318.
- Cardoso, R. M., Soares, P. M. M., Miranda, P. M. A. og Belo-Pereira, M. (2012). WRF high resolution simulation of Iberian mean and extreme precipitation climate. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.3616.
- Castellarin, A., Kohnová, S., Gaál, L., Fleig, A., Salinas, J. L., Toumazis, A., Kjeldsen, T. R. og Macdonald, N., editors (2012). *WG 2, COST Floodfreq Action ES0901*, chapter Review of applied statistical methods for flood frequency analysis in Europe. CEH, Wallingford.
- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer, London.
- Dyrddal, A., Stordal, F., Førland, E. og Skaugen, T. (2013). Proposed method for estimating extreme areal precipitation in Norway. In submission.

- Engeland, K., Hisdal, H. og Frigessi, A. (2004). Practical extreme value modelling of hydrological floods and droughts: A case study. *Extremes*, 7:5–30.
- Engen Skaugen, T. og Førland, E. (2011). Future changes in extreme precipitation estimated in Norwegian catchments. Technical Report 13/2011, met.no.
- Fleig, A., Gailhard, J. og Roald, L. (2012). Weather types leading to extreme precipitation and flooding in Norway. Presented at EGU Topical Meeting 2012 Floods and climate: Understanding and exploiting the link between floods and climate" in Potsdam, Germany.
- Fleig, A. og Wilson, D. (2013). A review of flood frequency estimation methods for small catchments. Technical report, NVE/NIFs. In preparation.
- Førland, E. (1992). *Manual for beregning av påregnelige ekstreme nedbørverdier*. DNMI Rapport 21/92 Klima.
- Førland, E. J. (1987). Beregning av ekstrem nedbør. Technical Report 23/87 KLIMA, DNMI.
- Førland, E. J. og Kristoffersen, D. (1989). Estimation of extreme precipitation in Norway. *Nordic Hydrology*, 20:257–276.
- Friederichs, P. og Thorarinsdottir, T. L. (2012). Forecast verification for extreme value distributions with an application to probabilistic peak wind prediction. *Environmetrics*, 23(7):579–594.
- Garavaglia, F., Lang, M., Paquet, E., Gailhard, J., Garçon, R. og Renard, B. (2011). Reliability and robustness of rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2):519–532.
- Gneiting, T., Balabdaoui, F. og Raftery, A. E. (2007). Probabilistic forecasts, calibration and sharpness. *Journal of the Royal Statistical Society Ser. B*, 69:243–268.
- Gneiting, T. og Raftery, A. E. (2007). Strictly proper scoring rules, prediction, and estimation. *Journal of the American Statistical Association*, 102:359–378.
- Hanssen-Bauer, I., Drange, H., Førland, E. J., Roald, L. A., Børsheim, K. Y., Hisdal, H., Lawrence, D., Nesje, A., Sandven, S., Sorteberg, A., Sundby, S., Vasskog, K. og Ådlandsvik, B. (2009). *Klima i Norge 2100. Bakgrunnsmateriale til NOU klimatilpassing*. Norsk klimasenter, Oslo.
- Hosking, J. R. M. (1990). L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, 52:105–124.
- Hosking, J. R. M. og Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis*. Cambridge University Press, UK.
- Jacobsen, J. og Olsen, N. R. B. (2010). 3D numerical modelling of the capacity for a complex spillway. *Water Management*, 163(WM6):283–288.

- Jansson, A., Tveito, O., Pirinen, P. og Scharling, M. (2007). NORDGRID – a preliminary investigation on the potential for creation of a joint Nordic gridded climate dataset. Technical Report 03/2007 - Climate, met.no.
- Lawrence, D. og Paquet, E. (2013). Comparison of precipitation/runoff methods for design flood estimation for combined snowmelt/rainfall events. In Loukas, A. og Kjeldsen, T., editors, *Advanced Methods for Flood Estimation in a Variable and Changing Environment*, Volos, Greece. Proceedings of the Mid-term COST Action ES0901 Conference. In press.
- Midttømme, G., Pettersson, L., Holmqvist, E., Nøtsund, Ø., Hisdal, H. og Sivertsgård, R. (2011). *Retningslinjer for flomberegninger*. NVE. Retningslinjer nr. 4/2011.
- Nguyen, C. C., Payrastre, O. og Gaume, E. (2013). Do regional methods really help reduce uncertainties in flood frequency analyses? *European Geophysical Union General Assembly Conference Abstracts*, 15:5636.
- Ohara, N., Kavvas, M. L., Kure, S., Chen, Z. Q., Jang, S. og Tan, E. (2011). Physically based estimation of maximum precipitation over American River watershed, California. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(4):351–361.
- Paquet, E., Gailhard, J. og Garçon, R. (2006). Evolution de la méthode du GRADEX: approche par type de temps et modélisation hydrologique. *La Houille Blanche*, 5:80–90.
- Paquet, E., Garavaglia, F., Garçon, R. og Gailhard, J. (2013). The SCHADEX method: a semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation. *Journal of Hydrology*, 495:23–37.
- Parent, E. og Bernier, J. (2002). Bayesian POT modelling for historical data. *Journal of Hydrology*, 274:95–108.
- Petersen-Øverleir, A. (2004). Accounting for heteroscedasticity in rating curve estimates. *Journal of Hydrology*, 1–4:173–181.
- Petersen-Øverleir, A. (2006). Modelling stage-discharge relationships affected by hysteresis using the Jones formula and nonlinear regression. *Hydrological Sciences Journal*, 51(3):365–388.
- Petersen-Øverleir, A. og Reitan, T. (2005). Objective segmentation in compound rating curves. *Journal of Hydrology*, 311(1–4):188–201.
- Pettersson, L. E. (2008). Om ideksflom og flomfrekvenskurver. Technical Report Oppdragsrapport B 4:2008, NVE, Oslo.
- Reis, D. og Stedinger, J. (2005). Bayesian MCMC flood frequency analysis with historical information. *Journal of Hydrology*, 313(1–2):97–116.
- Reitan, T. og Petersen-Øverleir, A. (2008). Bayesian power-law regression with a location parameter, with application for construction of discharge rating curves. *Stochastic Environmental research and Risk Assessment*, 22(3):351–365.

- Reitan, T. og Petersen-Øverleir, A. (2009). Bayesian methods for estimating multi-segment discharge rating curves. *Stochastic Environmental research and Risk Assessment*, 23(5):627–642.
- Renard, B., Kochanek, K., Lang, M., Garavaglia, F., Paquet, E., Neppel, L., Najib, K., Carreau, J., Arnaud, P., Aubert, Y., Borchi, F., Soubeyroux, J.-M., Jourdain, S., Veysseire, J.-M., Sauquet, E., Cipriani, T. og Auffray, A. (2013). Data-based comparison of frequency analysis methods: A general framework. *Water Resources Research*, 49:825–843.
- Sælthun, N. (1999). Flommer og flomberegninger, forelesninger i gf-gg 141. Institutt for Geofysikk, Universitetet i Oslo.
- Sælthun, N., Tveito, O., Bønsnes, T. og Roald, L. (1997). Regional flomfrekvensanalyse for norske vassdrag. Technical Report 14-97, NVE.
- Sæther (2000). Resultat fra ekstrapolering av vannføringskurven for målestasjon 124.12 Hegra Bru ved hjelp av HEC-RAS. NVE Notat.
- Svelle, K., Petersen-Øverleir, A. og Bogetveit, L. (2006). Setting up rating curves using HEC-RAS. In Refsgaard, J. C. og Højberg, A. L., editors, *NHP Report No. 49*, side 182–189.
- Traae, E. og Grøttå (1987). Flomberegninger og flomavledning, TOKKE-VERKENE. reguleringene for Byrte og Lio kraftverk. Master's thesis, Institutt for vassbygging, NTH. Hovedoppgave.
- Tveito, O., Bjørdal, I., Skjelvåg, A. og Aune, B. (2005). A GIS-based agro-ecological decision system based on gridded climatology. *Meteorological Applications*, 12(1):57–68.
- Tveito, O., Wegehenkel, M., v.d. Wel, F. og Dobesch, H. (2008). The use of geographic information systems in climatology and meteorology. Final report of COST Action 719, Cost Office, Brussels, EUR 23461.
- Vingerhagen, S. (2011). Numerisk modellering av overløpet på innerdalen vannkraftdam. Master's thesis, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, NTNU.
- Wilson, D., Fleig, A., Lawrence, D., Hisdal, H., Pettersson, L.-E. og Holmqvist, E. (2011). A review of NVE's flood frequency estimation procedures. Technical Report 9:2011, NVE, Oslo.
- WMO (2009). *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*. World Meteorological Organization, Geneva. WMO-No. 1045.

A Flomfrekvensanalyse av korte dataserier og potensielle forbedringer ved bruk av historiske data

Donna Wilson, NVE

Med informasjon om historiske flommer, menes informasjon om flommer før vannføringen ble systematisk målt, for eksempel flommerker eller skrevne beretninger om flomhendelser. Det er ingen formelle anbefalinger eller metoder for bruk av slik informasjon i flomfrekvensanalyser i Norge (Midttømme mfl., 2011). Imidlertid er Bayesiansk Markov Chain Monte Carlo (MCMC)-metoder for inkludering av historisk informasjon et tema med mye forskningsaktivitet det siste tiåret (f.eks. Benito mfl., 2004; Parent og Bernier, 2002; Reis og Stedinger, 2005). En stor fordel med Bayesianske metoder er at de tar hensyn til parameterusikkerhet, noe som er spesielt viktig når det gjelder sjeldne flomhendelser. Parameterusikkerheten i flomfrekvensene uttrykkes ved bruk av såkalte troverdighetsintervaller. I det følgende beskrives en undersøkelse av potensiell forbedring av flomfrekvensanalyse ved å supplere vilkårlige korte dataserie fra Bulken (62.5) i Vangsvatnet med historisk flominformasjon, hvor:

- (1) størrelsen på de historiske flommene er kjent, og
- (2) antall flommer som oversteg en terskel i løpet av en periode er kjent.

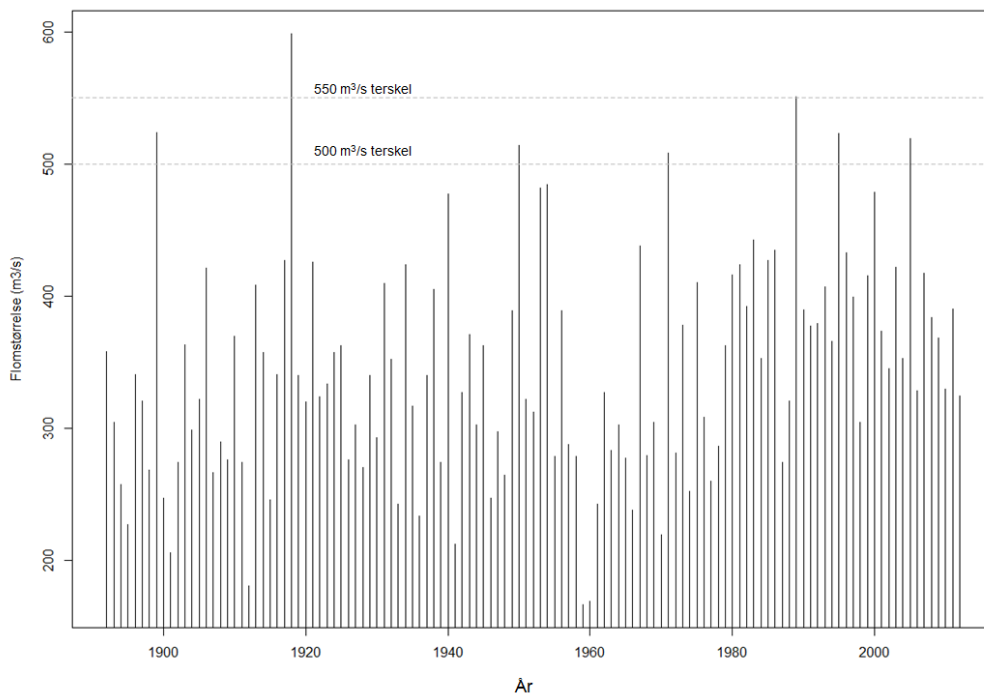
Slike analyser er basert på to antagelser: (i) gjentaksintervallet til meget store flomhendelser er fast, og (ii) perioden med systematiske observasjoner er ikke spesielt våt eller tørr.

A.1 Historiske hendelser med kjent størrelse

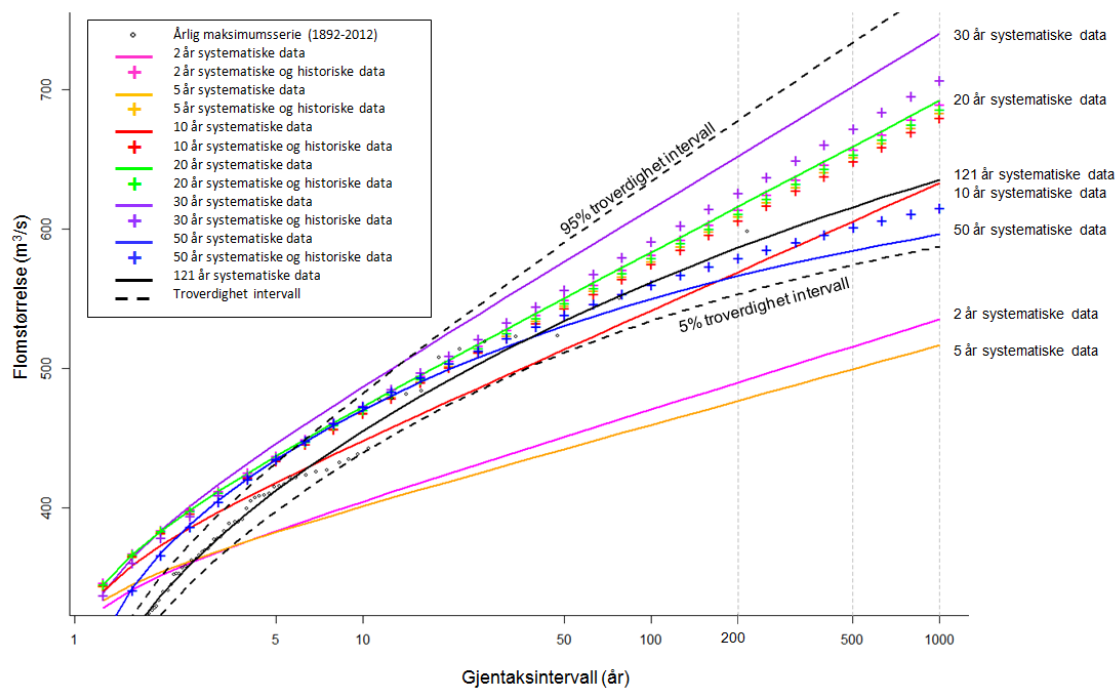
Døgnmiddelvannføringen har blitt systematisk målet på Bulken fra 1892, en periode som strekker seg over 121 år frem til i dag (Figur A.1). I denne undersøkelsen ble det antatt sju kortere perioder (alle frem til 2102) hvor årlig maksimumsvannføring er observert. Disse er supplert med historiske flomhendelser over 500 m³/s hvor vannføringen er kjent. De korte perioder strekker seg over følgende antall år (i parentes er antall historiske hendelser): 2 (7), 5 (7), 10 (6), 20 (5), 30 (4) og 50 (3) år. Resultatene av analysene med disse kort dataseriene, er sammenliknet med en frekvensanalyse av den komplette 121 år lange serien. Første år i analysen ble satt til 1891 basert på året for den første "kjente" historiske flommen og det gjennomsnittlige gjentaksintervallet for flomhendelser større enn 500 m³/s. Den statistiske programvaren R nsRFA³ ble brukt i analysen.

Figur A.2 viser flomfrekvenskurvene beregnet ved bruk av de ulike kombinasjonene av observerte og historiske data. Valget av den statistiske fordelingen følger anbefalingene fra Midttømme mfl. (2011). En 2-parameter Gumbel-fordeling blir brukt med observerte dataserier kortere enn 50 år, og en 3-parameter GEV-fordeling for serier med minst 50 år. 5 % og 95% troverdighetsintervaller basert på den komplette observerte serien med 121

3. <http://cran.r-project.org/web/packages/nsRFA/>



Figur A.1. Årlig maksimumsserie for Bulken (Vangsvatnet), 1892–2012.

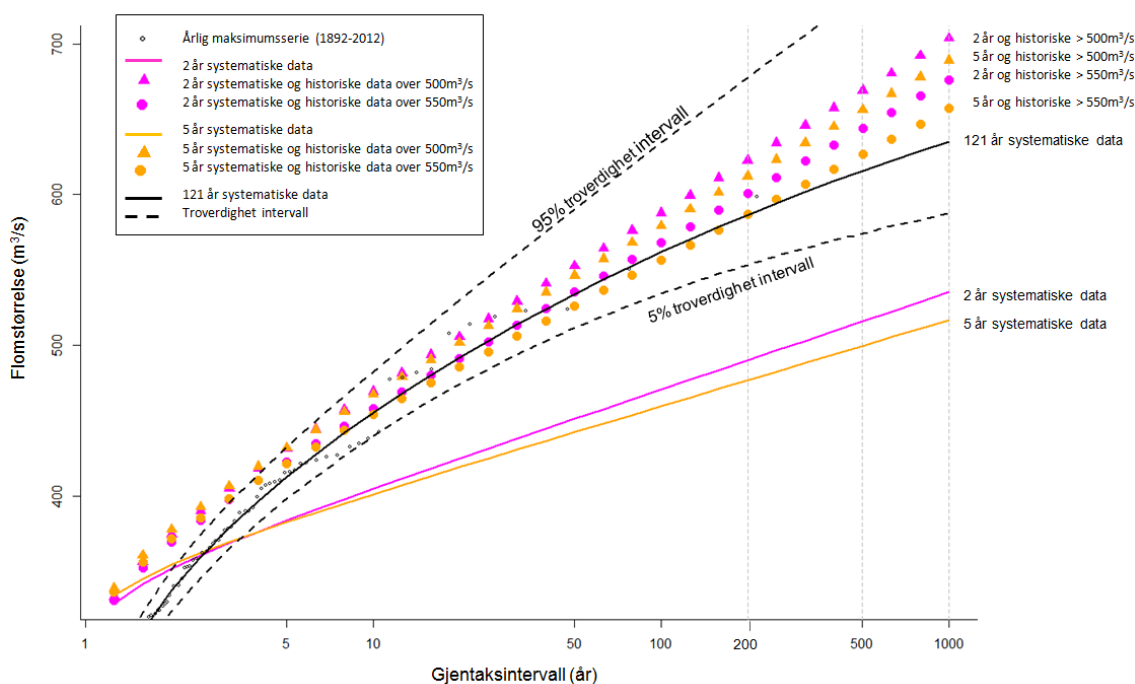


Figur A.2. Flomfrekvenskurvene tilpasset ved Bayesianisk MCMC med bruk av: (i) observerte (systematiske) data (linjer), og (ii) observerte (systematisk) data supplert med historiske data (+). Den stiplede svarte linjene representerer 5% og 95% troverdighetsintervaller for flomfrekvenser beregnet basert på den komplette observerte (systematiske) serien med 121 år.

år er også vist. De grå vertikale stiplede linjene markerer 200-, 500- og 1000-års gjentakintervall, som brukes i forbindelse med dimensjonering av dammer. Av Figur A.2 ser vi at bruken av svært korte observerte serier kan gi svært upålitelige flomfrekvensestimater. Men, resultatene viser også at bruk av et begrenset antall historiske flomhendelser av en viss størrelse generelt forbedrer flomfrekvensestimaterne for alle gjentakintervall, og særlig estimatene basert på svært korte (f.eks. 2-5 år) observerte serier.

A.2 Historiske hendelser med ukjent størrelse

Når historisk informasjon er tilgjengelig, er det sannsynlig at den eksakte flomstørrelsen (vannføringen) er ukjent. Det man vet er for eksempel at en flom over en viss størrelse har forkommet (for eksempel på grunn av oversvømmelse av en eiendom). Her er den potensielle nytten av bruken av slik informasjon sammen med veldig korte observerte serier på 2 og 5 år undersøkt. Det er antatt at forekomsten av alle flommer større enn et bestemt terskelnivå i løpet av en tidsperiode er kjent. Kombinasjonene av observerte og historiske data undersøkt er beskrevet i Tabell A.1, mens resultatene av frekvensanalysene er vist i Figur A.3. Figuren viser at inkludering av et fåtall historiske hendelser, for eksempel bare de to største hendelsene i en historisk periode (her 119 år) kan gi fordeler for flomfrekvensanalysen når bare svært korte dataserier fra en stasjon er tilgjengelige.



Figur A.3. Flomfrekvenskurvene tilpasset ved Bayesian MCMC med bruk av: (i) observerte (systematiske) data (linjer), (ii) observerte (systematiske) data supplert med syv historiske hendelser over en terskel på 500 m³/s (trekant), og (iii) observerte (systematiske) data supplert med to historiske hendelser over en terskel på 550 m³/s (sirkler). Den stiplede svarte linjene representerer 5 troverdighetsintervaller for flomfrekvenser beregnet basert på den komplette observerte serien med 121 år.

Videre forskning er nødvendig for å: (i) bestemmer muligheten for å supplere analyser

Tabell A.1. Kombinasjoner av observerte (systematiske) data og historiske hendelser av ukjent størrelse.

Observerte (systematiske) data	Historiske hendelser		
	Terskel (m^3/s)	Antall hendelser	Antall år
2 år	500	7	119
2 år	550	2	119
5 år	500	7	119
5 år	550	2	116

med historiske data, basert på tilgjengeligheten av slik informasjon, (ii) vurdere muligheten for å ta inn historiske data fra nærliggende stasjoner, og (iii) etablere kriterier for å inkludere historiske data.

B Sammenlikning av PQRUT nedbør-avløpsmetoden og to andre modelleringsmetoder med statistisk flomfrekvensanalyse

Deborah Lawrence, NVE

Retningslinjer for flomberegninger (Midttømme mfl., 2011) anbefaler at en nedbør-avløpsmetode brukes for beregning av påregnelig maksimal flom, QPMF. Praksis viser at for noen vassdrag er flomverdiene beregnet med PQRUT betydelig større enn ventet. Dette gjelder særlig der snøsmeltevann utgjør en vesentlig del av tilløpsflommen. For å se litt nærmere på mulige grunner for forskjellene, har vi vurdert to uregulerte nedbørfelt: (1) Atnasjø (2.32) i Atna/Glommavassdraget på Østlandet, med et nedbørfeltareal på 463 km^2 ; og (2) Krinsvatn (133.7) ved Nordelva i Sør-Trøndelag, med et nedbørfeltareal på 207 km^2 . Både i Atnasjø og Krinsvatn skyldes store flommer en kombinasjon av mye nedbør og snøsmelting, men ellers er flomforholdene svært forskjellige. Snøsmelteflommer om våren og tidlig sommer dominerer flommene i Atnasjø, mens flommer i Krinsvatn hovedsakelig er forårsaket av nedbør med stor intensitet om høsten og vinteren.

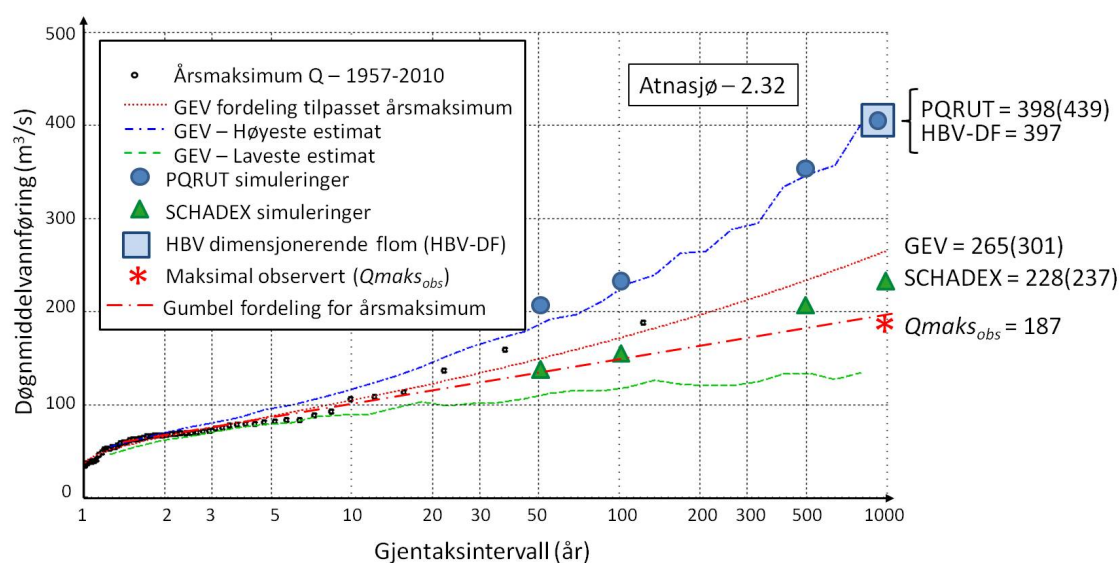
Hovedfokuset i denne sammenlikningen er på 1000-års flom, fordi det gir mulighet til å sammenlikne statistiske analyser av observerte tidsserier med modelleringsmetoder. I tillegg er tidsperioden for grunnlagsdata begrenset til 1957-2010 slik at de forskjellige analysene er sammenliknbare.

Tre modelleringsmetoder er blitt brukt:

- (1) PQRUT med nedbørverdier for P_{50} , P_{100} , P_{500} and P_{1000} med varighet fra 1 til 480-timer beregnet av T. Engen Skaugen (MET) basert på griddede nedbørdata for de to nedbørfeltene (Alfnes, 2007; Engen Skaugen og Førland, 2011);

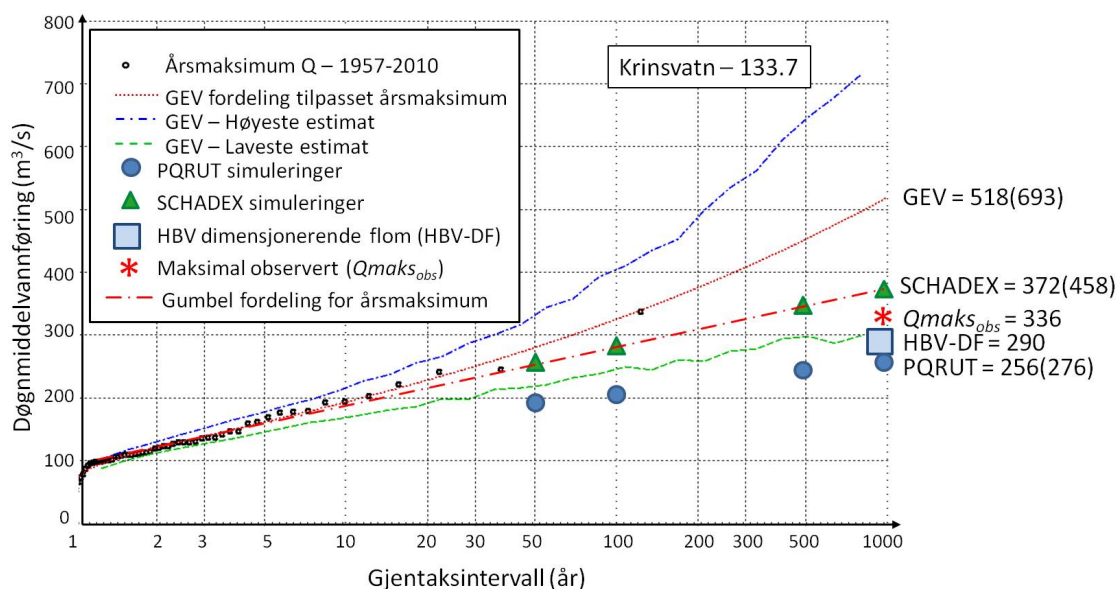
- (2) En simuleringsmetode som ligner Sveriges og Finlands metode for dimensjonerende flom. Her erstatter en bestemt dimensjonerende nedbørsekvens, nedbøren i en lang simulering basert på historiske data, og brukes som inndata til en kalibrert HBV-modell (HBV-DF);
- (3) En såkalt "semi-kontinuerlig" simuleringsmetode som er benyttet til flomberegninger i Frankrike (SCHADEX, Paquet mfl., 2006, 2013). Her beregnes mange nedbørhendelser med en stokastisk nedbørmodell og erstatter nedbørhendelsene i en observert tidsserie som inndata til en kalibrert hydrologisk modell.

PQRUT er en hendelsesbasert metode, så bidraget fra snøsmelting må legges til nedbørverdiene. Vi har brukt 1,25 mm/t som et estimat av 70% maksimal snøsmelting for de fleste simuleringene (med unntak av Q_{50} - og Q_{100} -flommer i Atnasjø der en mindre verdi, 0,625 mm/t, er blitt brukt). For de to andre metodene, HBV-Dimensjonerende Flom (HBV-DF) og SCHADEX, er snøsmelting og markvannsunderskudd beregnet som en del av simuleringsprosessen basert på historiske data. For HBV-DF har vi brukt P_{1000} med varighet fra 24- til 336-timer (dvs. 14-dager) beregnet av met.no. Verdiene er samlet til én dimensjonerende nedbørsekvens med de største verdiene midt i sekvensen. For SCHADEX-applikasjonen er grunnlaget for den stokastiske nedbørmodellen en værtypeklassifikasjon for ekstremnedbør i Norden (Fleig mfl., 2012; Garavaglia mfl., 2011, for videre detaljer) som er blitt utviklet sammen med NVEs samarbeidspartnere i European Science Foundation COST Action FloodFreq.



Figur B.4. Sammenlikning av flere metoder for beregning av 50, 100, 500 og 1000-års flomverdier for Atnasjø nedbørfelt. Døgnmiddelvannføringen er plottet og gitt som verdier (med momentanverdien i parentes).

Figurer B.4 and B.5 viser estimater for Q_{1000} , Q_{500} , Q_{100} og Q_{50} (døgnverdier) plottet mot en statistisk flomfrekvensanalyse (FFA) basert på en 3-parameter Generalised Extreme Value (GEV) fordeling for de to nedbørfeltene. Usikkerhetsgrenser for de GEV-estimatene er beregnet med "bootstrap resampling" på NVEs HYDRA-II Dagut systemet,



Figur B.5. Sammenlikning av flere metoder for beregning av 50, 100, 500 og 1000-års flomverdier for Krinsvatn nedbørfelt. Døgnmiddel vannføringen er plottet og gitt som verdier (med momentanverdien i parentes).

og 5 og 95% konfidensintervaller basert på 100 forsøk er vist. I tillegg er en tilsvarende 2-parameter Gumbel-fordelingen lagt til i figurene. Verdiene som er plottet er døgnmiddel vannføring, men momentanverdiene er gitt i parentes for metodene hvor det er beregnet eller lett kan beregnes. Resultatene for Atnasjø bekrefter erfaring med bruk av PQRUT i nedbørfelt dominert av snøsmelteflommer, dvs. at estimatene er høyere enn estimatene beregnet med statistisk FFA. Estimatet for 1000-årsflom beregnet med HBV-DF metoden er veldig likt PQRUT- estimatet. Det er ikke overraskende fordi den dimensjonerende nedbørsekvensen som brukes er den samme i begge tilfeller. Likevel tyder denne overensstemmelsen på at nedbørfeltets metningsgrad og snøsmeltingens bidrag som ble brukt i PQRUT-simuleringen stemmer med de verste observerte forholdene i simuleringssperioden.

SCHADEX estimatene er nærmere FFA resultatene. Dette forventes fordi simuleringene bygger opp en fordeling av flomhendelser som tar hensyn til forskjellige kombinasjoner av nedbør, snøsmelting og metningsgrad. Det er dermed ikke behov for forutsetningen om at P1000 fører til 1000-års flom.

For Krinsvatn (Figur B.5) er estimatet for 1000-års flom basert på GEV-fordelingen betydelig høyere enn estimatene fra nedbør-avløps-modelleringsmetodene, men SCHADEX-estimatene for 50, 100, 500 og 1000-års flom stemmer godt med FFA basert på 2-parametre Gumbel-fordeling. Den høyeste observerte flomverdien er likevel underestimert med Gumbel-fordelingen. De to andre modelleringsmetodene, som er basert på en bestemt nedbørsekvens, gir estimater som er lavere enn både FFA og SCHADEX. Den beregnede 1000-års flommen er faktisk lavere enn den høyeste observerte vannføringen (31. jan. 2006). (I praksis ville dette ikke brukes før årsaken til de lave verdiene er vurdert.) En sammenlikning av nedbørsekvensen brukt for PQRUT og HBV-DF med observert ned-

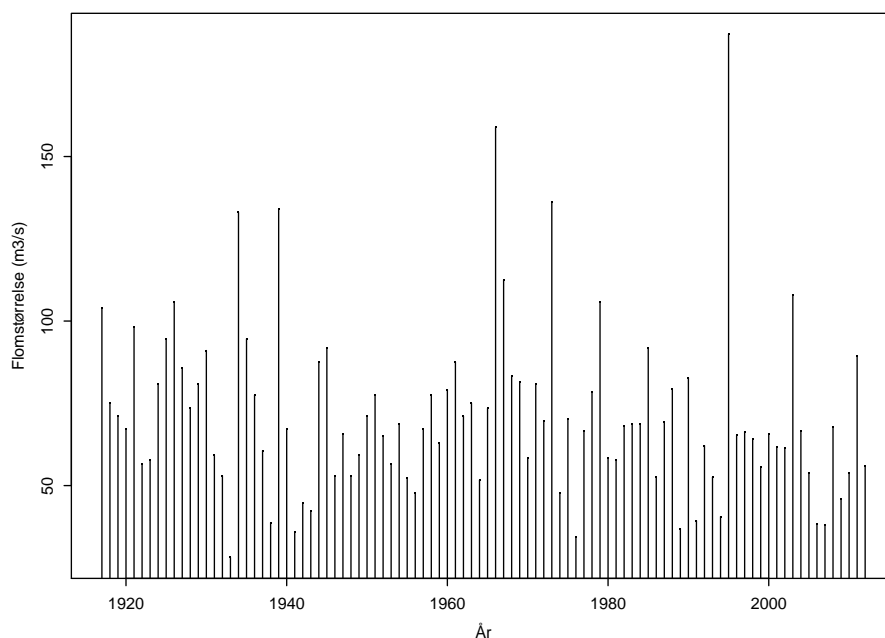
bør som førte til den største observerte flommen tyder på at i dette tilfellet er det særlig 72-timers nedbøren som er for lav (Lawrence og Paquet, 2013). Den litt høyere verdien beregnet med HBV i forhold til PQRUT også kan tyde på en liten forskjell i hvordan de to modellene håndterer nedbørfelts responstid. Snøsmeltebidraget og nedbørfeltets metningsgrad modellert av HBV er i nær overensstemmelse med de antatte verdiene som er brukt i PQRUT.

Denne sammenlikningen viser flere mulige årsaker til forskjellene i resultat mellom statistisk FFA og PQRUT-modellering for flommer med store gjentaksintervaller. Videre undersøkelser som benytter nedbørfelt med et godt datagrunnlag kan brukes til å kaste lys over systematiske forskjeller blant annet basert på regionale hydrologiske ulikheter.

C Sammenlikning av parameterestimeringsmetoder i statistisk flomfrekvensanalyse

Thordis L. Thorarinsdottir og Anders Løland, NR

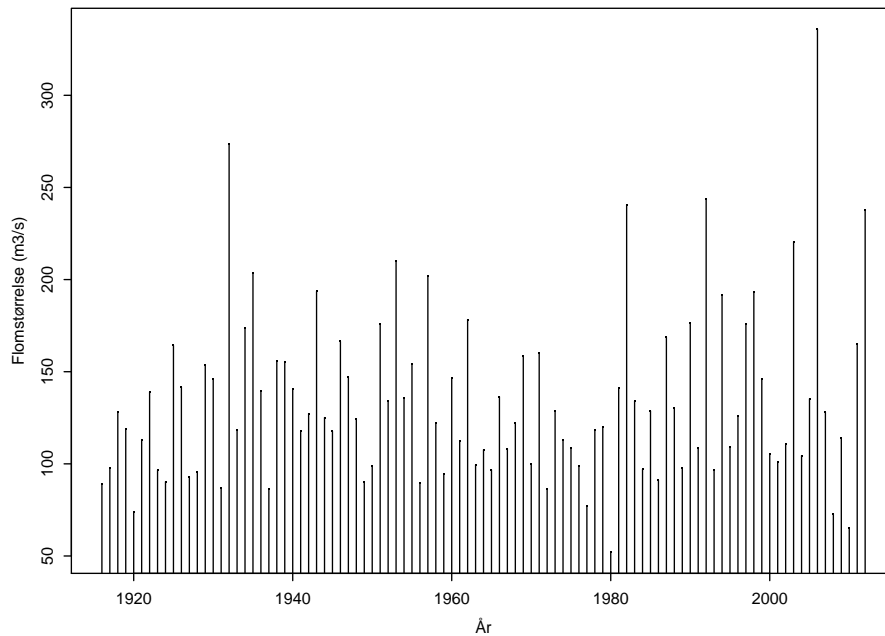
Målet med denne studien er å sammenlikne fire forskjellige parameterestimeringsmetoder for statistisk flomfrekvensanalyse. Vi benytter de samme dataene som i Vedlegg B; årlige maksimumsserier på henholdsvis 96 og 97 år fra to uregulerte nedbørfelt, Atnasjø og Krinsvatn. Dataseriene er vist i Figur C.6 og C.7 og egenskapene til de to nedbørfeltene er diskutert i Vedlegg B ovenfor.



Figur C.6. Årlig maksimumsserie for Atnasjø i Atna/Glommavassdraget på Østlandet, 1917-2012.

Vi sammenlikner fire ulike estimeringsmetoder:

- (1) Bayesiansk Markov Chain Monte Carlo (MCMC) som beskrevet på side 585 i Frie-



Figur C.7. Årlig maksimumsserie for Krinsvatn ved Nordelva i Sør-Trøndelag, 1916-2012.

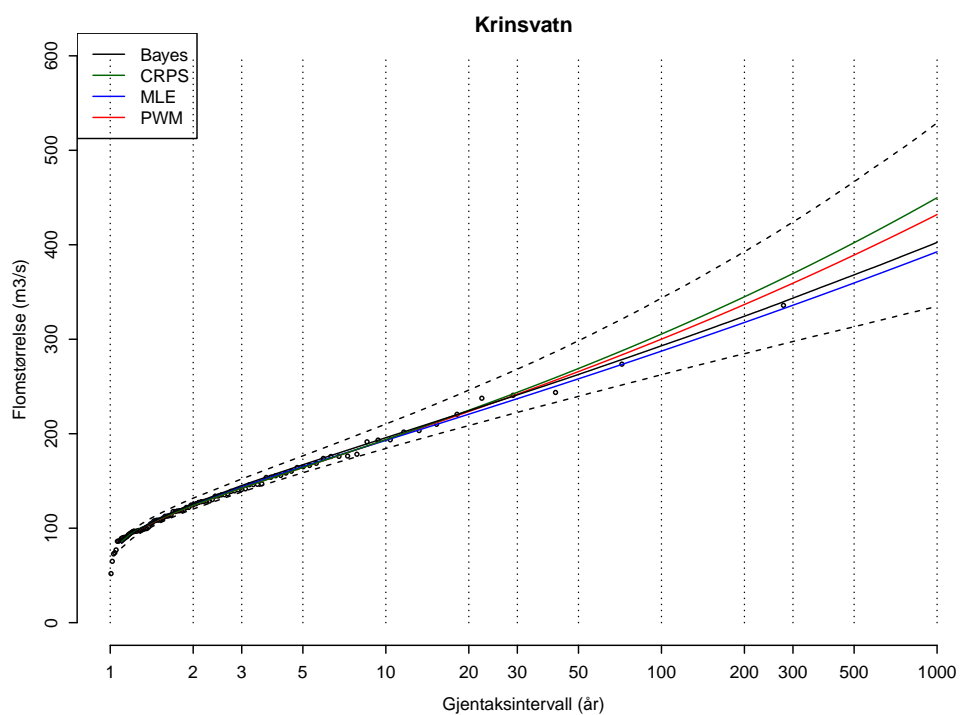
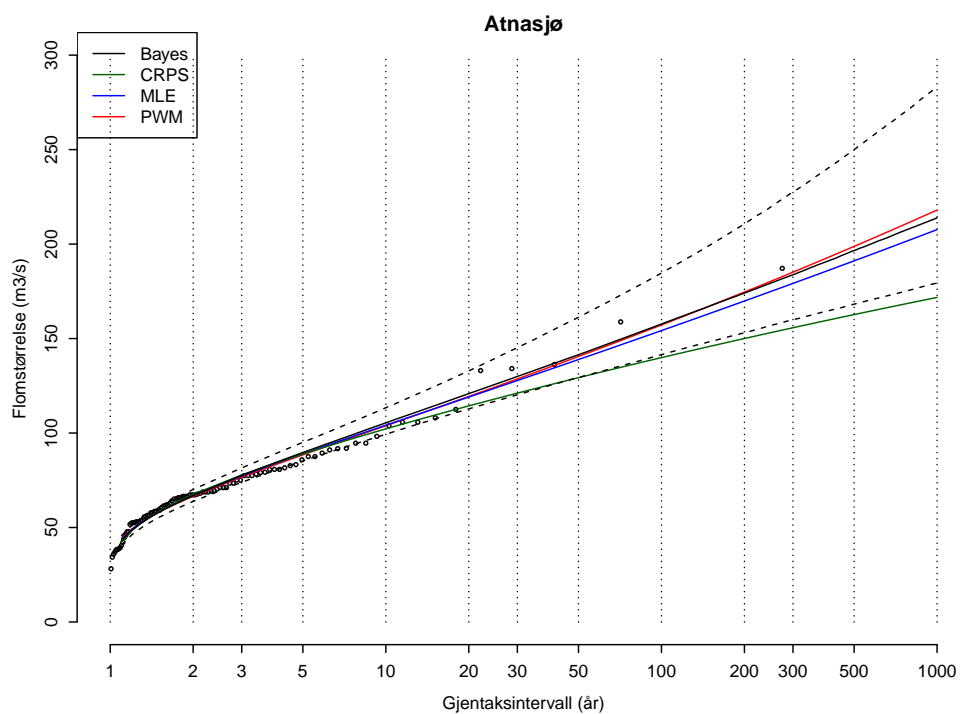
derichs og Thorarinsdottir (2012) for den stasjonære modellen, herunder linkfunksjonen til skala-parameteren og a priori-fordelingene. Dette er den samme metoden som ble brukt i Vedlegg A uten bruk av historiske flomhendelser.

- (2) Minimum Continuous Ranked Probability Score (CRPS)-estimering ifølge Friederichs og Thorarinsdottir (2012). CRPS-funksjonen er en alternativ optimeringsfunksjon til Likelihood-funksjonen. Den måler den kvadratiske avstanden mellom GEV-fordelingsfunksjonen og den empiriske fordelingsfunksjonen til dataene; minimum CRPS-estimering er derfor det samme som å minimere denne avstanden.
- (3) Den klassiske Maximum Likelihood-estimeringsmetoden (MLE).
- (4) Probability Weighted Moments (PWM)-metoden (Hosking og Wallis, 1997). PWM er et robust alternativ til MLE og denne metoden anbefales til statistisk flomfrekvensanalyse i Norge (Midttømme mfl., 2011; Wilson mfl., 2011).

Den statistiske programvaren R ble brukt i analysen. Den Bayesianske MCMC-metoden og minimum CRPS-estimeringen ble implementert som beskrevet i Friederichs og Thorarinsdottir (2012). Til MLE- og PWM-estimeringsmetodene har vi brukt R-pakken `fExtremes`⁴.

Figur C.8 viser de estimerte 3-parameter GEV-fordelingene ved bruk av de fire forskjellige estimeringsmetodene når hele datasetten på henholdsvis 96 og 97 år ble brukt i analysen, samt det punktvis 80% konfidensintervallet fra den Bayesianske MCMC-metoden. Figurene ble laget ved bruk av Hoskings plotteposisjonsformel. Den sier at målepunktet med rang i blant de N målepunktene har kvantil $(i - 0,35)/N$ i den empiriske forde-

4. <http://cran.r-project.org/web/packages/fExtremes>



Figur C.8. Flomfrekvenskurver tilpasset til årlige maksimumsflom for Atnasjø og Krinsvatn ved bruk av Bayesiansk MCMC (sort linje), minimum CRPS-estimering (grøn linje), Maximum Likelihood-estimering (blå linje) og Probability Weighted Moments-metoden (rød linje). De stiplede linjene indikerer det punktvis 80% konfidensintervallet fra den Bayesianske MCMC-metoden.

lingen, eller et gjentaksintervall på $N/(N - i + 0,35)$ år, og gir gode resultater for GEV-fordelingen (Hosking, 1990). De fire metodene gir lignende resultater, unntatt minimum CRPS-estimeringen for Atnasjø, hvor den estimerte flomstørrelsen til 1000-års-flommen ligger nedenfor det Bayesianske 80% konfidensintervallet. Den Bayesianske fordelingen ligger mellom MLE- og PWM-estimatene for begge dataseriene.

Hovedformålet med denne studien er å undersøke hvor robuste de forskjellige parameterestimeringsmetodene er for korte dataserier. Dette gjøres ved å bruke kortere dataserier med 30, 50 og 75 år systematiske data og undersøke hvor mye estimatene endres avhengig av både lengden på datasettet og tidsperioden som ble brukt. Vi undersøker to aspekter: Hvor robuste estimatene er for forskjellige gjentaksintervaller og hvor godt de resulterende estimerde fordelingene predikerer dataene vi ikke har brukt. Med robusthet, også kalt stabilitet, mener vi at estimatene for et gjentaksintervall basert på forskjellige tidsperioder bør være lik. Dette forutsetter naturligvis at datasettene er stabile og ikke utsatt for klimaendringer eller andre endringer over tid. I Norge finnes det mange dataserier som er kortere enn 30 år. Hovedprosjektet vil derfor omfatte en mer detaljert studie.

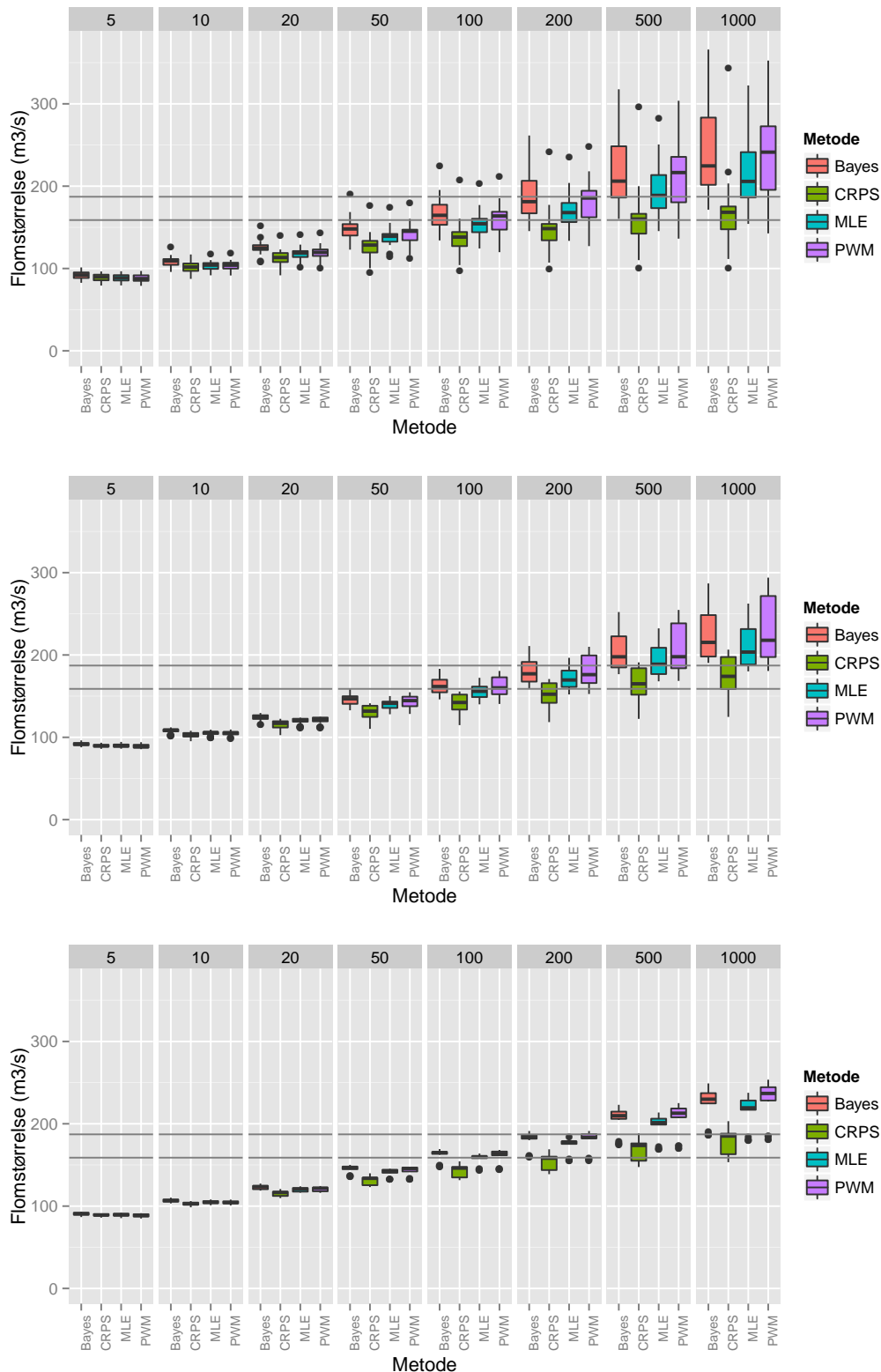
Ifølge anbefalingene fra Midttømme mfl. (2011), skal en 2-parameter Gumbel-fordeling brukes for dataserier kortere enn 50 år og en 3-parameter GEV-fordeling for serier med minst 50 år data. For å kunne sammenlikne resultatene fra 30, 50 og 75 år systematiske data har vi valgt å bruke en 3-parameter GEV-fordeling i hele undersøkelsen.

C.1 Robusthet

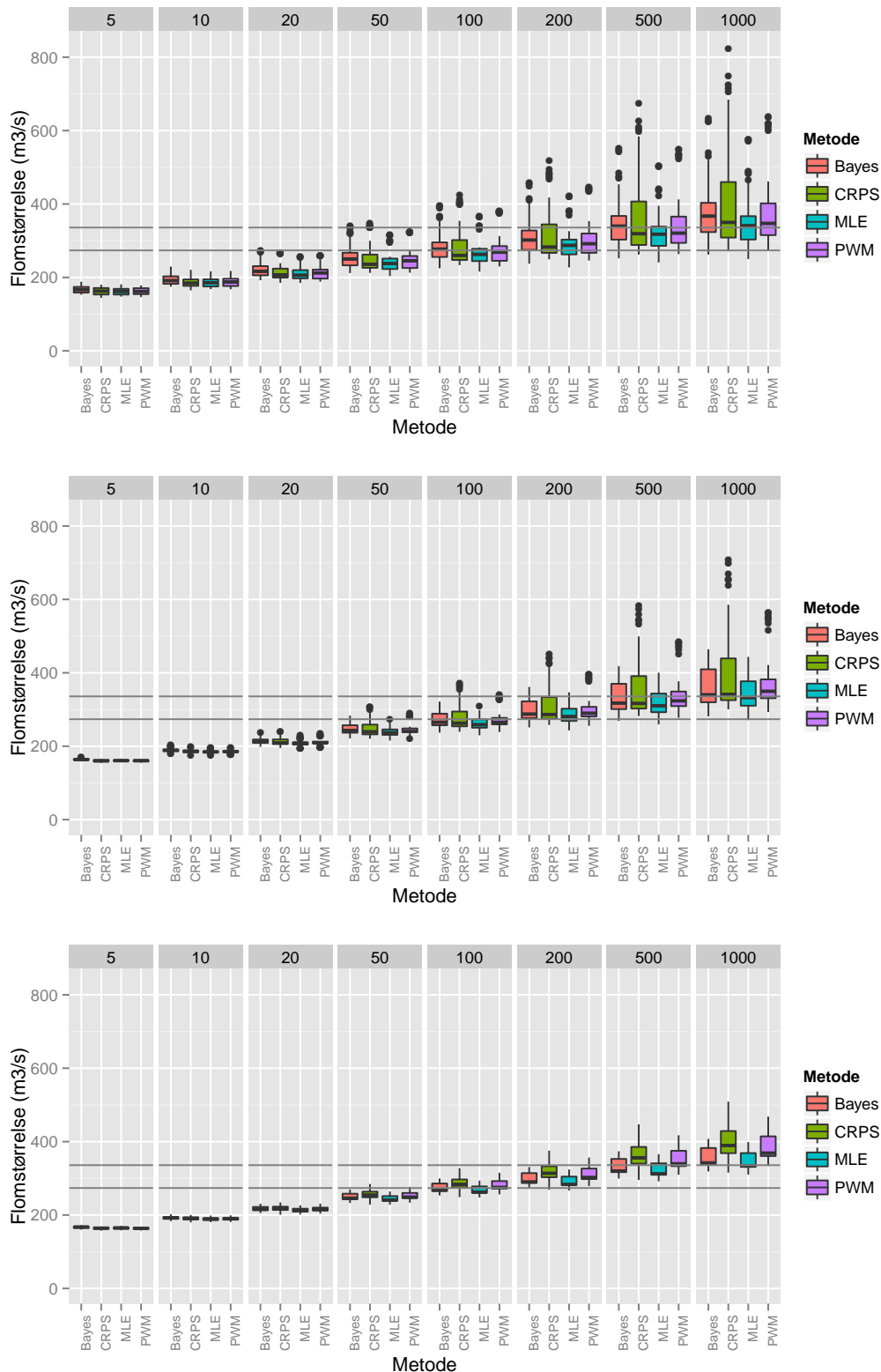
Vi undersøker robustheten i parameterestimeringsmetodene ved å estimere GEV-fordelingen flere ganger for hver dataserie basert på forskjellige kortere dataserier med 30, 50 og 75 år systematiske data. For Atnasjø gir for eksempel 30 år systematiske data 67 delvis forskjellige dataserier. Den første består av dataene fra 1917 til 1946 og den siste av dataene fra 1983 til 2012. Hver av disse dataseriene brukes til å estimere en GEV-fordeling og ut fra disse estimeres flomstørrelser for gjentaksintervall på 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 og 1000 år. Resultatene for Atnasjø er vist i Figur C.9, mens resultatene for Krinsvatn er gitt i Figur C.10.

Generelt får vi mer robuste resultater med lenggere dataserier. Den Bayesianske MCMC-metoden ser ut til å gi litt større flom enn de andre metodene for korte gjentaksintervaller, mens denne forskjellen ikke er synlig for lange gjentaksintervaller (på over 200 år). Fra Figur C.8 ser vi at fordelingen fra den Bayesianske MCMC-metoden ligger mellom fordelingen fra MLE-metoden og PWM-metoden for lange gjentaksintervaller. Dette gjelder også her for de kortere seriene. Den Bayesianske metoden er også den metoden hvor usikkerheten reduseres mest når vi tilfører mer data.

CRPS-metoden gir for lave estimater for flomstørrelsen i dataseriene fra Atnasjø. Selv om metoden har 75 målepunkter til rådighet, så anslår den i de fleste tilfeller at 100-års-flommen er en del mindre enn de to største observerte flommen, og den største observerte flommen er større enn den estimerte 1000-års-flommen. For dataseriene fra Krinsvatn gir minimum CRPS-metoden litt høyere estimater enn de andre tre metodene.



Figur C.9. Fordeling for estimerte flomstørrelser ved Atnasjø for gjentakintervall på 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 og 1000 år basert på dataserier med 30 (øverst), 50 (midten) og 75 (nederst) år systematiske data. Boksplottene øverst er basert på 67 forskjellige estimater, i midten på 47 forskjellige estimater og nederst på 22 estimater. De grå linjene viser størrelsen på de to største observerte flommer ved Atnasjø i dataserien fra 1917-2012.



Figur C.10. Fordeling for estimerte flomstørrelser ved Krinsvatn for gjentakintervall på 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 og 1000 år basert på dataserier med 30 (øverst), 50 (midten) og 75 (nederst) år systematiske data. Boksplottene øverst er basert på 68 forskjellige estimater, i midten på 48 forskjellige estimater og nederst på 23 estimater. De grå linjene viser størrelsen på de to største observerte flommer ved Krinsvatn i dataserien fra 1916-2012

Ut fra disse resultatene konkluderer vi at den Bayesianske MCMC-metoden er minst like robust som MLE- og PWM-parameterestimeringsmetodene. Dersom den Bayesianske metoden i tillegg har de fordeler som er diskutert i Vedlegg A, kan en detaljert studie av Bayesianske metoder til flomberegninger i Norge anbefales.

C.2 Prediktiv ytelse

Her undersøker vi, ved hjelp av en kryssvalideringsstudie, hvor gode de estimerte GEV-fordelingene passer til data, som ikke ble brukt under parameterestimeringen. For eksempel, når vi estimerer GEV-fordelingen basert på 30 år systematiske data ved Atnasjø, har vi hver gang informasjon om 66 andre årsflommer, vi ikke har brukt i parameterestimeringen. Den estimerte fordeling brukes nå til å predikere disse verdiene. Vi gjentar denne øvelsen for hver av de 67 periodene vi har 30 år systematiske data fra Atnasjø og ser på den gjennomsnittlige prediktive ytelsen. For estimeringsmetodene minimum CRPS, MLE og PWM er den prediktive fordelingen gitt ved den GEV-fordeling vi har estimert. Da Bayesiansk MCMC også tar hensyn til usikkerheten i parameterne, blir den Bayesianske prediktive fordelingen en litt annen fordeling. Mens denne fordelingen ikke kan beskrives direkte ved en formel, er det relativt enkelt å simulere fra de gitte parameterestimertene (se for eksempel Friederichs og Thorarinsdottir (2012))⁵.

Det finnes mange ulike definisjoner av hva en “god” prediksjon er. En viktig del av hovedprosjektet er å definere mål for godhet som er både hensiktsmessige og teoretisk riktige i vår sammenheng, og samtidig minimerer subjektive vurderinger. Gneiting mfl. (2007) påstår at målet for probabilistiske prognoser (prognoser gitt ved en fordeling) er “skarphet gitt kalibrering”. Det vil si at vår mål er å minimere usikkerheten i fordelingen forutsatt at den er kalibrert til de målepunktene vi ikke har brukt i parameterestimeringen. Kalibrering betyr at hvis fordelingen har en 10% sjanse for flom større enn 150 m³/s, så burde 10% av målepunktene være større enn 150 m³/s. Dette kalles også pålitelighet (Renard mfl., 2013).

Vi måler den prediktive ytelsen på tre forskjellige måter:

- (1) Ved Mean Absolute Error (MAE). MAE måler avstanden mellom den målte flomstørrelsen og medianen i den prediktive fordelingen.
- (2) Ved CRPS-funksjonen. Som beskrevet ovenfor, måler CRPS-funksjonen den kvadratiske forskjellen mellom den prediktive fordelingen og den empiriske fordelingsfunksjon av den målte flomstørrelsen.
- (3) Ved den negative Log-Likelihood-funksjonen (LogS). LogS er gitt ved verdien av den negative logaritmiske tetthetsfunksjonen i målepunktet. Dersom en målt verdi antas svært usannsynlig under den prediktive fordeling, kan denne scoren få en uendelig

5. Det er også mulig å inkludere parameterusikkerheten i den prediktive fordelingen til CRPS-, MLE- og PWM-metodene, for eksempel ved å bruke den såkalte bootstrap-resampling-metoden på de målepunktene vi bruker til estimeringen (Renard mfl., 2013). For PWM-metoden gir dette svært like resultater, mens bootstrap-resampling fører til numeriske problemer for de andre to metodene. Hovedprosjektet vil omfatte en mer detaljert sammenlikning av de fire metodene.

verdi.

CRPS og LogS måler samtidig både kalibreringen og skarpheten til den prediktive fordelingen (Gneiting og Raftery, 2007).

Resultatene for Atnasjø står i Tabell C.2 og resultaene for Krinsvatn i Tabell C.3. Scorene for de to forskjellige målestasjonene, samt de resultatene for 30, 50 eller 75 år med systematiske data, kan ikke sammenliknes direkte, da disse er basert på forskjellige data-grunnlag. Både MLE- og CRPS-parameterestimeringsmetodene gir prediktive fordelinger hvor en eller flere valideringsmålepunkter antas å være svært usannsynlig(e). Den Bayesianske MCMC-metode gir den beste prediktive fordelingen i de fleste tilfellene for Krinsvatn og for begge datasettene når den prediktive ytelsen er målt ved LogS. CRPS-metoden gir gode resultater for Atnasjø når den prediktive ytelsen er målt ved MAE eller CRPS.

Tabell C.2. Prediktiv ytelse ved Atnasjø for de fire parameterestimeringsmetodene i en kryssvalideringsstudie, hvor de estimerte fordelingene ble brukt til å predikere de dataene som ikke ble brukt til parameterestimeringen. Vi måler den prediktive ytelsen ved bruk av Mean Absolute Error (MAE), Continuous Ranked Probability Score (CRPS) og den negative Log-Likelihood-funksjon (LogS), hvor et mindre tall betyr bedre gjennomsnittlig prediktiv ytelse. Den beste verdien for hver studie er merket med fet skrift. Score på uendelig er merket med ∞ .

	MAE	CRPS	LogS
30 år systematiske data			
Bayesiansk MCMC	18.54	13.79	4.50
CRPS	18.47	13.72	∞
MLE	18.53	13.72	4.65
PWM	18.51	13.74	4.67
50 år systematiske data			
Bayesiansk MCMC	18.25	13.52	4.55
CRPS	18.25	13.46	∞
MLE	18.19	13.47	4.56
PWM	18.15	13.47	4.59
75 år systematiske data			
Bayesiansk MCMC	17.70	12.70	4.52
CRPS	17.64	12.63	4.52
MLE	17.69	12.66	4.52
PWM	17.71	12.68	4.53

Tabell C.3. Prediktiv ytelse ved Krinsvatn for de fire parameterestimeringsmetodene i en kryssvalideringsstudie, hvor de estimerte fordelingene ble brukt til å predikere de dataene som ikke ble brukt til parameterestimeringen. Vi måler den prediktive ytelsen ved bruk av Mean Absolute Error (MAE), Continuous Ranked Probability Score (CRPS) og den negative Log-Likelihood-funksjon (LogS), hvor et mindre tall betyr bedre gjennomsnittlig prediktiv ytelse. Den beste verdien for hver studie er merket med fet skrift. Score på uendelig er merket med ∞ .

	MAE	CRPS	LogS
30 år systematiske data			
Bayesiansk MCMC	35.86	26.15	5.12
CRPS	36.06	26.28	5.22
MLE	35.88	26.25	∞
PWM	36.00	26.25	5.22
50 år systematiske data			
Bayesiansk MCMC	37.39	27.41	5.21
CRPS	37.63	27.59	5.26
MLE	37.40	27.53	5.30
PWM	37.60	27.57	5.26
75 år systematiske data			
Bayesiansk MCMC	40.88	30.34	5.30
CRPS	40.66	30.33	5.32
MLE	40.84	30.43	5.33
PWM	40.67	30.31	5.31