

## Flomberegninger i regulerte felt — hvordan vassdragsreguleringer og flomforløp påvirker flomforholdene

.....

Rapport fra FoU-prosjekt 80507

*Seija Stenius, Thomas Væringstad, Per Glad, Erik Holmqvist, Kolbjørn Engeland og Demissew Kebede Ejigo*



## **NVE Rapport nr. 21/2021**

# **Flomberegninger i regulerte felt — hvordan vassdragsreguleringer og flomforløp påvirker flomforholdene : rapport fra FoU-prosjekt 80507**

**Utgitt av:** Norges vassdrags- og energidirektorat  
**Forfatter:** Seija Stenius, Thomas Væringstad, Per Glad, Erik Holmqvist, Kolbjørn Engeland og Demissew Kebede Ejigo  
**Forsidefoto:** Tore Bergeng/NVE

**ISBN:** 978-82-410-2129-9

**ISSN:** 1501-2832

**Saksnummer:** 202109944

**Sammendrag:** Rapporten beskriver hvordan ulike tilnærminger for beregning av flommer i et regulert vassdrag, så som ulike vassdragsreguleringer og flomforløp, påvirker flomforholdene. Det er også utført en litteraturstudie og utarbeidet en rutinebeskrivelse for beregning av tilsigsserier. Analysene er utført vha. vassdragsmodeller der tilsigsserier, observerte vannføringsserier og tidsserier for vanntilførsel (summen av regn- og snøsmelting) fra seNorge er brukt som inngangsdata. Det er utført en romlig statistisk analyse på vanntilførsel-data for å utarbeide IVF-kurver som igjen er brukt til å konstruere dimensjonerende hendelser for nedbørfeltene. Dette er så brukt for å undersøke hvor følsomme flomstørrelsene er for fordeling av vanntilførselen i tid og rom

**Emneord:** Flomberegninger, Regulert vassdrag, Vanntilførsel-data fra seNorge, Tilsigsserier, Flomforløp, Vassdragsreguleringer

Norges vassdrags- og energidirektorat  
Middelthuns gate 29  
Postboks 5091 Majorstuen  
0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95  
E-post: [nve@nve.no](mailto:nve@nve.no)  
Internett: [www.nve.no](http://www.nve.no)

# Innhold

<b>Forord</b> .....	<b>5</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Innledning</b> .....	<b>8</b>
1.1 Beregning av dimensjonerende flom i regulerte vassdrag – en litteraturstudie .....	8
1.1.1 Effekt av vassdragsreguleringer på flom .....	9
1.1.2 Beregning av dimensjonerende flom i regulerte vassdrag .....	9
1.1.2.1 Statistisk flomfrekvensanalyse på flom-data .....	9
1.1.2.2 Statistisk analyse på tilsigsserier og modell for flomdemping 10	
1.1.2.3 Hendelsesbaserte metoder .....	11
1.1.2.4 Kontinuerlig simulering .....	11
1.1.2.5 Semikontinuerlig simulering .....	11
1.2 Begreper og definisjoner .....	12
<b>2 Datagrunnlag</b> .....	<b>13</b>
2.1 Tilsigsserier.....	13
2.1.1 Ulike metoder for beregning av tilsigsserier.....	13
2.1.2 Tilsigsserier for Tinn-/ Skiensvassdraget og Randsfjorden/ Drammensvassdraget .....	17
2.2 Regn og snøsmelting fra seNorge.....	23
<b>3 Metode</b> .....	<b>24</b>
3.1 Statistisk modellering av ekstremer i seNorge data.....	24
3.2 Vassdragsmodeller .....	25
3.2.1 Måselvassdraget .....	26
3.2.1.1 Måleserier.....	30
3.2.1.2 Modelloppsett og kalibrering .....	31
3.2.1.3 Verifisering .....	36
3.2.2 Tinnvassdraget .....	38
3.2.2.1 Måleserier.....	41
3.2.2.2 Modelloppsett og kalibrering .....	41
3.2.2.3 Verifisering .....	46

3.2.3	Tovdalsvassdraget.....	48
3.2.3.1	Målestasjoner .....	48
3.2.3.2	Modelloppsett .....	50
3.2.3.3	Kalibrering .....	51
3.2.3.4	Verifisering .....	53
3.2.4	Randsfjorden.....	54
3.2.4.1	Måleserier.....	54
3.2.4.2	Modelloppsett .....	56
3.2.4.3	Kalibrering .....	58
3.2.4.4	Verifisering .....	62
<b>4</b>	<b>Resultater .....</b>	<b>64</b>
4.1	Variasjon av startvannstander i magasin.....	64
4.1.1	Måselvassdraget .....	64
4.1.2	Tinnvassdraget .....	67
4.1.3	Tovdalsvassdraget.....	70
4.1.4	Randsfjorden.....	72
4.2	Variasjon av nedbør i tid og rom .....	73
4.2.1	Plassering av nedbørtoppen i forløpet.....	74
4.2.2	Analyser av tidsserier for regn- og snøsmelting.....	76
4.2.2.1	Vanntilførselhendelser for Måselvassdraget .....	76
4.2.2.2	Vanntilførselhendelser for Tinnvassdraget.....	85
4.2.2.3	Sammenligning av vanntilførsel verdier fra seNorge med arealreduserte nedbørverdier.....	92
<b>5</b>	<b>Diskusjon .....</b>	<b>96</b>
5.1	Tilsigsserier .....	96
5.2	Bruk av seNorge data .....	97
5.3	Vassdragsmodeller .....	98
5.4	Variasjon av startvannstander i magasin – reguleringsgrad .....	99
5.5	Simuleringer med ulike forløp .....	100
5.5.1	Plassering av nedbørtoppen på ulike tidspunkter gjennom forløpet 100	

5.5.2	Romlig fordeling av vanntilførsel (arealfordeling).....	101
5.5.3	Fordelinger av vanntilførsel i tid (tidsfordeling) .....	101
<b>6</b>	<b>Oppsummering .....</b>	<b>103</b>
<b>7</b>	<b>Anbefalinger .....</b>	<b>106</b>
<b>8</b>	<b>Referanser .....</b>	<b>108</b>

# Forord

I perioden 2019 – 2020 ble prosjektet «Flomberegninger i regulerte vassdrag» (internt FoU prosjekt i NVE) gjennomført. Hovedmålet for prosjektet var å anbefale metoder og undersøke ulike tilnærminger for flomberegninger i regulerte vassdrag. I tillegg skulle prosjektet etablere vassdragsmodeller for noen utvalgte vassdrag, skrive rutinebeskrivelse for utarbeidelse og bruk av tilsigsserier og utføre statistiske analyser av regn- og snøsmelting i tid og rom.

Prosjektet har ikke fokusert på beregning av dimensjonerende flomverdier. Flomverdier som presenteres i rapporten kan derfor ikke brukes til dimensjonering, analyser eller for sammenligning med flomverdier som skal brukes til dimensjonering og/eller analyser.

Noen av problemstillingene vi ser på i dette prosjektet er ikke unike for regulerte vassdrag, eksempelvis fordeling av regn og snøsmelting i tid og rom. Derfor kan noen resultater, diskusjoner og anbefalinger i denne rapporten være like aktuelle for flomberegninger i uregulerte vassdrag som for flomberegninger i regulerte vassdrag.

Oslo, mai 2021



Hege Hisdal  
Direktør, Hydrologisk avdeling



Elise Trondsen  
Seksjonssjef, Vannbalanse

# Sammendrag

Prosjektets hovedfokus har vært å undersøke ulike tilnærminger for beregning av flommer i regulerte vassdrag gjennom å undersøke hvordan ulike vassdragsreguleringer og flomforløp påvirker flomforholdene. Vi har også i en litteraturstudie sett på hva som er vanlige utfordringer, metoder og anbefalinger i ulike sammenlignbare land. Ut fra litteraturstudien er det laget en sammenstilling over ulike metoder og anbefalinger som brukes for å beregne dimensjonerende flommer internasjonalt.

Prosjektet har utarbeidet en rutinebeskrivelse for hvordan tilsigsserier skal beregnes, og diskuterer betydningen av kvaliteten på magasin- og kraftverksdata i utarbeidelsen av disse. Flere tilsigsserier for aktuelle nedbørfelt er opprettet eller oppdatert og brukt direkte i analyser i prosjektet. Analysene er utført vha. vassdragsmodeller som er laget for fire utvalgte regulerte vassdrag i ulike landsdeler i Norge. Vassdragsmodellen er satt opp med ulik kompleksitet for å undersøke fordeler og ulemper med enkle og mer komplekse modeller. Som inngangsdata til modellene er det brukt tilsigsserier, observerte vannføringsserier og/eller tidsserier for vanntilførsel (summen av regn- og snøsmelting, RoS) fra seNorge.

Vi ville spesielt undersøke hvor følsomme flomstørrelsene i et vassdrag er, for hvordan vanntilførselen fordeler seg i tid og rom (mellom delfelt). Vi har derfor utført en romlig statistisk analyse på regn- og snøsmeltesdata (RoS) fra seNorge for å utarbeide IVF-kurver som deretter er brukt til å konstruere dimensjonerende hendelser for nedbørfeltene.

Noen av hovedfunnene er:

- Ledig magasinkapasitet i starten av flomforløpet gir generelt reduserte flommer, også for de ekstreme flommene, men effekten minker med økende størrelse på flommene. Svært forenklet ser vi i våre eksempler at aktuell reguleringsgrad på 5 – 10 % ved flommens start, ofte gir en reduksjon av avløpsflommene med 10 – 20 %.
- I et regulert vassdrag kan gode tilsigsserier konstrueres dersom en har gode vannhusholdningsdata. Gode tilsigsserier og tilsigsflommer kan bidra til å redusere usikkerheten i flomberegninger for et magasin eller vassdrag.
- Bruk av vanntilførseldata fra seNorge er effektivt, fleksibelt og enkelt. Vanntilførseldata (eller f.eks. nedbør, snøsmelting og temperatur) fra seNorge egner seg bla. til kalibrering av vassdragsmodeller. Volum for vanntilførseldata fra seNorge er, ut fra våre resultater, generelt mindre sammenlignet med observert volum fra måleserier.
- Kulminasjonsvannføringene varierte, som følge av ulike historiske arealfordelinger (romlig fordeling) av vanntilførsel data fra seNorge, med omkring +/- 5-10 % i forhold til gjennomsnittet (dette ble undersøkt for to vassdrag).
- Kulminasjonsvannføringene varierte, som følge av ulike historiske tidsfordelinger (tidsforløp) av vanntilførsel data fra seNorge, med omkring +/- 20 % (dette ble undersøkt for ett vassdrag).

- Effekten av å variere vanntilførsel i tid eller rom (tidsfordeling eller arealfordeling) var viktigere (ga større utslag på avløpsflommene) jo lavere vannstanden i magasinene var ved simuleringsstart.
- Når nedbørtoppen forskyves i tid (plasseres seinere i forløpet) øker den resulterende flomtoppen. Relativt sett er nedbørfelt med stor selvreguleringsevne/høy reguleringsgrad mer følsom for en slik tidsforskyvning enn små/raske felt (dette ble undersøkt for ett vassdrag).
- Vassdragsmodeller er et nyttig verktøy for å vurdere hvordan ulike initialtilstander, manøvreringer og flomforløp påvirker flomstørrelsene i et vassdrag.



# 1 Innledning

Ved beregning av dimensjonerende flom i et vassdrag med mange dammer og tilhørende reguleringsmagasin, bør man ta hensyn til hvordan vassdragsreguleringen påvirker flommene. En stor flom er et resultat av et komplekst samspill mellom hvordan ekstrem nedbør, og eventuell snøsmelting, fordeler seg over de ulike delfeltene og hvordan flomvannføringen transporteres nedover i vassdraget og gjennom de ulike magasinene.

For å ta hensyn til effekten av vassdragsreguleringer, ved beregning av dimensjonerende flom, må det tas hensyn til hvordan ekstreme tilløpsflommer dannes, omformes til avløpsflommer og transporteres videre nedover i vassdraget. Denne omformingen er bla avhengig av sesong og værforhold ved hver enkelt flomhendelse. Flommer i store regulerte vassdrag kan også være et resultat av flere sammensatte hendelser. Sannsynligheten for at ulike ekstreme hendelser kan opptre samtidig i forskjellige delfelt må derfor også vurderes.

I dette prosjektet har vårt hovedfokus vært å undersøke ulike tilnærminger for beregning av flommer i regulerte vassdrag og se hvordan vassdragsreguleringer påvirker flomforholdene. Vi ville også undersøke hvor følsomme flomstørrelsene i et vassdrag er for hvordan vanntilførselen (regn og snøsmelting) fordeler seg i tid og mellom delfelt. Dette har vi angrepet på ulike måter:

- 1) Gjennom en litteraturstudie har vi sett på hva som er vanlige utfordringer, metoder og anbefalinger i andre land (Engeland og Væringstad, 2020).
- 2) Vi har utarbeidet en rutinebeskrivelse for hvordan tilsigsserier skal beregnes, der det også er fokus på hvilken betydning kvaliteten på magasin- og kraftverksdata har på tilsigsseriene.
- 3) Det er utført en statistisk analyse på regn- og snøsmeltesdata fra seNorge, hvor vi også har sett på fordelingen av regn-snøsmeltesdata fra ulike historiske hendelser i tid og rom.
- 4) Vi har etablert vassdragsmodeller for utvalgte regulerte vassdrag i Norge. Vassdragsmodellene har vi brukt til å se på ulike problemstillinger som:
  - i. Betydningen av initialtilstander i magasiner.
  - ii. Hvordan ulik arealfordeling av regn- og snøsmelting påvirker flommene.
  - iii. Flomforløpets betydning på avløpsflommen gjennom å variere nedbørtoppens plassering i forløpet.

## 1.1 Beregning av dimensjonerende flom i regulerte vassdrag – en litteraturstudie

I Engeland og Væringstad (2020) er det gjort en litteraturgjennomgang med fokus på effekter av vassdragsreguleringer på flommer og hvilke tilnærminger som brukes til å beregne dimensjonerende flommer i regulerte vassdrag. Studien omfatter metoder som er presentert i tekniske rapporter, vitenskapelige artikler samt retningslinjer og anbefalinger fra flere land.

### 1.1.1 Effekt av vassdragsreguleringer på flom

I flere studier analyseres effekten av vassdragsreguleringer på flomstørrelser, uten at det knyttes opp til et gjentaksintervall for flommer. Generelt viser studier som sammenligner flomforholdene før og etter vassdragsreguleringer at flomtopper reduseres (Batalla et al., 2004). Eksempler er storflommen på Østlandet i 1995 der vassdragsreguleringer i Glomma og Lågen-vassdraget reduserte flomtopper (målt i  $m^3/s$ ) med opptil 11 % (Wathne og Alfredsen, 1998) og ekstremværet Synne der reguleringene i Sira-Kvina vassdragene enkelte steder reduserte flommen (målt i  $m^3/s$ ) med over 50 % (Weltzien, 2016a). Når reguleringskapasiteten er redusert pga. fulle magasiner, kan reguleringer føre til større flommer enn naturlig. Dette er demonstrert for Sollefå i Sverige (Bergström, 1999). Der viser de også til at det er spesielt flommer om våren som blir dempet mest av vassdragsreguleringer og at det gir større variasjon i flomstørrelser. En annen konsekvens er at flere av årets største flommer blir forskjøvet fra våren til høsten. Det finnes mange studier som ser på effekten av flomdemping i reguleringsmagasin (Hansen, 2018; Batalla et al. 2004; De Souza 2017; Du et al. 2016) og en god oversikt er gitt i Lee et al. (2017). Oppsummert viser flere studier at viktige faktorer som påvirker flomdemping er:

- Størrelsen på flommen. De store flommene dempes mindre enn de små flommene.
- Kortvarige flommer med en flomtopp dempes mest. Dempingen pga. vassdragsreguleringer er minst for de største flomhendelsene.
- For langvarige flommer, dempes flommen mest hvis den største flomtoppen kommer tidlig.
- Andel av oppstrøms avrenning som går gjennom reguleringsmagasin (og dermed andel uregulert avrenning).
- Kapasiteten / reguleringsgraden til reguleringsmagasinene.
- Kapasiteten til tappeorganene.
- Manøvreringen av reguleringsmagasinene, tappeorganer og overføringer under en flomhendelse.
- Transport av flomtopper gjennom elvestrekninger.
- For enkelte flomhendelser fra Sverige er det vist at vassdragsreguleringer kan øke flomtopper. Dette skjer spesielt for langvarige flommer når reguleringsmagasinene er fulle.

### 1.1.2 Beregning av dimensjonerende flom i regulerte vassdrag

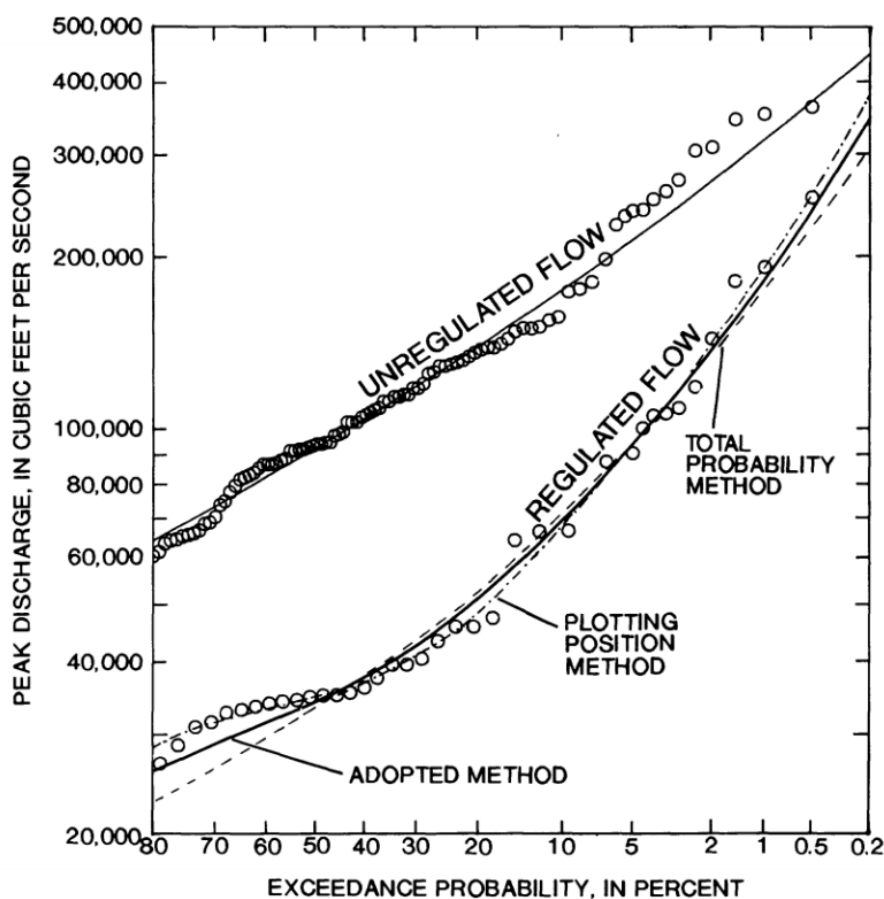
#### 1.1.2.1 Statistisk flomfrekvensanalyse på flom-data

For steder med lange tidsserier etter at vassdragsreguleringer er satt i drift, kan man utføre statistiske analyser direkte på data samlet inn etter at reguleringene startet. I Glover et al., (2018) gjøres dette for å sammenligne flomfrekvensfordelinger før og etter vassdragsreguleringer for deretter å analysere hvor mye vassdragsreguleringer har endret flomstørrelser og flomrisiko. Utfordringer med denne tilnærmingen er at tidsserier for

flommer ikke nødvendigvis er stasjonære for den regulerte perioden siden det ofte skjer en gradvis endring av reguleringsgrad og manøvreringsstrategi. Et annet alternativ er å bruke en ikke-stasjonær modell for å modellere effekten av vassdragsreguleringer der reguleringsgrad brukes som kovariat sammen med klima-indeksjer (López & Francés, 2013). Hallberg et al. (2016) anbefaler å bruke sammensatte frekvensfordelinger, f.eks. en blanding av to Gumbel-fordelinger.

### 1.1.2.2 Statistisk analyse på tilsigsserier og modell for flomdemping

Sanders Jr. et al. (1990) presenterer en metode under navnet 'Total probability approach'. Flomfrekvensanalysen utføres på tidsserier med naturlig vannføring og en empirisk ligning brukes for å regne naturlige flomtopper om til flomtopper etter vassdragsreguleringer. Figur 1 nedenfor illustrerer sammenheng mellom regulerte og uregulerte flommer. Utfordringen med denne metoden er at naturlige flommer i mange regulerte vassdrag er kraftig dempet og kamuflert. I vårflom-dominerte vassdrag, kan flomsesongen flyttes til høsten og dermed vil de fleste flommene bli skapt av regnhendelser istedenfor snøsmelting.



Figur 1. Flomfrekvensfordeling for naturlige og regulerte flomtopper i Savannah (Sanders, Jr. et al., 1990). Reprodusert med tillatelse fra U.S. Geological Survey.

Ved flere reguleringsmagasin kan man bruke metoden beskrevet i Guo et al. (2018) og Xiong et al. (2019). Først beregnes dimensjonerende flom samt typiske flomhydrogram for uregulert vannføring. Deretter utføres en regional dekomponering av flom der man tar

hensyn til sammenhenger mellom flomstørrelser for ulike delfelt. Til sist rutes flomhydrogrammene nedover vassdraget, reguleringsmagasin for reguleringsmagasin. Beregningene kan gjøres for flommer av ulike varigheter. Motivasjonen med denne tilnærmingen er å ta hensyn til flomdemping i oppstrøms reguleringsmagasin når behovet for flomdempingskapasitet i nedstrøms magasin skal beregnes.

#### 1.1.2.3 Hendelsesbaserte metoder

For hendelsesbaserte metoder lages en dimensjonerende nedbørsekvens som kjøres gjennom en nedbør-avløpsmodell for å beregne tilløpsflommen. En vassdragsmodell brukes deretter for å beregne avløpsflommen. Denne tilnærmingen komplementerer bruken av flomfrekvensanalyse. I Norge brukes denne tilnærmingen ofte med nedbør-avløpsmodellen PQRUT (Andersen et al., 1982) sammen med estimater av ekstrem nedbør (f.eks. 500 år, 1000 år og påregnelig maksimalnedbør/PMP). Estimater av ekstremnedbør og varighet for hver returperiode og sesong er gitt av Meteorologisk institutt etter metoden beskrevet i (Førland, 1992; Førland og Kristoffersen, 1989). Denne metoden bruker en lignende tilnærming til den som er utviklet av NERC (1975) og videreutviklet i Kjeldsen (2007b) for Storbritannia. De viktigste årsakene til at denne tilnærmingen anbefales er at (i) tidsserier for nedbør ofte er lengre enn vannføringsserier, (ii) nedbørstasjonsnettene er tettere enn målestasjonsnettene for vannføring og (iii) nedbør viser sterkere regional konsistens enn avrenning (Killingtveit and Sælthun, 1995). Estimering av den påregnelige maksimale flommen (PMF), som brukes for dammer i Norge for å vurdere sikkerhet mot dambrudd, skal primært gjøres via PMP og en nedbør-avløpsmodell.

#### 1.1.2.4 Kontinuerlig simulering

For kontinuerlig simulering av vannføring i regulerte vassdrag, brukes kontinuerlige tidsserier med tilslag i en vassdragsmodell som tar hensyn til forsinkelser langs vassdraget og regler for manøvrering av reguleringsmagasin. Basert på simulerte tidsserier kan man så f.eks. ta ut årsmaksima og bruke standard statistisk tilnærming for å beregne flomstørrelser for ulike gjentaksintervall. En fordel med kontinuerlig simulering er at man ikke trenger anta noe om magasinnivå i forkant av en flomhendelse når man bruker vassdragsmodellen (Ayalew et al., 2013). For å beregne kontinuerlige tidsserier med tilslag, brukes ofte observerte eller simulerte tidsserier for meteorologiske variabler til å drive en hydrologisk nedbør-avløpsmodell. En oversikt over denne tilnærmingen er gitt i Boughton og Droop (2003).

#### 1.1.2.5 Semikontinuerlig simulering

SCHADEX metoden (Paquet et al., 2013) er en semikontinuerlig simuleringsmetode for å beregne dimensjonerende flomstørrelser. Metoden bruker observerte tidsserier for nedbør, temperatur og vannføring for å kalibrere en hydrologisk modell til et nedbørfelt. Videre etableres det en statistisk modell for ekstreme nedbørhendelser der det tas hensyn til sesonger og værtyper. I den observerte tidsserien for vannføringer identifiseres flomhendelser. For hver av disse hendelsene erstattes observert nedbør med flere tilfeldige nedbørverdier som blir tilordnet sannsynligheter fra den statistiske modellen. Slik kan hver flomhendelse simuleres flere ganger. Til sammen får vi da et rikt utfall av flomhendelser for ulike initialtilstander i nedbørfeltet. Metoden er testet for Norge i (Lawrence et al., 2014; Lawrence og Skaugen, 2018) der SCHADEX-metoden blir kombinert med DDD-modellen. For regulerte vassdrag kan man bruke en semi-fordelt SCHADEX-tilnærming (SHADEX-SD) som demonstrert i Viard et al., (2019). I denne tilnærmingen simuleres det nedbørhendelser først som et snitt over hele feltet. Deretter fordeles nedbøren på delfelt ved å ta i bruk romlige mønstre fra tidligere hendelser. Nedbør-avrenningsmodeller brukes for hvert delfelt for å beregne tilslag som deretter rutes gjennom reguleringsmagasinene.

## 1.2 Begreper og definisjoner

Magasinvolum (M) er magasinvolument mellom LRV og HRV gitt i mill.m<sup>3</sup>.

Reguleringsgrad (R), er definert som sum magasinvolument (M) for alle oppstrøms magasin dividert med midlere årlig tilsig (Q<sub>mid</sub>) (mill. m<sup>3</sup>). Reguleringsgrad beregnes da etter følgende formel:

$$R = M / Q_{\text{mid}}$$

Fyllingsgrad (F) er definert som sum aktuelle magasinvolument (M<sub>A</sub>) for alle oppstrøms magasiner dividert med totalt magasinvolument (M) og beregnes med følgende formel:

$$F = M_A / M$$

Aktuell reguleringsgrad (R<sub>A</sub>) er definert som sum ledig magasinvolument for alle oppstrøms magasiner dividert med midlere årlig tilsig. Aktuell reguleringsgrad kan da beregnes ut fra følgende sammenheng:

$$R_A = (M - M_A) / Q_{\text{mid}} = (M - M * F) / Q_{\text{mid}} = (1 - F) * M / Q_{\text{mid}} = (1 - F) * R$$

Eksempelvis hvis alle magasin er på:

- LRV så er R<sub>A</sub> = R
- HRV så er R<sub>A</sub> = 0
- 25 % fyllingsgrad så er R<sub>A</sub> = 0,75 \* R
- 50 % fyllingsgrad så er R<sub>A</sub> = 0,50 \* R
- 75 % fyllingsgrad så er R<sub>A</sub> = 0,25 \* R

Aktuell reguleringsgrad er det samme som begrepet “flomreguleringsgrad”, som er definert som “ledig magasinkapasitet ved starten av flommen delt på årlig middeltilsig” (Hansen 2018).

## 2 Datagrunnlag

### 2.1 Tilsigsserier

En tilsigsserie i et regulert vassdrag beskriver den vannføring en ville hatt om det verken var dempning i oppstrøms magasiner eller overføringer inn eller ut av vassdraget. Ved konstruksjon av tilsigsserier er det viktig å vurdere kvaliteten på datagrunnlaget.

Det er behov for følgende data for å kunne lage en tilsigsserie:

- En vannføringsserie som beskriver totalavløpet fra det magasinet/punktet i vassdraget hvor tilsigsserien skal beregnes.
  - o Ofte er dette en serie satt sammen av driftsvannføring gjennom kraftverk, overløp og ev. forbitapping ut fra magasinet.
  - o I enkelte tilfeller er det en målestasjon i elva nedstrøms et magasin som registrerer totalavløpet fra magasinet.
- Magasin vannstander, helst med døgnoppløsning for alle oppstrøms magasiner.
  - o Eldre magasin vannstander har ofte ukesoppløsning, det gir en systematisk underestimert beregnet flomtilsig.
  - o Magasinkurve som gir sammenhengen mellom observert vannstand og vannvolum.
- Størrelsen og variasjonen i overførte vannmengder inn/ut av det naturlige nedbørfeltet.
  - o I enkelte tilfeller er det en målestasjon i elva/bekken rett oppstrøms inntaket som overfører vann, da benyttes denne direkte.
  - o Som regel er det ingen direkte målinger av overførte vannmengder mellom nedbørfelt. Dette beregnes da ved hjelp av en representativ vannføringsstasjon som beskriver tilsiget til det aktuelle bekkeinntaket på en god måte.
    - Ved flom vil noe vann renne forbi inntaket og «mistes» som flomtap. Dette blir det normalt ikke korrigert for i tilsigsseriene.

I en flomsituasjon vil tilsigsflommen være en flom hvor magasinert vannvolum i oppstrøms magasin er beregnet og tillagt flommen. På samme vis vil, om et magasin tappes ned under flom, dette vannvolumet trekkes fra tilsigsflommen.

#### 2.1.1 Ulike metoder for beregning av tilsigsserier

Ved beregning av tilsigsserier kan ulike beregningsmetodikk legges til grunn. I NVEs programvare (Hydra II) er det lagt til rette for to metoder, bruk av usentrerte eller sentrerte differanser ved beregning av magasin volumendringer.

I NVEs retningslinjer for flomberegninger for damsikkerhet (Midttømme mfl., 2011), er det anbefalt å benytte usentrerte fremfor sentrerte differanser når magasin volumendringer beregnes. Det vil si at en beregner volumendringen fra en dag til neste, og ikke som ved bruk av sentrerte differanser hvor volumendringer midles over 2 døgn.

Hvis «i» står for den aktuelle dagen,  $V$  er magasin volum og  $Q_{(avløp)}$  er summen av avløp fra magasinet, blir tilsiget beregnet på følgende måte i NVEs programvare:

### Usentrerte differanser («backward»)

$$Q_{\text{tilsig}(i)} = Q_{\text{avløp}(i)} + (V_{(i)} - V_{(i-1)}) / (1 \text{ døgn})$$

### Sentrerte differanser

$$Q_{\text{tilsig}(i)} = Q_{\text{avløp}(i)} + (V_{(i+1)} - V_{(i-1)}) / (2 \text{ døgn})$$

Ved bruk av usentrerte differanser beregnes magasinendring fra i går til i dag, dvs «backward» magasinendring, mens ved sentrerte differanser ser en på magasinendring over 2 døgn. Fordelen med bruk av sentrerte differanser er at det blir mindre «støy» i beregnet tilsig som følge av unøyaktigheter i magasin vannstander, ulempen er at alle flomtopper blir noe underestimert.

Sum avløp ( $Q_{\text{avløp}}$ ) kan være sammensatt av vann gjennom overløp, luker, driftsvannføring eller annen forbitapping. Enkelte steder, som for eksempel nedstrøms Tinnsjøen, er det en målestasjon som registrerer totalavløpet fra magasinet.

Det fins også andre metoder for beregning av tilsig, ved for eksempel å benytte usentrerte differanser og «Forward» magasinendring, da får en:

### Usentrerte differanser (forward):

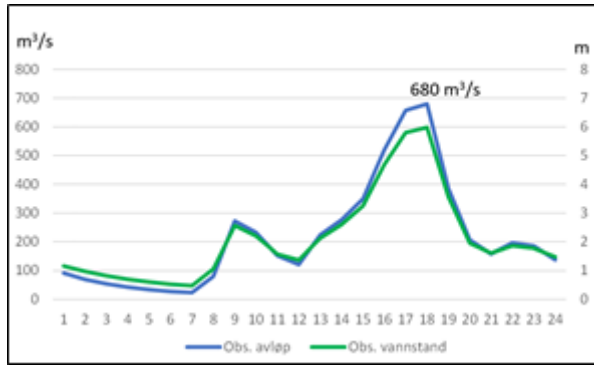
$$Q_{\text{tilsig}(i)} = Q_{\text{avløp}(i)} + (V_{(i+1)} - V_{(i)}) / (1 \text{ døgn})$$

Eller tilsiget kan beregnes ved å midle avløpet over 2 tidsskritt i kombinasjon med for eksempel usentrerte «backward» magasindifferanser. Da får en:

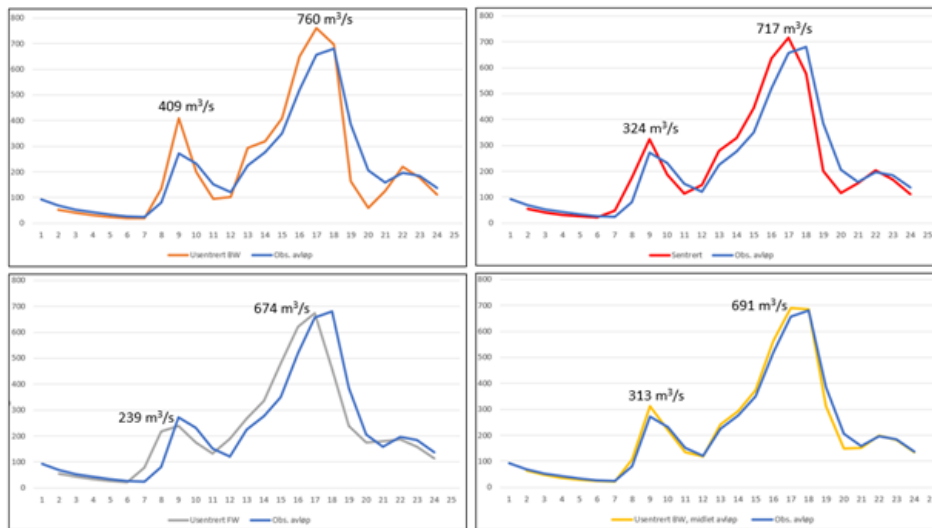
### Usentrerte differanser («backward»), midlet avløp

$$Q_{\text{tilsig}(i)} = (Q_{\text{avløp}(i)} + Q_{\text{avløp}(i-1)}) / 2 + (V_{(i)} - V_{(i-1)}) / (1 \text{ døgn})$$

Disse fire metodene kan gi relativt store forskjeller i beregnet flomtilsig, og hvilken metode som er den mest korrekte er ikke åpenbart. I Figur 2 og Figur 3 vises resultater fra et regneeksempel med utgangspunkt i observerte data fra Vangsvatnet i Voss under en stor flom høsten 2014 med først en “liten flomtopp” og deretter en stor flom. De ulike metodene gir fire ulike tilsig hvor største døgntilsig varierer fra ca. 230 til 410 m<sup>3</sup>/s for den første flomtoppen og fra ca. 670 til 760 m<sup>3</sup>/s for den andre. I dette eksemplet gir bruk av «Forward» magasinendring et maksimalt tilsig som er mindre enn største avløp, det kan ikke være riktig. Ser vi bort fra denne metoden, er det et avvik mellom de tre andre metodene på ca. 25 % for den første flomtoppen og 10 % for den andre. Årsaken til at det er relativt større forskjell for den første enn den andre flomtoppen, skyldes at Vangsvatnet steg mer i løpet av 1 døgn under det første forløpet enn under det andre (“spissere” forløp).



Figur 2. Observert vannstand (grønn) og avløp (blå) (døgnmidler) ved målestasjonen 62.5 Bulken i Vangsvatnet fra 12.oktober til 4. november 2014.

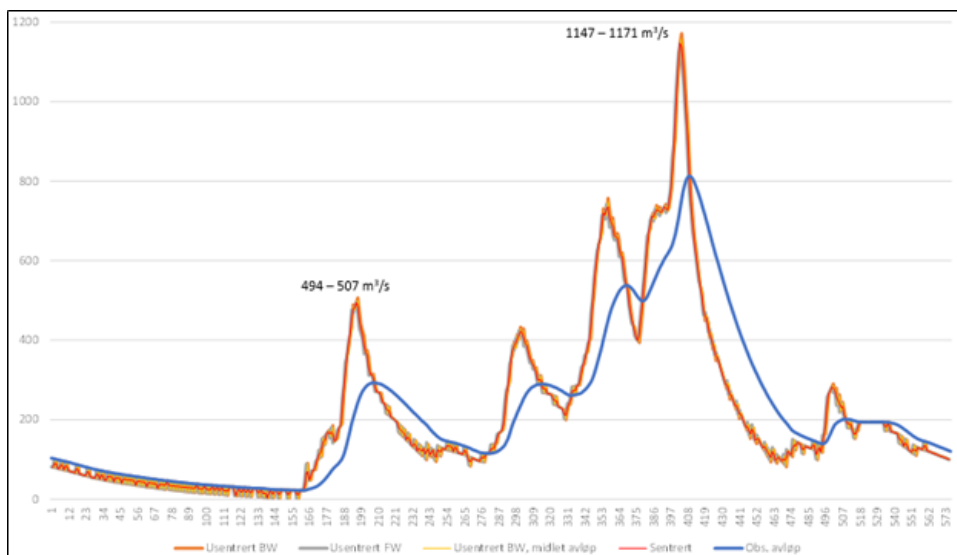


Figur 3. Observert avløp ved Bulken (blått) og beregna tilsig (døgndata) med henholdsvis bruk av «backward» usentrerte differanser (øverst venstre), sentrerte differanser (øverst høyre), «forward» usentrerte differanser (nederst venstre) og «backward» usentrerte differanser og midlet avløp (nederst høyre).

### Timesdata

Hvis en imidlertid benytter timesdata i stedet for døgndata ved beregning av tilsig, gir de ulike metodene nesten identiske resultater (Figur 4). Variasjonen i maksimalt beregnet timestilsig varierer rundt 500 m<sup>3</sup>/s for den første flomtoppen og fra ca. 1150 til 1170 m<sup>3</sup>/s for den høyeste flomtoppen. Avvikene mellom de ulike metodene er kun 1 – 2 %. Dette eksemplet antyder at beregnet tilsig er vesentlig mindre følsomt for valg av metodikk når tidsoppløsningen blir mindre enn et døgn.



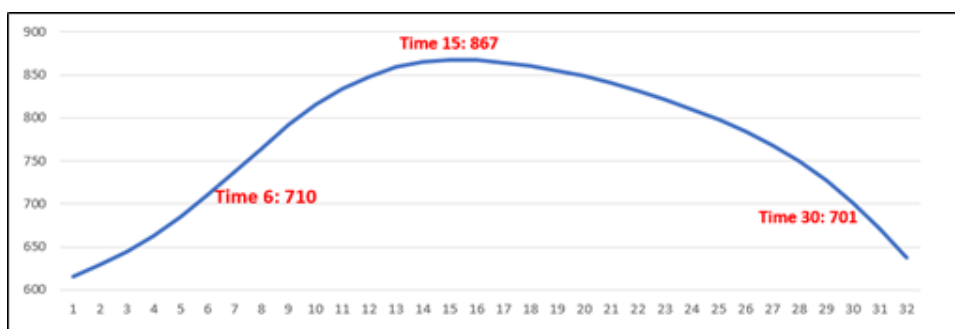


Figur 4. Observert avløp ved Bulken (blått) og beregna tilsig (timesdata) med henholdsvis bruk av «backward» usentretre differanser (oransje), sentretre differanser (rød), «forward» usentretre differanser (grå) og «backward» usentretre differanser og midlet avløp (gul). Beregningene er gjort for perioden 12.oktober til 4 november 2014.

### Variasjon i 24 timers middel

Det er for denne flommen også sett på variasjonen i 24 t glidende middeltilsig (Figur 5). Dette viser at avhengig av når på døgnet flommen kulminerer, vil største døgnmiddeltilsig kunne variere fra omkring 710 m<sup>3</sup>/s til 870 m<sup>3</sup>/s. Det vil si at «gunstigst» mulig kulminasjonstidspunkt gir ca. 20 % større døgnmiddel enn det mest «ugunstige» tidspunktet som fordeler flommen over to døgn.

Denne flommen kulminerte på et gunstig tidspunkt med tanke på et «høyt» døgntilsig. Alle de fire metodene, gir med bruk av timesdata fra kl. 01 – kl. 24 den 28. oktober 2014, et døgntilsig på ca. 860 m<sup>3</sup>/s. Dette tilsiget er 100 m<sup>3</sup>/s større enn det en får ved å benytte døgndata og usentretre differanser. Det er imidlertid viktig å understreke at dette kun er et regneeksempel for en hendelse, og derfor ikke kan generaliseres.



Figur 5. 24-timers glidende middeltilsig til Bulken/ Vangsvatnet ved bruk av «backward» usentretre differanser. Beregningene er gjort for perioden rundt flomkulminasjon i oktober 2014.

## 2.1.2 Tilsigsserier for Tinn-/ Skiensvassdraget og Randsfjorden/ Drammensvassdraget

Det er i tilknytning til dette prosjektet laget tre tilsigsserier for delfelt i Skiensvassdraget og en i Drammensvassdraget. Det er benyttet døgndata og usentrerte differanser ved beregning av magasinendringer. Det betyr at magasinendring er beregnet som differansen mellom to påfølgende dager. Tidligere har en ofte midlet magasinendringene over flere dager (sentrerte differanser), det gir noe mindre «støy» i tilsigsserien, men samtidig vil det systematisk underestimere flomtopper.

Gode grunnlagsdata, enten det er tidsopløsningen og nøyaktigheten på magasin vannstander, driftsvannføringer gjennom kraftverk eller overløp/forbitapping fra magasin, er av avgjørende betydning for å få gode tilsigsserier. Fra tid til annen er det kortere eller lengre observasjonsbrudd i noen av grunnlagsseriene. Slike brudd er komplettert ved lineær interpolasjon. Observasjonsbrudd i magasin data i flomperioder fører til underestimering av beregnet flomtilsig.

### Tilsigsserier Tinn-/ Skiensvassdraget

Det er laget tre tilsigsserier for Skiensvassdraget, en for Møsvatn, en for magasinene Kalhovd/Gjøyst (Strengen) og en for Tinnsjøen (Kirkevoll bru). Nedenfor er det knyttet noen korte kommentarer til konstruksjonen av de ulike tilsigsseriene. For oversikt over vassdraget se kapittel 3.2.2 Tinnvassdraget.

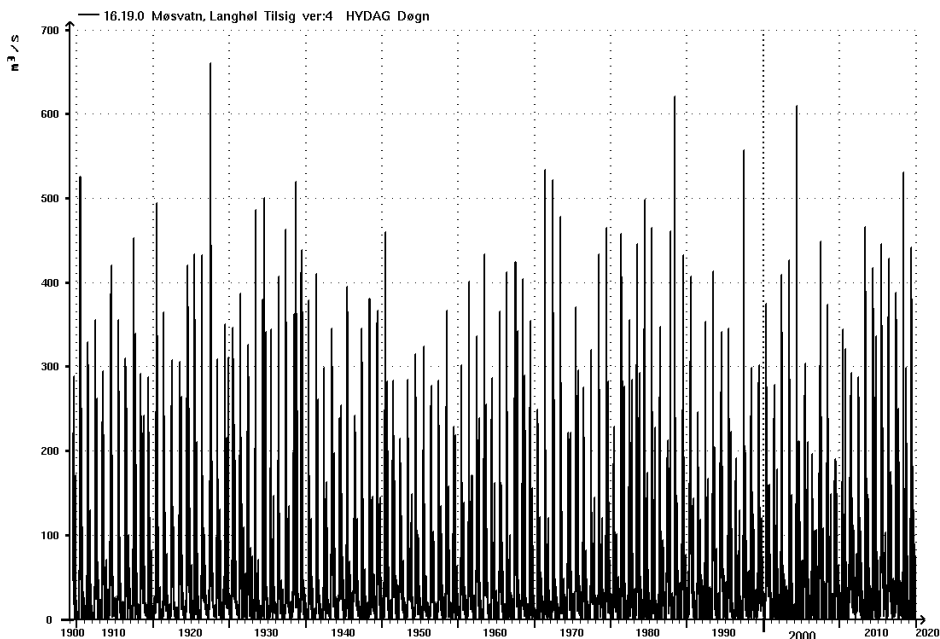
#### Møsvatn

Det er ingen magasiner oppstrøms Møsvatn, og det er heller ingen overføringer inn eller ut av nedbørfeltet til Møsvatn med unntak av vannet som tappes gjennom Frøystul kraftverk.

Avløpet fra Møsvatn er summen av driftsvannføring gjennom Frøystul kraftverk og flomtap/forbitapping fra Møsvatn. Fra 1909 til 2006 er dette rapportert til NVE som en sum vannføring fra regulant. Fra 2007 er avløpet delt i driftsvannføring og overløp/tapping. Vi har ingen vannføringsmålinger for kontroll av disse. Det vil si at kvaliteten på tilsigsserien fullt og helt er basert på at de tilsendte dataene har god kvalitet.

Magasin vannstandene fra Møsvatn er stort sett registrert hvert døgn tilbake til målestart i 1909. Det er enkelte korte observasjonsbrudd, men med unntak av et år, er det ikke mistanke om at disse sammenfaller med årets største tilsig. Siste uke i mai 2009 mangler magasin data fra Møsvatn, i denne perioden kulminerer beregnet tilsig med  $190 \text{ m}^3/\text{s}$ . Det er det nest laveste beregnede flomtilsiget i den over 100 år lange tidsserien. 2009 bør derfor utelates i forbindelse med flomanalyser av denne serien. Figur 6 viser tilsigsserien for Møsvatn i perioden 1909 – 2019.

En analyse av dataene viser at for de 8 største beregnede tilsigsflommene, har sum avløp fra Møsvatn utgjort mindre enn 10 % av det beregnede flomtilsiget. Ved den største beregnede tilsigsflommen, i juni 1927, ble hele tilsiget lagret i magasinet. Da var det verken drift i kraftverk eller overløp/forbitapping fra Møsvatn da flommen kulminerte. Dette tilsier, at gitt gode magasin data, er de beregnede flomtilsigene for Møsvatn av god kvalitet.



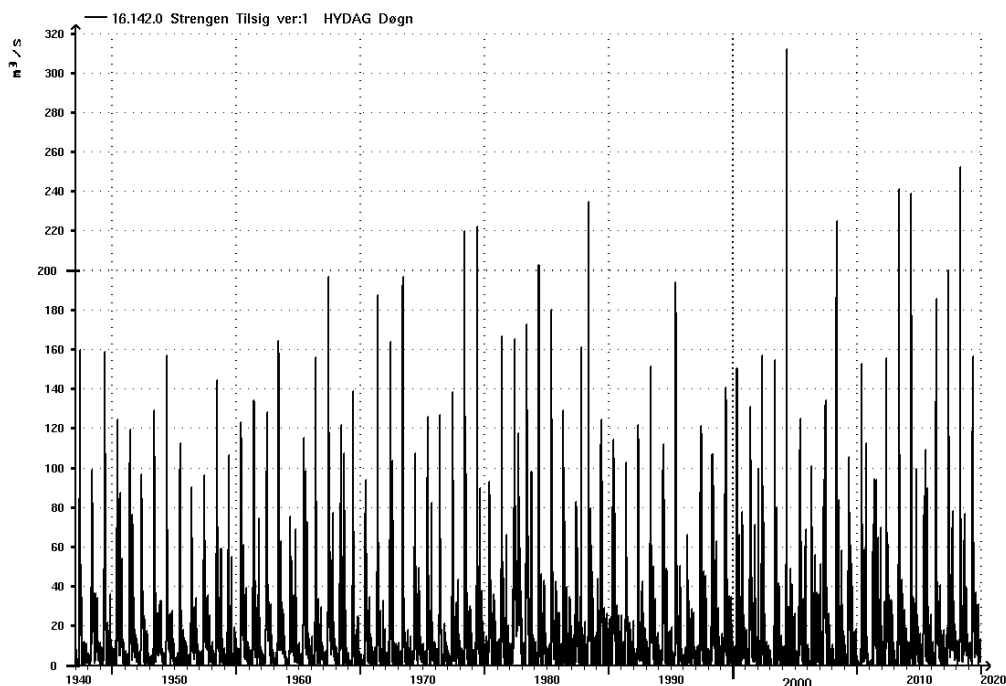
Figur 6. Tilsigsserie for Møsvatn 1909 – 2019.

### Strengen

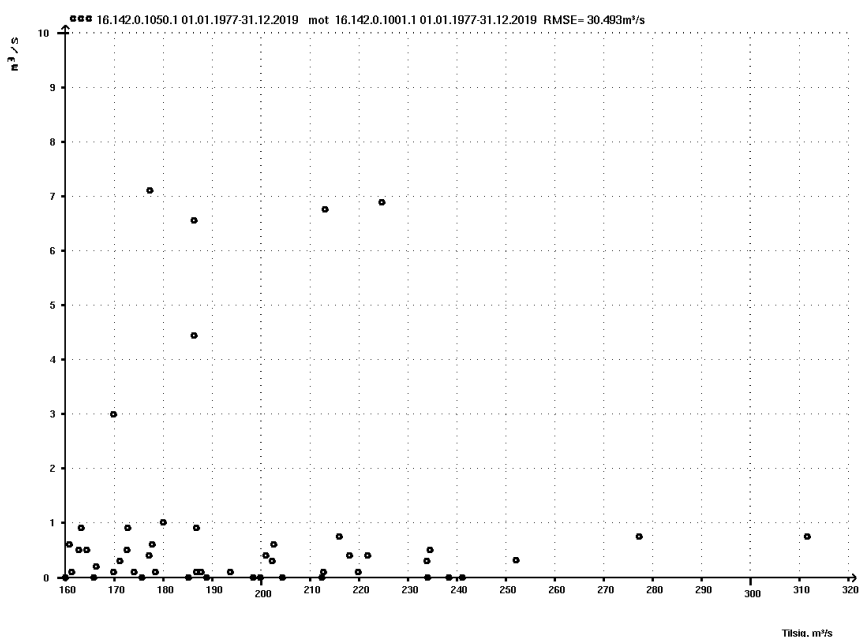
Målestasjonen Strengen ligger ved utløpet av Gøystvavn. Dette er demmet opp til et felles magasin med Kalhovd, og regulanten rapporterer sum avløp fra disse magasinene som «observert avløp» for Strengen. I tillegg inkluderer tilsigsserien for Strengen, også magasinet Mårvatn, som er overført fra Mårvassdraget. Dette fordi vi ikke har data som viser hvor mye vann som overføres fra Mår til Kalhovd, eller fra Kalhovd til Strengen. Gøystvavn hadde et naturlig nedbørfelt på 72,6 km<sup>2</sup>, inkludert Kalhovd og Mår får tilsigsserien til Strengen et totalt nedbørfelt på 662 km<sup>2</sup>.

For magasinet Kalhovd/Gøyst er det stort sett daglige observerte vannstander siden 1947, men i Mårvatn ble vannstanden vanligvis registrert en gang pr uke frem til 1976. Det medfører at flomverdiene i den beregnede tilsigsserien blir for lave de første 10-årene, noe en kan se av Figur 7.

En analyse av dataene viser at for alle de omkring 60 største beregnede tilsigene etter 1977, har sum avløp ved Strengen utgjort mindre enn 5 % av det beregnede flomtilsiget (Figur 8). Ved den største beregnede tilsigsflommen, i mai 2004, ble hele tilsiget lagret i magasinet. Dette tilsier, at gitt gode magasindata, er de beregnede flomtilsigene for Strengen av god kvalitet.



Figur 7. Tilsigsserie for Strengen (Kalhovd, Gøyst og Mår) 1947 - 2019. Årene 1947-1976 egner seg ikke for flomanalyser pga ukentlige magasin vannstander i Mår.



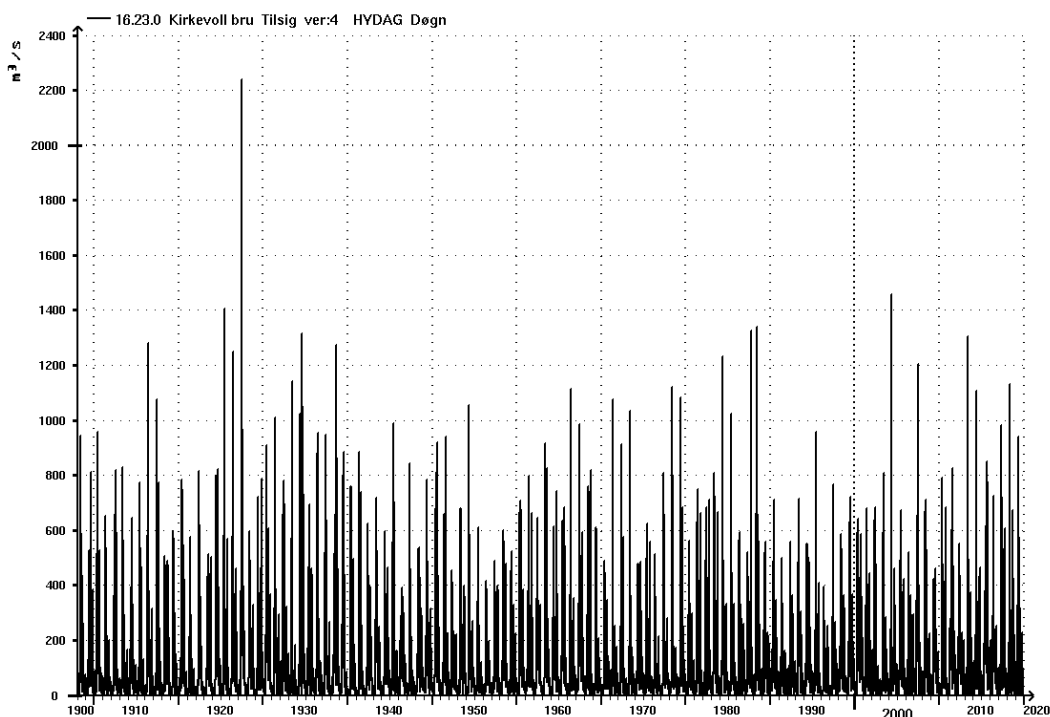
Figur 8. Observert avløp Strengen (y-akse, 0 – 10 m<sup>3</sup>/s) og samtidig beregnet tilsig Strengen (x-akse, 160 – 320 m<sup>3</sup>/s) ved de største beregnede tilsigene fra 1977 - 2019.

### Tinnsjøen/ Kirkevoll bru

Fra Tinnsjøen, som ligger nedstrøms Møsvatn og Kalhovd/Strengen, er det observert avløp siden 1905 ved målestasjonen 16.23 Kirkevoll bru (Figur 9). Tilsigsserien er startet fra 1908, som er det første året med daglige magasin vannstander for Møsvatn. I magasinet Mårvatn, er det som nevnt i avsnittet om Strengen, kun observert

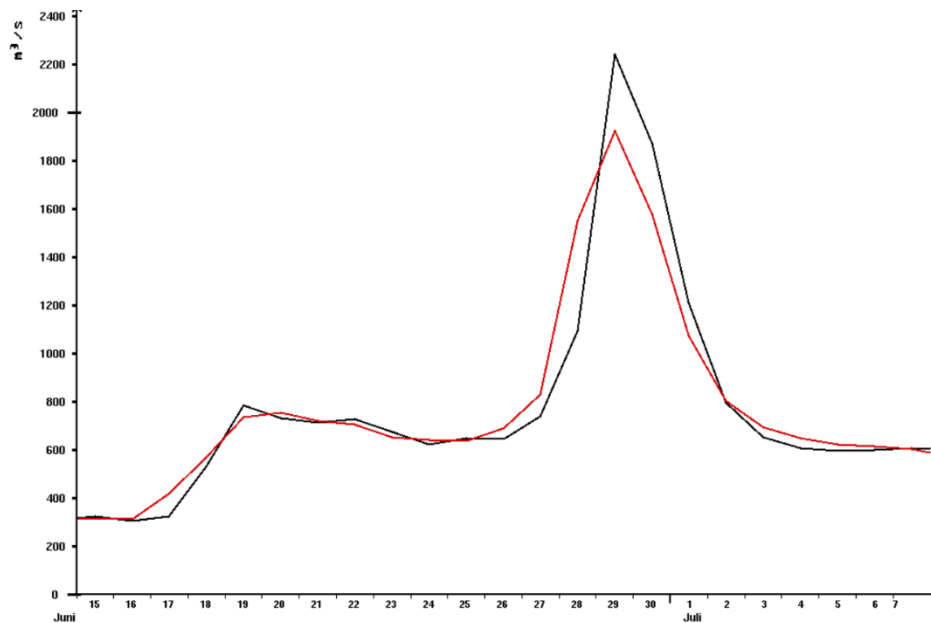
magasin vannstand en gang per uke frem til 1976. Det medfører at også flomverdiene ved Kirkevoll bru må antas å være noe underestimert i årene frem til 1976.

Nedstrøms Kalhovd/Strengen ligger også et lite magasin, Nedre Grottevatn. I dette magasinet er det mer mangelfulle observasjoner, og det fungerer først og fremst som inntaksmagasin for Mår kraftverk. Langs tilløpstunnelen til Mår kraftverk er det og tre små lokale magasin. Til sammen har disse fire magasinene et reguleringsvolum på ca. 5 mill m<sup>3</sup>, til sammenligning er magasin volumet i Tinnsjøen 204 mill m<sup>3</sup> og i Møsvatn 1064 mill m<sup>3</sup>. Det er sett bort fra disse små magasinene ved beregning av tilsig til Tinnsjøen.



Figur 9. Tilsigsserie for Tinnsjøen/ Kirkevoll bru 1908 - 2019

Det er nevnt tidligere at det ved konstruksjon av disse tilsigsseriene er benyttet usentrerte differanser, det vil si at magasinendringer er beregnet fra et døgn til neste og ikke over 3 døgn slik en gjør ved bruk av sentrerte differanser. I Figur 10 er virkningen av dette for flommen i 1927 illustrert, som er den største flommen i tidsserien. Tilsigsflommen økte fra ca. 1920 m<sup>3</sup>/s til ca. 2240 m<sup>3</sup>/s, eller en økning på 15 – 20 %.



Figur 10. Beregnet tilsig til Tinnsjøen/ Kirkevoll bru under flommen i 1927 ved bruk av usentrerte differanser (svart kurve) og sentrerte differanser (rød kurve).

I lokalfeltet til Tinnsjøen, som er 1676 km<sup>2</sup>, ligger en uregulert målestasjon 16.128 Austbygdeåi. Denne stasjonen har et nedbørfelt på 344 km<sup>2</sup> og utgjør dermed ca. 20 % av lokalfeltet til Tinnsjøen. Som en kontroll på de tre tilsigsseriene er det beregnet en differanse mellom tilsigsserien til Tinnsjøen og tilsigsseriene for Møsvatn og Strengen. Denne differanseserien vil da representere lokalfeltet til Tinnsjøen. I Figur 11 er dette sammenlignet med midlere spesifikk vannføring ved målestasjonen Austbygdeåi. En ser av figuren at det er godt samsvar mellom tidsseriene, noe som er en indikasjon på at alle de tre beregnede tilsigsseriene har rimelig god kvalitet.



Figur 11. Spesifikk vannføring ved 16.128 Austbygdeåi (svart strek, venstre y-akse) og beregnet tilsig for lokalfeltet til Tinnsjøen (rød strek, høyre y-akse). Grafene viser gjennomsnittlige verdier for år med felles data i perioden 1977 – 2018.

## Tilsigsserie Randsfjorden/ Drammensvassdraget

Det er laget en tilsigsserier for Randsfjorden (Kistefoss) i Drammensvassdraget tilbake til 1880. Ved konstruksjon av tilsigsserien er det korrigert for magasinendringer (usentrerte differanser) i Randsfjorden, Dokkfløyvatn og tre mindre magasin (Velmunden, Sortungen og Akksjøen).

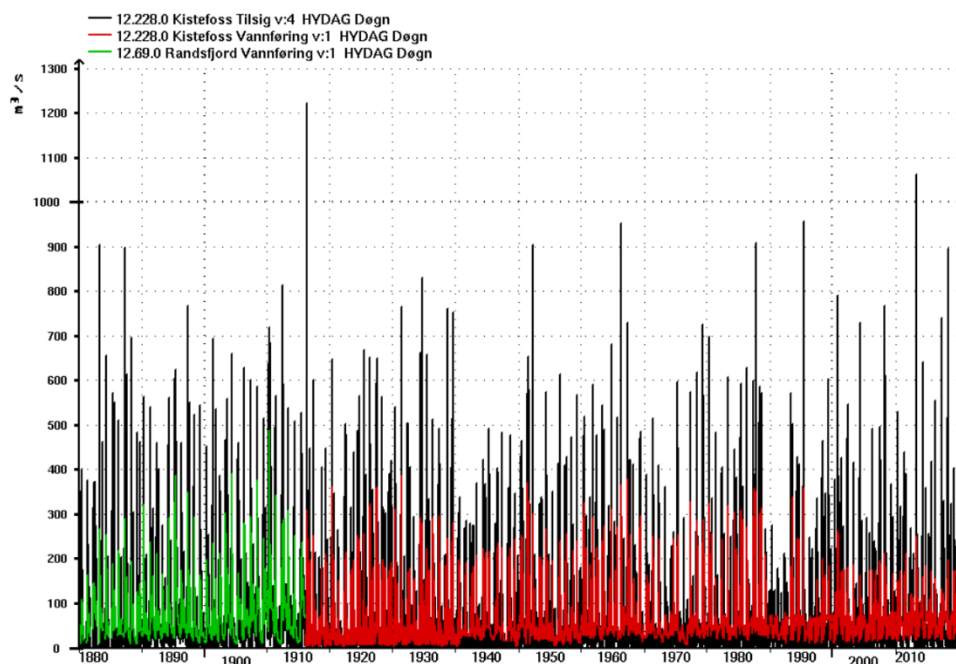
Til Dokkfløyvatn overføres blant annet Synna, som har naturlig avløp mot Randsfjorden. I denne elven er det ingen aktiv vannføringsstasjon. Hvis vi skulle ha konstruert en tilsigsserie for Dokkfløyvatn, måtte overførte vannmengder fra Synna vært beregnet. Ved beregning av tilsig til Randsfjorden, nulles imidlertid dette ut, ved at overført vann fra Synna inngår i volumendringene i Dokkfløyvatn. For mer detaljert oversikt over vassdraget, se kapittel 3.2.4 Randsfjorden.

Avløpet fra Randsfjorden ble registrert ved målestasjonen 12.69 Randsfjord fra 1869 og ved 12.228 Kistefoss fra 1916. Ved Kistefoss er det utført vannføringsmålinger for vannføringer opp til nesten 300 m<sup>3</sup>/s. Flommene i Randselva har ofte vært mellom 200 og 400 m<sup>3</sup>/s (Figur 12), som betyr at avløpet fra Randsfjorden antas å være godt bestemt.

I Randsfjorden er det vannstandsdata med døgnoppløsning tilbake til 1880. Før 1886 mangler riktignok vannstander om vinteren. Målingene ble imidlertid startet opp igjen på våren da vannstanden var omkring årsminimum. Vannstander disse vintermånedene er derfor ifyllt ved interpolasjon ved konstruksjon av tilsigsserien. Dette betyr lite for beregnede årsvolumer og har ingen betydning for beregnede flomverdier i tidsserien, men det kan være perioder vinterstid med noe for høyt og noe for lavt tilsig.

I Dokkfløyvatn er det daglige vannstandsdata fra dette ble tatt i bruk i 1992. Fra 1990- og 2000-tallet er det også døgndata fra de mindre magasinene. Disse ble etablert fra 1920-tallet og framover. Magasineringen av vann i disse mindre magasinene har imidlertid marginal betydning for beregna tilsig til Randsfjorden.

Tilsigsserien er vist i Figur 12 sammen med observert avløp ut av Randsfjorden. De to største døgntilsigene er i mai 1916 med ca. 1220 m<sup>3</sup>/s og mai 2013 med ca. 1060 m<sup>3</sup>/s. Flommene ut av Randsfjorden disse årene var ikke spesielt store (ca. 300 og 250 m<sup>3</sup>/s). Det skyldes relativt lav vannstand i Randsfjorden da tilsiget kulminerte, i tillegg var det heller ikke overløp fra Dokkfløyvatn under flommen i mai 2013. Den største avløpsflommen var i mai 1910 med nesten 500 m<sup>3</sup>/s, dette faller sammen med høyeste beregna 15 døgns tilsig (ca. 550 m<sup>3</sup>/s).



Figur 12. Tilsigsserie for Randsfjorden/Kistefoss 1880 – 2019 (svart kurve) og observert avløp ved 12.69 Randsfjord 1880-1915 (grønn kurve) og 12.228 Kistefoss 1916 – 2019 (rød kurve).

## 2.2 Regn og snøsmelting fra seNorge

I Norge vil en snørutine være en viktig komponent i en hydrologisk modell for å simulere vannføringen i et nedbørfelt gjennom året. Nedbør alene er ofte ikke godt nok for å simulere flommer der bidraget fra snøsmelting er betydelig. Kalibrering av en hydrologisk modell kan være tidkrevende og har ikke vært hovedfokus i dette prosjektet. For å redusere behovet for antall parametere i kalibreringen av modellene, ble det benyttet tidsserier av *Regn og snøsmelting*, heretter kalt *Vanntilførsel* eller *RoS*, fra seNorge (<http://www.senorge.no/>). Regn ble beregnet ved å kun bruke nedbør fra gridruer og tidspunkt der interpolert temperatur er høyere enn 0°C. Det finnes ulike versjoner av data fra seNorge. Her er det benyttet data fra snømodellen i seNorge versjon 2.0.1 og seriene inneholder sammenhengende verdier for hele tidsperioden fra september 1957 til i dag.

Noen av kartlagene og snømodellen i seNorge er nærmere beskrevet i Engeset, (2016). Detaljert beskrivelse av interpolasjon av nedbør i seNorge er dokumentert i Lussana mfl. (2018) mens snømodellen som inkluderer snøsmelting er beskrevet i Saloranta (2016).

For Målelvvassdraget ble det hentet ut tidsserier av *Vanntilførsel* med tre timers oppløsning (*RoS3t*). Tidsseriene representerer gjennomsnittet av alle gridcellene innen hvert modellerte delfelt for hvert tidsskritt.

For Tinnvassdraget ble det hentet ut tidsserier av *Vanntilførsel* med døgn-oppløsning (*RoS24t*). Tidsseriene representerer gjennomsnittet av alle gridcellene innen hvert modellerte delfelt for hvert tidsskritt.

For Randsfjorden er det benyttet griddete tidsserier av *Vanntilførsel* med døgn-oppløsning (*RoS24t*). Gridcellestørrelsene er på 1x1 km og tilsvarer gridet i seNorge.

For Tovdalsvassdraget ble det ikke benyttet seNorge data.



## 3 Metode

### 3.1 Statistisk modellering av ekstremmer i seNorge data

Vassdragsmodellene, som er beskrevet i kapittel 3.2, modellerer vannets transport i elvenettet (tidsforsinkelse) og effekter av reguleringsmagasiner. Som inngangsdata kan modellene bruke romlig fordelt nedbør eller vanntilførsel, enten som en kortvarig hendelse eller som en kontinuerlig tidsserie. Med disse modellene har vi mulighet til å undersøke hvilken effekt ulike forløp (fordelinger i tid) og ulik romlig fordeling av vanntilførselen i ekstremhendelser kan påvirke flomstørrelser i et vassdrag. I dette arbeidet er det benyttet historiske hendelser og tidsserier fra seNorge for å beregne dimensjonerende hendelser av vanntilførsel. Vi ville spesielt undersøke hvor følsomme flomstørrelsene i et vassdrag er for hvordan vanntilførselen fordeler seg i tid og mellom delfelt.

For å løse denne utfordringen, brukte vi tidsserier av døgnverdier for summen av regn og snøsmelting (RoS) hentet fra seNorge versjon 2.0 på 1x1 km. All nedbør som faller når temperaturen er over 0°C blir antatt å falle som regn.

SeNorge-verdiene på 1 km x1 km ble aggregert for å beregne gjennomsnittlig RoS over hele vassdraget. Deretter ble et glidende gjennomsnitt med varighet fra 1 t.o.m. 30 dager beregnet, og årlige maksimalverdier for hver varighet ble tatt ut. Den Generelle ekstremverdifordelingen (GEV) ble tilpasset årlige maksimalverdier for hver varighet ved å bruke l-moment metoden. GEV-fordelingen er gitt ved:

$$G(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[1 + k\left(\frac{x-m}{\alpha}\right)\right]^{-1/k}\right\} & k \neq 0 \\ \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x-m}{\alpha}\right)\right\} & k = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Der  $m$  er en lokasjonsparameter,  $\alpha$  en skalaparameter og  $k$  en formparameter. L-moment-metoden for å beregne parametrene er implementert i R-pakken `nsRFA`.

Når parameterne i GEV-fordelingen er estimert, kan T-års hendelser estimeres som:

$$x(T) = \begin{cases} m - \frac{\alpha}{k} \left[1 - \left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right)^{-k}\right] & k \neq 0 \\ m - \alpha \left[\ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right)\right] & k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Basert på T-års hendelsen gitt for hver varighet, ble et symmetrisk RoS-forløp beregnet slik at T-års nedbøren ble reprodusert for hver varighet.

For å analysere effekter av arealfordeling av RoS, ble de 30 største uavhengige hendelsene for hele vassdraget med en varighet på 7 dager valgt ut. For hver av disse hendelsene ble forholdstallet mellom arealmidlet RoS for det aktuelle delfeltet og hele

vassdraget beregnet. Dette forholdstallet ble brukt for å beregne et RoS-forløp for hvert delfelt.

For å analysere hvordan ulike RoS-forløp kan påvirke flomstørrelser (fordelinger i tid), ble de 30 største RoS-hendelsene skalert slik at 7-dagers RoS for hele vassdraget er lik den dimensjonerende verdien for 7-dagers RoS. Merk at med denne tilnærmingen vil volumet for andre varigheter enn 7 dager variere mellom hendelsene.

### 3.2 Vassdragsmodeller

Det ble valgt å bruke vassdragsmodellen HEC-HMS (Hydrologic Modeling System, US Army Corps of Engineering) for å teste ut ulike tilnærminger for å se på hvordan vassdragsreguleringer påvirker flomforholdene i et vassdrag. Det ble testet ulike modelloppsett, ulike input og initialtilstand for fire ulike vassdrag. Vassdragene som ble valgt ut er Måselvvassdraget, Randsfjorden i Drammensvassdraget, Tovdalsvassdraget og Tinnvassdraget i Skiensvassdraget, se Figur 13. I Tabell 1 vises noen utvalgte fakta for de fire vassdragene og deres vassdragsmodeller.

**Tabell 1 Fakta om de utvalgte vassdragene og tilhørende vassdragsmodeller.**

Vassdrag	Tot. areal (km <sup>2</sup> )	Antall reg. mag.	Antall (store) innsjøer	Ant. delfelt i modellen	Inndata
Måselvvassdraget	5597	3 (3 <sup>1</sup> )	6 (0 <sup>2</sup> )	11 (509 <sup>3</sup> )	RoS3h, tilsig/obs.vf.
Randsfjorden	3703	7 (7 <sup>1</sup> )	2 (0 <sup>2</sup> )	35 (106 <sup>3</sup> )	RoS24h, tilsig/obs.vf.
Tinnvassdraget	3773	4(4 <sup>1</sup> )	4(0 <sup>2</sup> )	4 (943 <sup>3</sup> )	RoS24h, tilsig/obs.vf.
Tovdalsvassdraget	1867	6	2 (2 <sup>2</sup> )	87 (21 <sup>3</sup> )	Nedb.st, tilsig/obs.vf.

1) Antall magasin som er modellert i vassdragsmodellen

2) Antall uregulerte innsjøer som er modellert i vassdragsmodellen

3) Gjennomsnittsareal i km<sup>2</sup> for de modellerte delfelten



Figur 13 Kartet viser beliggenhet til de utlagte vassdragene.

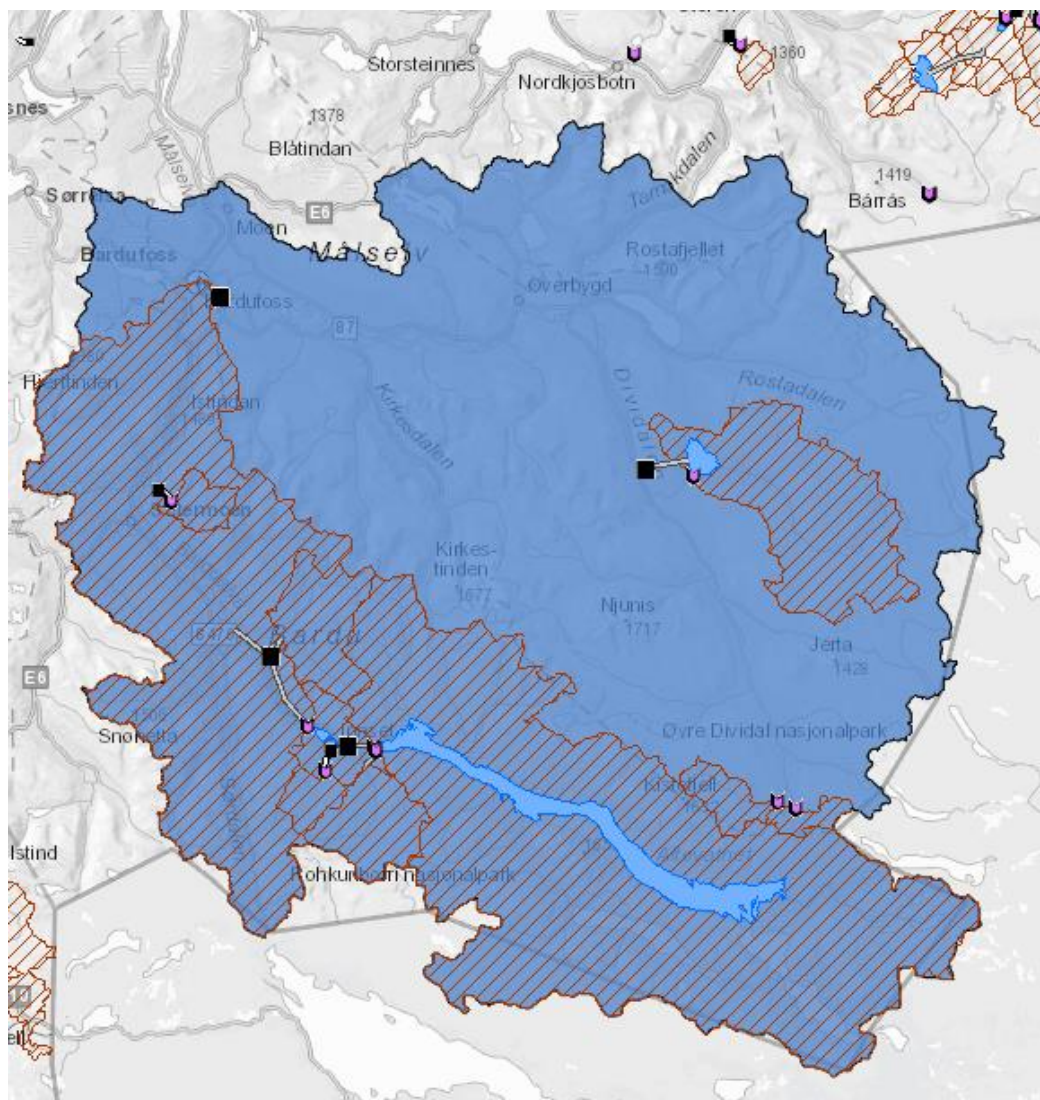
### 3.2.1 Måselvassdraget

Måselvassdraget drenerer et stort område i indre Troms, fra svenskegrensen i øst til utløp i Måselvfjorden innerst i Malangen, se Figur 14. Totalfeltet er på drøye 5 900 km<sup>2</sup>. Vassdraget består av to hovedgreiner: Måselvassdraget som drenerer vel 3 000 km<sup>2</sup> og Barduvassdraget som drenerer litt over 2 400 km<sup>2</sup>.

Måselvassdraget drenerer den nordlige delen av vassdraget og er den minst regulerte delen. To små felt øverst i Dividalen overføres fra Måselvassdraget til Barduvassdraget (Altevatn). Det er et kraftverk i Dividalen, Devdisvatn kraftverk, som har et magasin Devdisvatn (Dødesvatn).

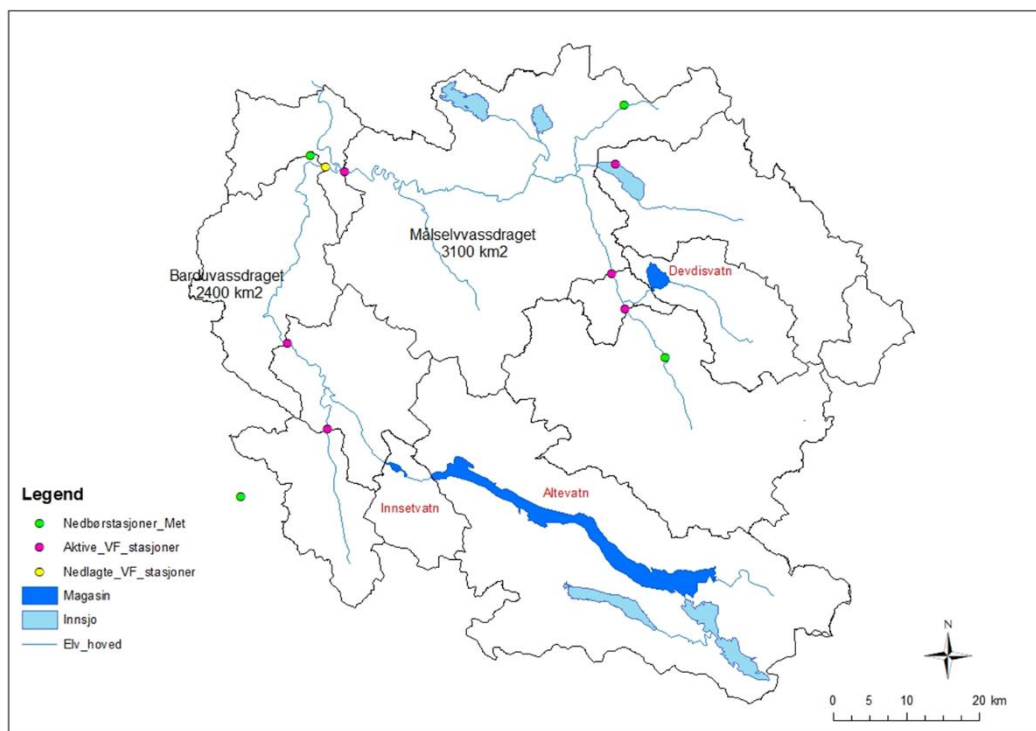
Bardugrenen har et stort magasin øverst i vassdraget, Altevatn, som også er inntaksmagasin til Innset kraftverk. Derifra renner vannet videre til et lite magasin, Innsetvatn, som er inntaksmagasin til Straumsmo kraftverk. Nederst i Barduvassdraget ligger Bardukraftverk, men det fungerer tilnærmet som et elvekraftverk med ubetydelig magasinering i inntaksmagasinet. Det er i seinere tid også blitt bygget noen mindre kraftverk i vassdraget.

De to grenene har samløp litt nedstrøms Bardufoss kraftverk og Målselvfossen i Målselva.



**Figur 14** Oversikt over nedbørfeltet til Målselvvassdraget. Utløpet i modellen er satt til der Målselva renner under E6 bru ved Moen i Olsborg.

Det er satt opp en enkel vassdragsmodell for Målselvvassdraget. Nederste beregningspunkt i modellen er satt til der elven passerer under E6 bru i Olsborg, med et totalfelt på ca. 5 600 km<sup>2</sup>, se Figur 14. Modellen er satt opp i programmet HEC-HMS med 11 delnedbørfelt, se Figur 15.



Figur 15. Oversikt over delnedbørfeltet slik de er satt opp i HEC-HMS modellen for Måselvassdraget.

Det er totalt modellert tre magasin med tilhørende kraftverk i modellen. Tabell 2 og Tabell 3 oppsummerer utvalgt nøkkelinformasjon for de tre magasinene med tilhørende delfelt. I feltet ligger det også seks uregulerte innsjøer av betydelig størrelse i tillegg til flere mindre innsjøer. Ingen av innsjøene er modellert i modellen.

Tabell 2. Nøkkelinformasjon for de tre magasinene i vassdragsmodellen for Måselvassdraget.

Magasin	Sum tilsig (M. m <sup>3</sup> )	Mag. areal v. HRV (km <sup>2</sup> )	Mag. vol. (M. m <sup>3</sup> )	HRV (moh)	LRV (moh)	Reg. høyde (m)	Reg. grad vol. (%)
Altevatt	1063,0	79,7	1027,0	489,0	472,8	16,2	93
Innsetvatn lok.	47,6	1,4	3,9 (3,7*)	301,0	298,0	3,0	2
Innsetvatn tot.			1030,9 (1027+3,9)				79
Devdisvatn	160,4	6,9	135,7	413,5	380,5	33,0	85

\*I NVE Temakart står det 3.7 mill. m<sup>3</sup>, men i siste godkjente flomberegning for damsikkerhet (Bramselv, 2017) står det 3.884 mill. m<sup>3</sup>, som er valgt benyttet i modellen.

**Tabell 3. Nøkkelinformasjon for nedbørfeltene til magasinene i vassdragsmodellen for Målselvvassdraget.**

Magasin	Feltareal (km <sup>2</sup> )	Innsjø (%)	Snaufjell (%)	Hmax (moh)	Hmin (moh)
Altevatn	1295,3 (1247,8 <sup>1</sup> )	12	61	1656	483
Innsetvatn lok.	141,8			1569	300
Innsetvatn tot.	1438,6 (1390,8 <sup>1</sup> )	11	63	1656	300
Devdisvatn	252,8	5	83	1501	414

<sup>1</sup> Naturlig nedbørfelt til Altevatn. I modellen er en overføring på 47,8 km<sup>2</sup> fra øverst i Dividalen (Målselvgrenden) inn til Altevatn også tatt med i arealet til Bardugrenen.

### Barduvassdraget

I Barduvassdraget er det modellert to magasin, Altevatn og Innsetvatn, og to kraftverk: Innsetvatn og Straumsmo.

Altevatn er et stort og langt magasin med et feltareal på nesten 1300 km<sup>2</sup>. Det er flere store uregulerte innsjøer i feltet som ellers i stor grad består av snaufjell. Vannet ut av Altevatn går i all hovedsak gjennom Innset kraftverk. I vassdragsmodellen kan vannet gå ut av magasinet gjennom Innset kraftverk eller som overløp. I vassdragsmodellen kan tilsiget til Altevatn simuleres ved tre forskjellige typer inndata: tilsigsserier/vannføringsserier, nedbørd data fra målestasjoner eller regn og snøsmelting fra seNorge.

Innsetvatn er et lite inntaksmagasin med et lokalfelt på ca. 140 km<sup>2</sup>. Vannet ut av Innsetvatn går i all hovedsak gjennom Straumsmo kraftverk. I vassdragsmodellen kan vannet gå ut av magasinet gjennom Straumsmo kraftverk eller som overløp. I praksis ble det modellert kun med overløp siden det lille volumet i magasinet gjorde at modellen lett gikk tom for vann. Det modellerte overløpet ble kontrollert mot observert driftsvannføring og det gav et tilfredsstillende resultat. I vassdragsmodellen kan lokaltilsiget til Innsetvatn simuleres ved tre forskjellige typer inndata: tilsigsserier/vannføringsserier, nedbørd data fra målestasjoner eller regn og snøsmelting fra seNorge.

### Målselvvassdraget

I Målselvvassdraget er det modellert et magasin, Devdisvatn (Dødesvatn), og et kraftverk: Devdisvatn kraftverk. Devdisvatn er et relativt stort magasin med et feltareal på ca. 250 km<sup>2</sup>. Nedbørfeltet domineres av snaufjell. Vannet ut av Devdisvatn går i all hovedsak gjennom Devdisvatn kraftverk. I vassdragsmodellen kan vannet gå ut av magasinet gjennom Devdisvatn kraftverk eller som overløp. I vassdragsmodellen kan tilsiget til Devdisvatn simuleres ved tre forskjellige typer inndata: tilsigsserier/vannføringsserier, nedbørd data fra målestasjoner eller regn og snøsmelting fra seNorge.

### 3.2.1.1 Måleserier

I Måselvassdraget finnes det i dag seks aktive vannføringsstasjoner, de er listet opp i Tabell 4. Data fra disse vannføringsstasjonene er brukt i modellen til kalibrering og test av hydraulikken i modellen.

**Tabell 4. Aktuelle vannføringsstasjoner i Måselvassdraget.**

Stasjon	Periode	Areal (km <sup>2</sup> )	Merknad
196.12 Lundberg	1959-dd	247	
196.36 Fosshaug	1961-dd	1962 (325**)	
196.26 Høgskarhus	1983-dd	863 (815*)	Mangler data i perioder, særlig i 2014.
196.21 Skogly	1974-dd	1187 (1139*)	
196.11 Lille rostavatn	1959-dd	638	Usikker feltgrense grunnet innsjø øverst i nedbørfeltet som drenerer både til Norge og Sverige.
196.35 Måselvfossen	1907-dd	3111 (3063*)	

\* Det overføres to små felt fra lengst inn i Dividalen til Altevatn, Irgasjavre og Muoldajokka, på til sammen 47 km<sup>2</sup>. Dette arealet er i modellen lagt til feltene i Bardugrenen og trukket fra feltene til Måselvgrenene.

\*\* Lokalfelt til Fosshaug i modellen

**Tabell 5. Aktuelle observerte magasin vannstander og driftsvannføringer i Måselvassdraget.**

Stasjon	Periode	Areal (km <sup>2</sup> )	Merknad
196.24 Altevatn	1960-dd	1248 (1369*)	Døgn (mag. vst)
196.20 Innsetvatn	1966-dd	1390 (69**)	Døgn (mag. vst)
196.22 Devdisvatn /Dødesvatn	1974-dd	253	Uke (mag. vst)
196.15 Innset kraftverk	1971-dd	-	Driftsvannføring, timesverdier
196.25 Straumsmo kraftverk	1971-dd	-	Driftsvannføring, timesverdier
196.23 Dividal kraftverk	1972-dd	-	Driftsvannføring, timesverdier

\* Det overføres to små felt fra lengst inn i Dividalen til Altevatn, Irgasjavre og Muoldajokka, på til sammen 47 km<sup>2</sup>. Det overføres i tillegg et felt fra nedbørfeltet til Innsetvatn til Altevatn, Slavasskarelv, på 73 km<sup>2</sup>. Disse tre feltene er i modellen lagt til nedbørfeltet til altevatn i modellen.

\*\* Totale lokalfeltet til Innsetvatn i modellen er: totalfeltet til Innsetvatn minus totalfeltet til Altevatn og overføringen fra Slavasskarelva.

I tillegg er det brukt observerte magasinvannstander og driftsvannføringer som er listet opp i Tabell 5. For Altevatn er det konstruert en tilsigsserie ut fra observert magasinvannstand, driftsvannføring og overløp (tilsigsserien er beregnet i Excel, usentrerte differanser («backward»), og ikke lagret i NVEs HydraII database).

Det ligger tre nedbørstasjoner i vassdraget og en i nabovassdraget, se Tabell 6. Av disse stasjonene er det kun Dividalen II som har timesverdier for 2012, som er den siste store flomhendelsen i vassdraget. Det ble derfor forsøkt å bruke data fra Dividalen II i modellen, men siden de fleste store flomhendelsene i vassdraget også har store bidrag fra snøsmelting gav dette ikke nok vann i modellen. Det ble derfor bestemt å bruke regn- og snøsmeltesdata fra seNorge som inndata til nedbør-avløpsmodellen. Regn- og snøsmeltesdata fra seNorge er nærmere beskrevet i kapittel 2.2.

**Tabell 6. Aktuelle nedbørstasjoner i Målselvvassdraget**

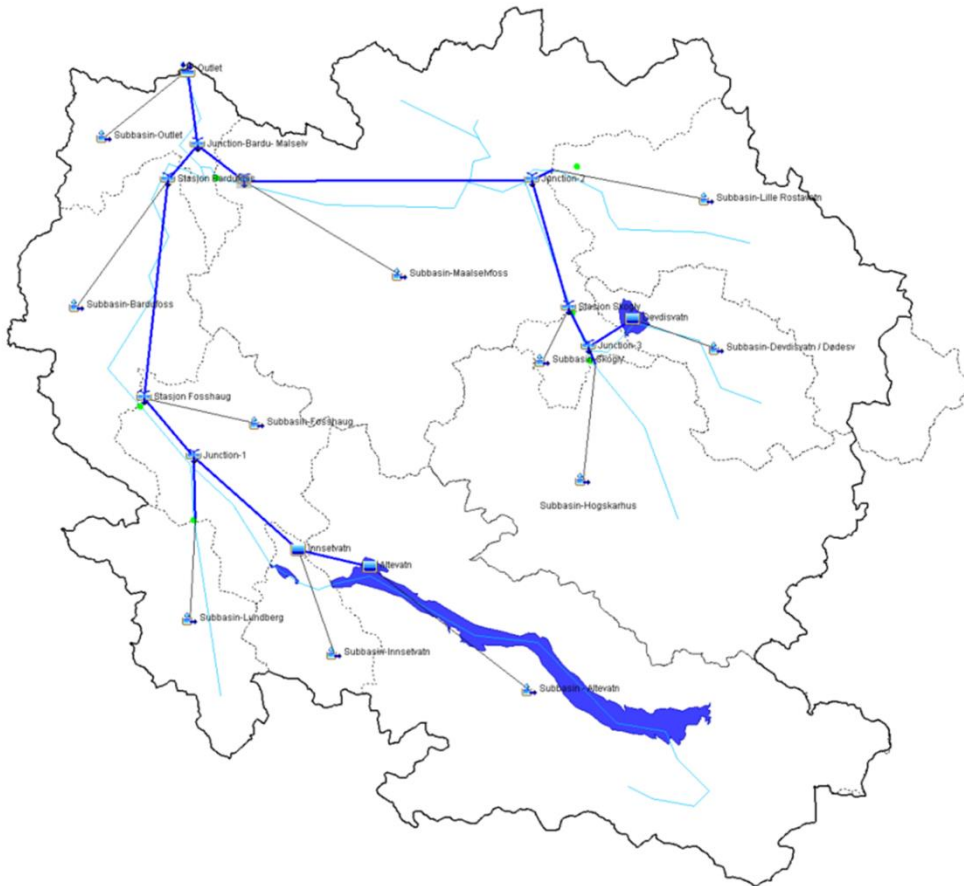
Stasjon (vassdrag)	Moh	Døgnverdier fra	Timesverdier fra
89940 Dividalen II (Målselv)	204	2009	2009
89980 Tamokdalen (Målselva)	230	2003	2014
89350 Bardufoss (Barduelv)	76	1940	2016
88100 Bones i Bardu (Salangselva)	230	1907	2018

### 3.2.1.2 Modelloppsett og kalibrering

Vassdragsmodellen ble satt opp i HEC-HMS og er vist i Figur 16. For de feltene som har vannføringsobservasjoner ble observasjonene brukt direkte inn i modellen. For magasin Altevatn ble det utarbeidet en tilsigsserie ut fra kraftverksdata (magasin vannstand, driftsvannføring og overløpsdata) med døgnoppløsning. For de andre delfeltene ble det laget arealskalerte tidsserier ut fra nærmeste og mest representative observerte vannføringsserie. Tilsigsserien til Altevatn og de observerte og skalerte vannføringsseriene ble brukt i kombinasjon med vannstandsseriene til magasinene for å sjekke at hydraulikken i vassdragsmodellen stemte.

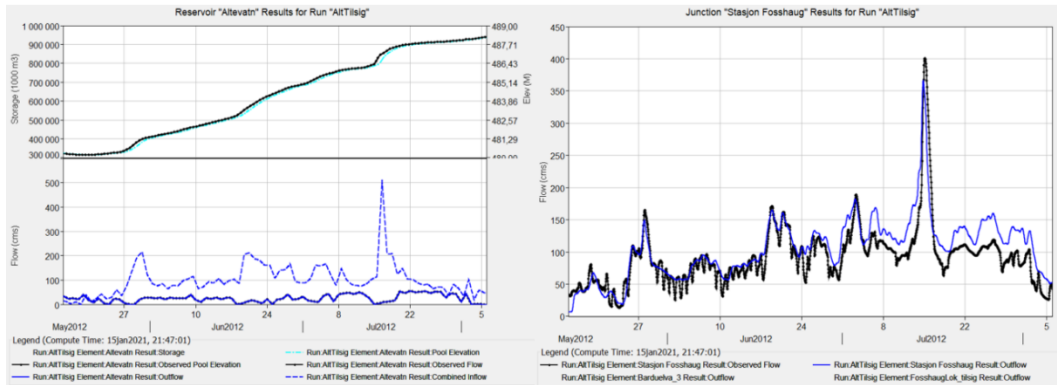
Det ble i denne analysen modellert for perioden 2012 – 2019, men det er valgt å se spesielt på flommen i juli i 2012. Flommen i juli 2012 var den største flommen i nyere tid og førte til store skader i vassdraget, spesielt i Målselvdalen og Kirkesdalen (NVE rapport 24-2013).





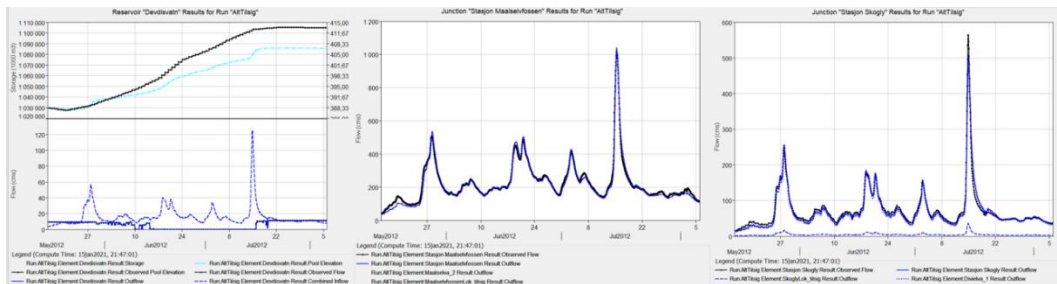
**Figur 16. Oppsettet av forenklet vassdragsmodell for Måselvvassdraget i HEC-HMS. Vassdraget er delt inn i 11 delnedbørfelt. Magasinene som er modellert er vist med mørkeblått. De seks aktive vannføringsstasjonene er vist med grønne punkter.**

Ved simulering av flommen i juli i 2012 ble modellen kjørt fra 15 mai – 5 august. Driftsvannføringen gjennom Innset og Devdisvatn kraftverk ble satt lik observert driftsvannføring, men fra Innset magasin ble alt vann ut fra magasinet modellert som overløp. Figur 17 viser simuleringen av Altevatn og simulert og observert vannføring ved målestasjonen Fosshaug (196.36) som eksempel på testing av tilsigsserien og hydraulikken i modellen. Figuren til venstre viser at det er svært god overensstemmelse mellom observert (sort linje) og simulert vannstand (turkis linje). Figuren til høyre viser at også vannføringen ved Fosshaug modelleres med god overensstemmelse med observert vannføring selv om det er noe avvik. Særlig i slutten av perioden der den simulerte vannføring overestimerer i forhold til observert vannføring.



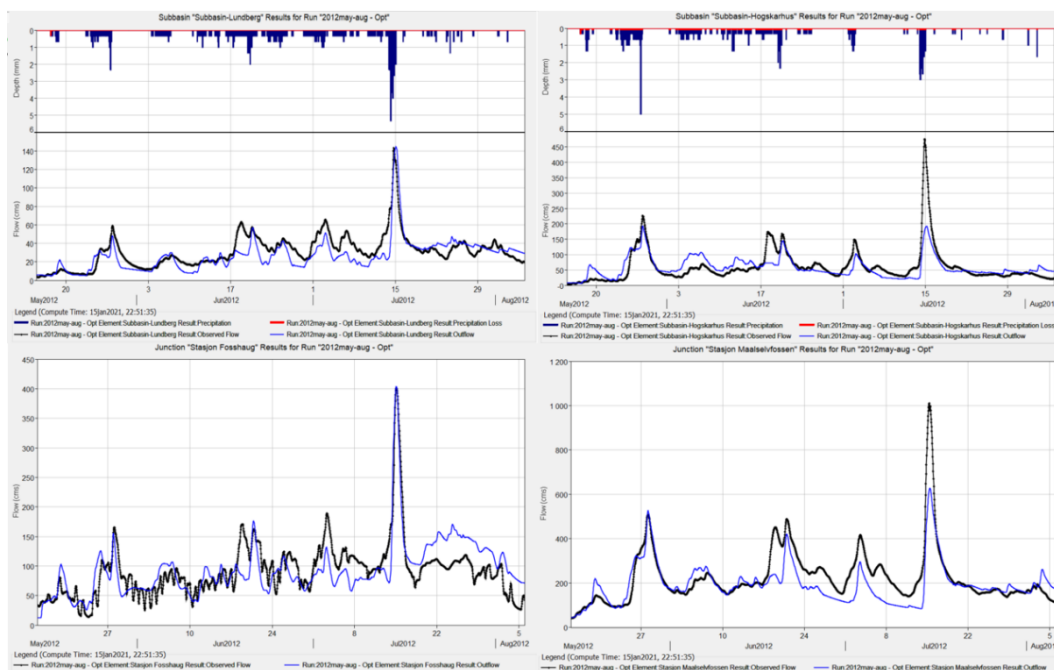
**Figur 17. Kontroll av hydraulikk for Altevatt, sommeren 2012. I figuren til venstre er observert vannstand representert ved sort linje og simulert vannstand ved turkis linje øverst i figuren. Nedre del av figuren viser tilløp med stiplet blå linje, heltrukken blå linje representerer simulert avløp og sort linje (bak blå linje) viser observert driftsvannføring. I figuren til høyre er observert vannføring representert ved sort linje og simulert vannføring ved blå linje.**

Figur 18 viser simuleringen av Devdisvatn og simulert og observert vannføring ved målestasjonen Skogly (196.21) og målestasjon Målselvfossen (196.35). Figuren viser at den modellerte vannstanden i Devdisvatn underestimeres, men observert og simulert vannføringen ved målestasjonene har likevel et veldig godt samsvar.



**Figur 18. Kontroll av hydraulikk for Devdisvatn, sommeren 2012. I figuren til venstre er observert vannstand representert ved sort linje og simulert vannstand ved turkis linje øverst i figuren. Nedre del av figuren viser tilløp med stiplet blå linje, heltrukken blå linje representerer simulert avløp og sort linje viser observert driftsvannføring. I figuren i midten og til høyre er observert vannføring representert ved sort linje og simulert vannføring ved blå linje.**

Etter å ha bekreftet at dynamikken i vassdraget var godt beskrevet i modellen var det ønskelig å sette opp nedbør-avløps modeller for alle delfeltene i modellen. Etersom måleseriene og tilsigsserien i kombinasjon med hydraulikken i modellen beskrev vassdraget godt, var det rimelig å anta at nedbør-avløpsmodeller kalibrert mot de samme tidsseriene også burde gi gode resultater. Det ble valgt å benytte regn- og snøsmeltedata fra seNorge som inndata til modellen. Det ble utført kalibrering av nedbør-avløpsmodellene med tre forskjellige simuleringstidspunkt i 2012. En ren hendelsesbasert kalibrering, kalt Flomperiode (11 juli – 20 juli), og to lengre kalibreringsperioder (15. mai. – 5. aug. og 1. jan. – 31. des.). Figur 19 viser simulert (blå linje) og observert (sort linje) vannføring for fire utvalgte delfelt for kalibrering 15. mai – 5. august i 2012. Generelt sliter modellen med å simulere høye nok flomtopper, som vist i figurene til høyre. Figurene til venstre viser godt samsvar mellom simulert og observert vannføring ved selve flomtoppen.



**Figur 19. Kalibrering av nedbør-avløpsmodell for Målselvdalen for simuleringsvarigheten mai – august, 2012. Simulert vannføring (blå linje) og observert vannføring (sort linje). Helt øverst vises også nedbøren inn i feltene (blått) og nedbøren som går tapt i det modellerte delfeltet (rødt). Grafene til venstre viser eksempler fra Bardugrenen og grafene til høyre viser eksempler fra delfelt i Målselvgrenen.**

Tabell 7 oppsummerer kalibreringsresultatene ved de seks stedene i modellen som har vannføringsobservasjoner inklusive tilsiget til Altevatt. For Altevatt er det den beregnede tilsigsserien som her benyttes som observert lokaltilsig. Tabellen viser at modellen fikk akseptable resultater i form av Nash-Sutcliffe (NS > 0,7) for simuleringsvarighetene «Hele år» og «Flomperiode», med noen unntak. Ved målestasjon Lille Rostavatn ble NS under 0,7 for alle simuleringsvarigheter. Stasjonen står i et stort vatn som kan tenkes burde ha blitt modellert separat, og øverst i feltet ligger det et vatn som har avløp både til Sverige og inn i Norge – dette kan være noe av forklaringen til den dårlige modelltilpasningen. De simulerte flomtoppene var generelt lavere enn observerte flomtopper.

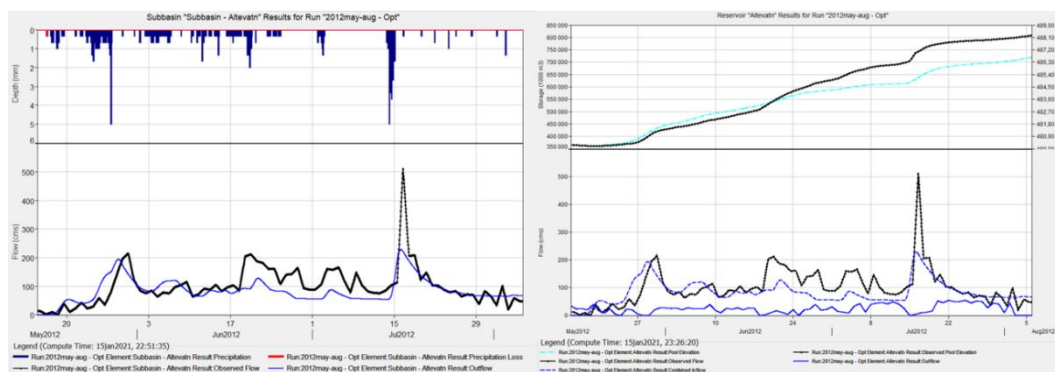
Tabell 7. Oppsummering av kalibreringsresultater (Nash-Sutcliffe og Qsim maks/Qobs maks) ved de seks stedene i modellen med vannføringsstasjoner i tillegg til Altevatn som har en tilsigsserie. Kalibrert med tre forskjellige simuleringsvarigheter.

2012	Flomperiode		15 mai – 5 aug.		Hele år	
	NS	Qsim/Qobs (%)	NS	Qsim/Qobs (%)	NS	Qsim/Qobs (%)
Maalselvfossen	0,96	91	0,61	62	0,86	78
Lille Rostavatn	0,54	72	0,27	62	0,64	60
Skogly	0,82	60	0,55	40	0,73	56
Høgskarhus	0,88	67	0,58	41	0,75	48
Fosshaug	0,79	96	0,59	93	0,76	88
Altevatn	0,72	36	0,46	47	0,79	64
Lundberg	0,55	110	0,61	101	0,79	90

Under flomhendelser i vassdrag med store innsjøer/magasiner, som Altevatnet, er det tilførte volumet over tid gjerne vel så viktig som selve flomtøppen. Følgelig var det også interessant å se den simulerte vannstanden i magasinene sammenlignet med den observerte vannstanden.

Figur 20 viser simulering av både tilløpet til Altevatn og ruting gjennom magasinet i kalibreringsperioden 15 mai – 5 august 2012. Fra figuren kan vi se at selv om vannføringen simuleres ganske godt første halvdel av simuleringsperioden så er det simulerte volumet noe lavere enn det observerte i andre halvdel og selve flomtøppen er vesentlig underestimert.

Dette medfører at den simulerte vannstanden i Altevatn følger den observerte relativt godt i begynnelsen, men begynner etter hvert å avvike mer og mer når volumet inn ikke er stort nok.



Figur 20. Simulert og observert tilløp til Altevatnet i kalibreringsperioden 15 mai - 5 august 2012. Simulert vannføring (blå linje) og observert vannføring (sort linje).

Ut fra Tabell 8 ser vi at den totale mengden vann ( $P_{inn}Vol/ObsVol$ ) som går inn i modellen er mye lavere enn den totale observerte mengden vann. Mengden vann som går inn i modellen varierer omkring 50-70 % av det observerte volumet. Det simulerte totale volumet er også lavt i forhold til det observerte volumet. Det varierer stort sett mellom 80-90 % av observert volum med noen unntak.

Vi ser også at modellen generelt ikke klarer å simulere flomtoppene høyt nok, selv om det er store variasjoner. Flomtoppen for stasjonen Lundberg blir til og med noe overestimert ved kalibreringsperiode Flomhendelse. Gjennomsnittet for de tre ulike kalibreringene viser at de simulerte flomtoppene ligger på omkring 70 % av observerte kulminasjonsverdier (se Tabell 7).

**Tabell 8 Oppsummering av kalibreringsresultater ( $Vol_{sim}/Vol_{obs}$  og  $P_{inn}Vol/Vol_{obs}$ ) ved de syv stedene i modellen med vannføringsstasjoner, inkludert Altevatn, kalibrert med tre forskjellige simuleringsvarigheter.**

2012	Flomperiode		15 mai – 5 aug.		Hele år	
	SimVol/ObsVol (%)	$P_{inn}Vol/ObsVol$ (%)	SimVol/ObsVol (%)	$P_{inn}Vol/ObsVol$ (%)	SimVol/ObsVol (%)	$P_{inn}Vol/ObsVol$ (%)
Maalselvfossen	93		87		93	
Lille Rostavatn	91	46	85	54	79	41
Skogly	100		98		114	
Høgskarhus	96	46	97	67	104	57
Fosshaug	88		83		99	
Altevatn	47	68	88	69	94	57
Lundberg	88	59	87	47	70	38
Gjennomsnitt	86	55	89	59	93	49

### 3.2.1.3 Verifisering

Modelloppsettene fra de tre forskjellige kalibreringsperiodene ble så testet på flommene i 2014 og 2017 for verifisering. Tabell 9 og Tabell 10 oppsummerer noen resultater fra verifiseringen av de tre ulike parametersettene fra de tre ulike kalibreringsperiodene fra 2012. Initialtilstand i magasinene ble satt til observert vannstand fra 15. mai i inneværende år, hhv 2014 og 2017. En generell trend for alle simuleringene er at flommene i stort sett underestimeres med unntak for modellen Flomperiode der flomtoppene både over og underestimeres til større grad. Vi ser også at flomhendelsen i 2017 simuleres bedre enn flomhendelsen i 2014.

Modellen «Flomperiode» er den av modellene som gir minst robuste resultater. Den gir også urealistiske resultater for noen hendelser som har annerledes initialtilstander enn kalibreringsperioden. Dette illustreres godt i Figur 21 der basis-vannføringen (baseflow) i

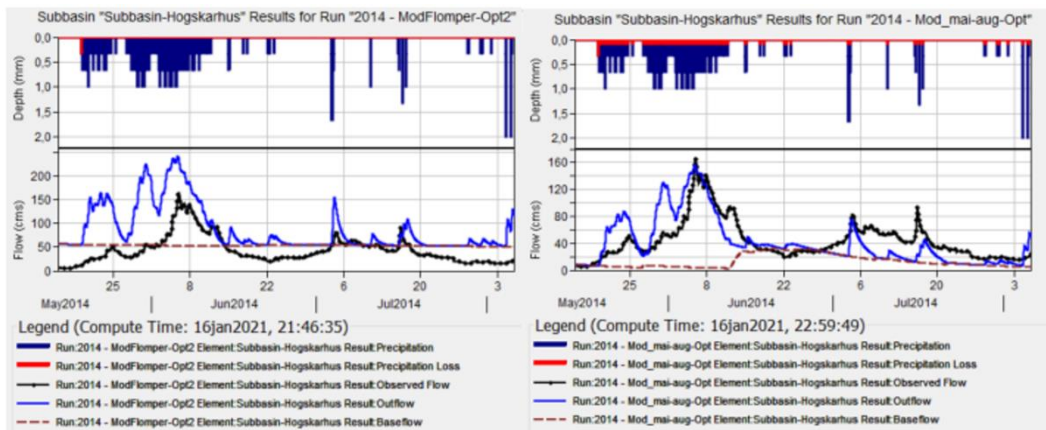
modellen er for høy. Dette gir en for høy vannføring i begynnelsen av flomhendelsen og modellen klarer ikke å gjenskape resesjonen på de lavere vannføringene på en naturlig måte.

**Tabell 9 Verifisering av nedbør-avløpsmodeller med forskjellige modelloppsett/kalibreringsparametere for 2014-flommen.**

2014	Flomperiode		15 mai – 5 aug		Hele år	
	NS	Qsim/Qobs (%)	NS	Qsim/Qobs (%)	NS	Qsim/Qobs (%)
Maalselvfossen	0,13	100	0,27	81	0,20	89
Lille Rostavatn	-0,11	74	0,42	78	0,46	70
Skogly	0,06	94	0,33	63	0,34	74
Høgskarhus	-3,03	146	0,27	95	-0,25	113
Fosshaug	0,05	89	0,13	88	0,16	93
Altevatn	0,56	88	0,56	88	0,29	100
Lundberg	0,16	96	0,33	94	0,23	94

**Tabell 10 Verifisering av nedbør-avløpsmodeller med forskjellige modelloppsett for 2017-flommen.**

2017	Flomperiode		15 mai – 5 aug		Hele år	
	NS	Qsim/Qobs (%)	NS	Qsim/Qobs (%)	NS	Qsim/Qobs (%)
Maalselvfossen	0,71	115	0,78	93	0,71	102
Lille Rostavatn	0,09	67	0,70	74	0,43	64
Skogly	0,59	117	0,71	82	0,77	94
Høgskarhus	0,69	110	0,52	74	0,65	87
Fosshaug	0,70	92	0,71	90	0,75	95
Altevatn	0,41	86	0,41	86	0,50	103
Lundberg	0,56	94	0,58	89	0,42	88



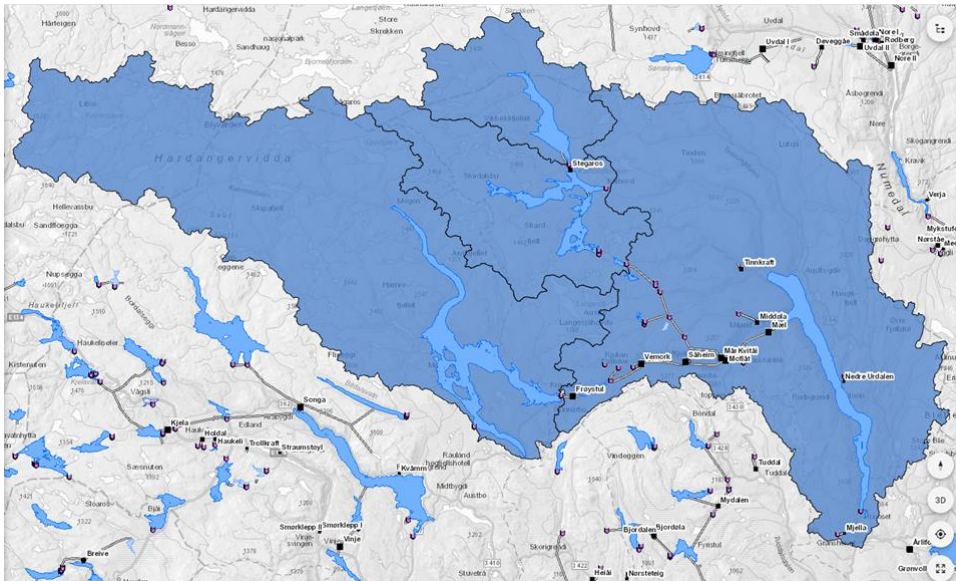
Figur 21 Modellresultater fra 2014 for delfeltet til stasjon Høgskarhus. Til venstre modell «Flomperiode», til høyre modell «Mai-aug».

De to modellen som er kalibrert for lengre perioder, «Hele år» og «15 mai – 5 aug», gir forholdsvis like resultater. Modellen «Flomperiode» gir noe høyere score med Nash-Sutcliffe, men noe lavere score ved sammenligning av flomtopp og volum. Ettersom hovedformålet med denne studien var å se på effekten av forskjellig arealfordeling av vanntilførsel og initialtilstander under ekstreme hendelser ble modellen vurdert som god nok for å undersøke disse aspektene. Ut fra en samlet vurdering av resultater fra kalibrering, verifisering og hvor godt modellene generelt presterte m.h.t. flomtopper og volum ble modelloppsettet kalibrert for perioden 15 mai – 5 august brukt i det videre simuleringsarbeidet.

### 3.2.2 Tinnvassdraget

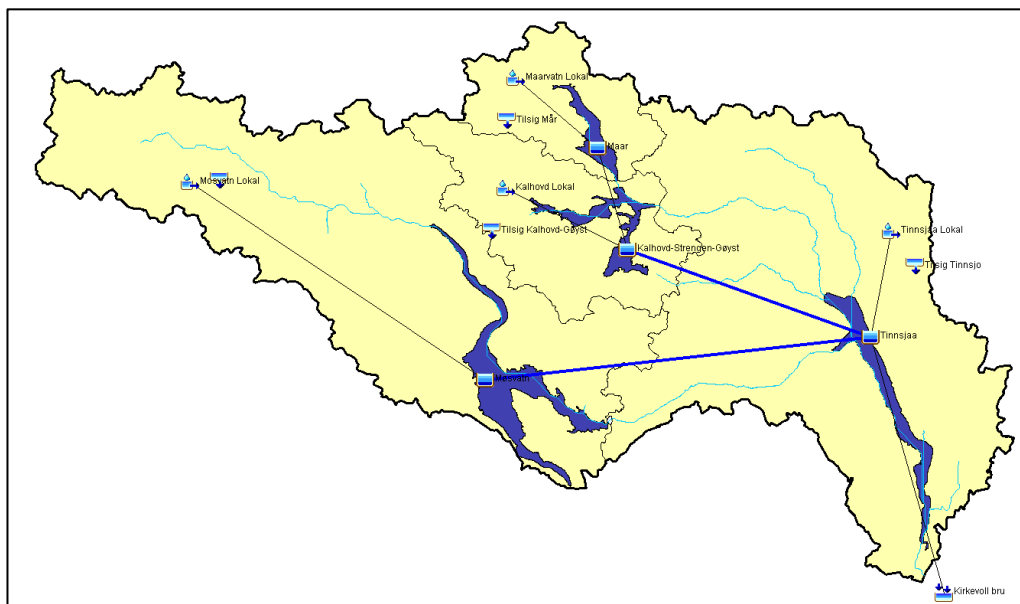
Tinnsjø i Telemark drenerer de nordlige delene av Vestfold og Telemark fylke og er vist i Figur 22. I vest dreneres deler av Hardangervidda ned i Møsvatn som er reguleringsmagasin med inntak til Frøystul kraftverk. Fra Møsvatn fortsetter elven Måna østover mot Tinnsjø hvor det er en rekke kraftverk som utnytter vannet på veien. Den nordlige delen av nedbørfeltet omfatter reguleringsmagasinene Mårvatn, Kalhovdfjorden og Gøyst-Strengen. Avløpet fra Mår/Kalhovd-Gøystvatn går gjennom Strengen og videre til Grottevatn som er inntaksmagasinet til Mår Kraftverk før det til slutt ender opp i Tinnsjø. Den østlige delen av nedbørfeltet til Tinnelva består av Tessungdalen og områdene rundt Tinnsjø. Nedbørfeltet til Tinnsjø er på totalt 3772 km<sup>2</sup>.

Det er satt opp en enkel vassdragsmodell for Tinnvassdraget. Nederste beregningspunkt i modellen er rett nedstrøms utløpet av Tinnsjø ved NVEs målestasjon Kirkevoll bru. Hovedformålet med vassdragsmodellen var å se på effekten av varierende initialtilstander i de store magasinene og hvilken effekt arealfordelingen av vanntilførsel under ekstremhendelser har på tilløpsflommene til magasinene, samt påfølgende vannstander og avløpsflommer. Vassdraget ble delt inn i 4 delnedbørfelt som alle ender opp i de store magasinene.



**Figur 22. Oversikt over nedbørfeltet til Tinnsjø**

Modellen er satt opp i programmet HEC-HMS og er vist i Figur 23. Tabell 11 oppsummerer utvalgt nøkkelinformasjon for de fire delfeltene og tilhørende magasiner. Tinnvassdraget har store reguleringsmagasiner og fra Tabell 11 kan en lese at høyfjellsmagasinen Mårvatn og Kalhovd-Gøyst har en reguleringsgrad på over 1, altså at reguleringsvolumet er større enn midlere årstilsiget til disse magasinene. For Møsvatn og Tinnsjø ligger reguleringsgraden på under 1, og Tinnsjø som er nederste magasin i Tinnvassdraget har en reguleringsgrad på 0,53 (53 %). Tinnsjø har imidlertid et stort uregulert lokalfelt (ca. 40 % av totalarealet) og om en kun ser på reguleringsvolumet i Tinnsjø så tilsvarer dette kun ca. 6 % av midlere årstilsig til magasinet.



**Figur 23. Oppsettet av forenklet vassdragsmodell for Tinnvassdraget i HEC-HMS. Vassdraget er delt inn i 4 delnedbørfelt hvor de store magasinene ligger nederst i hvert delfelt.**



Tabell 11. Nøkkelinformasjon for lokalnedbørfelt og magasiner i vassdragsmodellen

Magasin	Areal lok. (km <sup>2</sup> )	Innsjø (%)	Snaufjell (%)	H <sub>max</sub> (moh)	H <sub>min</sub> (moh)	LRV (moh)	HRV (moh)	Reg. grad vol.
Mårvatn	273	15	75	1471	1120	1100	1121,28	1,59
Kalhovd-Gøyst-Strengen	388	16	76	1563	1086	1075	1086,6	1,24
Møsvatn	1508	13	69	1628	916	900	918,5	0,62
Tinnsjø	1676	8	16	1865	191	187,62	191,62	0,53

### Mårvatn

Mårvatn er et høyfjellsmagasin med et feltareal på 273 km<sup>2</sup>. Nedbørfeltet er slakt og domineres av snaufjell. Vannet ut av Mårvatn går i all hovedsak gjennom Stegaros kraftverk, men det tappes også vann gjennom tappetunnel og ned til Kalhovd-Gøyst. I vassdragsmodellen kan vannet gå ut av magasinet gjennom Stegaros kraftverk, tappetunnel, overløp og alle kombinasjoner av disse. Kapasitetskurvene brukt (vannstand og flomavledningskapasitet) er som gitt i henhold til flomberegninger for damsikkerhet i vassdraget. I vassdragsmodellen kan Mårvatn simuleres ved tre forskjellige typer inndata: tilsigsserier, nedbørd data fra målestasjoner eller regn og snøsmelting fra seNorge.

### Kalhovd-Gøyst-Strengen

Fra Mårvatn går vannet ned til Kalhovd-Gøyst-Strengen som i modellen er forenklet representert som ett magasin med én felles kapasitetskurve. Lokalfeltet for Kalhovd-Gøyst-Strengen er på 388 km<sup>2</sup> og domineres av snaufjell. Vannet ut av Kalhovd-Gøyst-Strengen går i all hovedsak gjennom Strengen og ned til Grottevatn som er inntaksmagasinet til Mår kraftverk. I vassdragsmodellen benyttes tidsserien for Strengen i kombinasjon med eventuelle overløp ved dam Kalhovd som mål på hva som går ut av magasinet. Kapasitetskurvene brukt (vannstand og flomavledningskapasitet) er som gitt i henhold til flomberegninger for damsikkerhet i vassdraget. I vassdragsmodellen kan Kalhovd-Gøyst-Strengen simuleres ved tre forskjellige typer inndata: tilsigsserier, nedbørd data fra målestasjoner eller regn og snøsmelting fra seNorge.

### Møsvatn

Møsvatn er et høyfjellsmagasin med et feltareal på 1506 km<sup>2</sup>. Vannet ut av Møsvatn går i all hovedsak gjennom Frøystul kraftverk. I vassdragsmodellen benyttes tidsserien for 16.20 Møsvatn ndf. (fra 2007 erstattet med 16.19 Møsvatn, Langhøl) som mål på hva som går ut av magasinet. Modellen kan også kjøres med kombinasjonen av Frøystul kraftverk og kapasitetskurve med eller uten åpen tappetunnel. Kapasitetskurvene brukt (vannstand og flomavledningskapasitet) er som gitt i henhold til flomberegninger for damsikkerhet i vassdraget. I vassdragsmodellen kan Møsvatn simuleres ved tre forskjellige typer inndata: tilsigsserier, nedbørd data fra målestasjoner eller regn og snøsmelting fra seNorge.

## Tinnsjø

Tinnsjø er det nederste magasinet i vassdragsmodellen. I tillegg til avløpet fra Møsvatn og Kalhovd-Gøyst-Strengen har Tinnsjø et uregulert lokalfelt på 1676 km<sup>2</sup>. I realiteten er lokalfeltet til Tinnsjø ca. 70 km<sup>2</sup> mindre enn dette, men ettersom nederste punkt i vassdragsmodellen er Kirkevoll bru, som ligger rett nedstrøms Tinnsjø, ble det valgt å inkludere dette i lokalfeltet til Tinnsjø som forenkling (dette tilsvarer 2 % av totalnedbørfeltet til Tinnsjø). Avløpet fra Tinnsjø kan simuleres ved bruk av kapasitetskurver hvor enten alle luker stengt, 2/4 luker åpne eller 4/4 luker åpne. Kapasitetskurvene brukt (vannstand og flomavledningskapasitet) er som gitt i henhold til flomberegninger for damsikkerhet i vassdraget. I vassdragsmodellen kan Tinnsjø simuleres ved tre forskjellige typer inndata: tilsigsserier, nedbørd data fra målestasjoner eller regn og snøsmelting fra seNorge (versjon 2).

### 3.2.2.1 Måleserier

Tabell 12 gir oversikt over måleseriene som er brukt i oppsett av vassdragsmodellen for Tinnvassdraget. I tillegg er tilsigsseriene for Møsvatn, Strengen og Tinnsjø som inndata. Disse er beskrevet i kapittel 2.1. Regn- og snøsmelting data (RoS) fra seNorge ble også brukt som inndata til modellen og disse er beskrevet i kapittel 2.2.

Tabell 12. Tidsserier brukt i oppsett av vassdragsmodellen for Tinnvassdraget

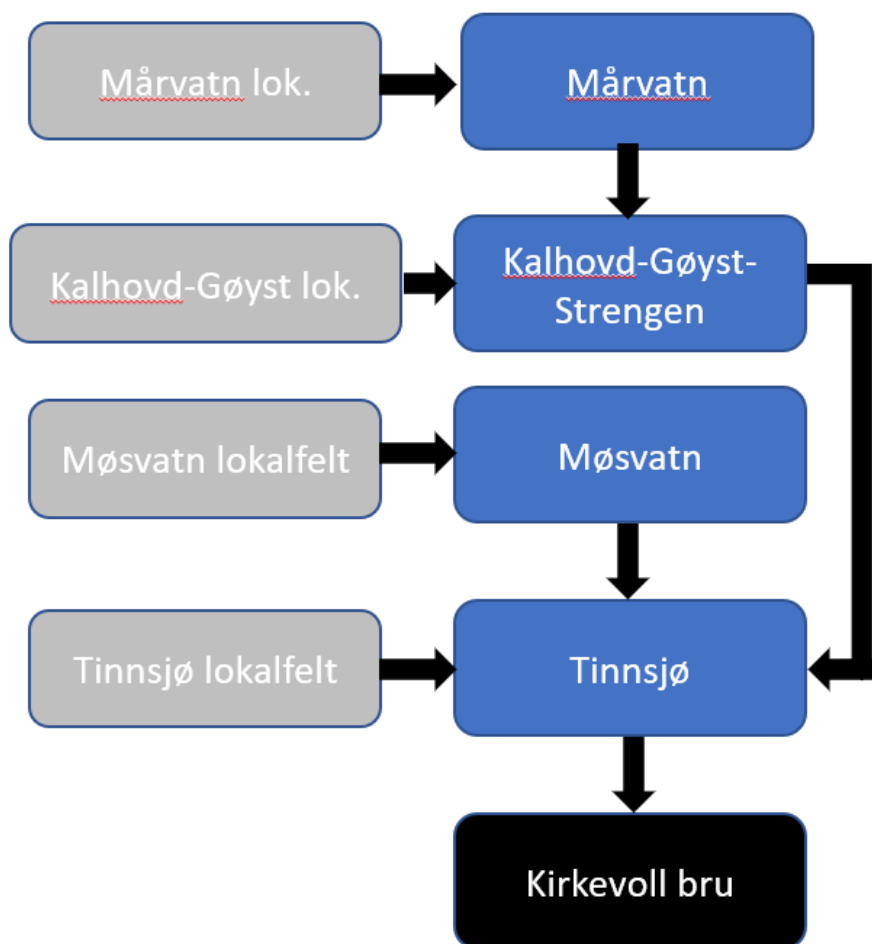
Stasjon	Periode	Areal (km <sup>2</sup> )	Merknad
16.24 Mårvatn	1914-dd	273	Mag. Vst (m)
16.27 Kalhovd-Gøyst	1947-dd	661	Mag. Vst (m)
16.18 Møsvatn	1907-dd	1508	Mag. Vst (m)
16.7 Tinnsjø	1884-dd	3772	Mag. Vst (m)
16.23 Kirkevoll bru	1905-dd	3845	Avløp Tinnsjø (m <sup>3</sup> /s)
16.142 Strengen	1968-dd	661	Avløp fra Kalhovd-og Gjøystvann (m <sup>3</sup> /s)
16.20 Møsvatn ndf.	1909-dd	1508	Avløp Møsvatn inkl. Frøystul krv. (m <sup>3</sup> /s)
Stegaros kraftverk	2002-dd		Driftsvannføring (m <sup>3</sup> /s)
Frøystul kraftverk	2001-dd		Driftsvannføring (m <sup>3</sup> /s)

### 3.2.2.2 Modelloppsett og kalibrering

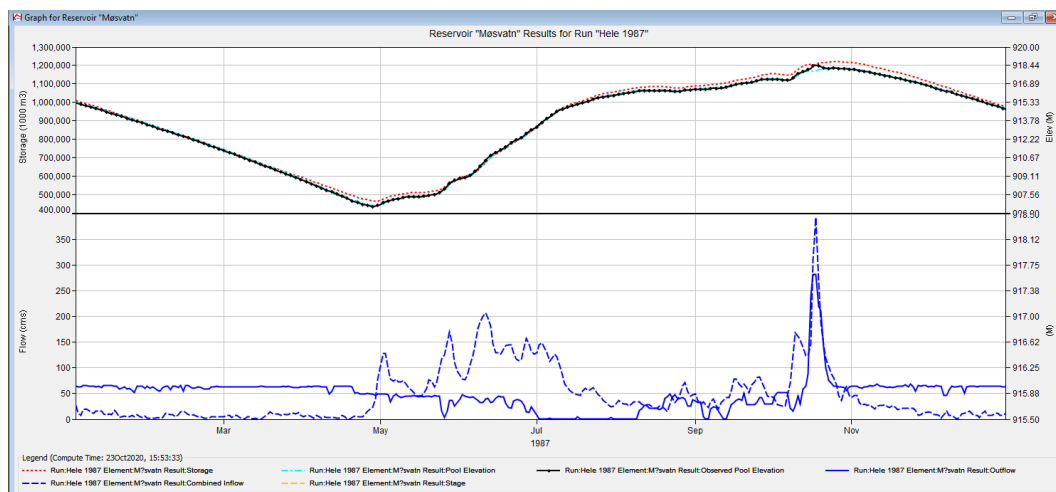
Vassdragsmodellen ble satt opp i HEC-HMS og er skjematisk fremstilt i Figur 24. For magasinene i Tinnvassdraget er det utarbeidet tilsigsserier for Kalhovd-Gøyst-Strengen, Møsvatn og Tinnsjø. Disse er beskrevet i kapittel 2.1 og ble brukt i kombinasjon med vannstandsseriene til magasinene for å sjekke at hydraulikken i vassdragsmodellen stemte. Tilsigsserien for Kalhovd-Gøyst-Strengen ble fordelt på lokalfeltet til Mårvatn og lokalfeltet til Kalhovd-Gøyst basert på størrelsen på de respektive lokalfeltene. Det ble i

denne analysen valgt å se spesielt på tre av de største flomårene i nyere tid for Tinnsjø hvor det foreligger best datagrunnlag (1987, 2004, 2015).

For de tre årene 1987, 2004 og 2015 ble modellen kjørt fra 1 januar – 31 desember. Figur 25 viser simuleringen av Møsvatn gjennom året 1987 som eksempel på testing av tilsigsseriene og hydraulikken i modellen. Figuren viser at det er svært god overenstemmelse mellom observert (sort linje) og simulert vannstand (turkis linje) gjennom hele året. Det største avviket mellom observert og simulert vannstand i Møsvatn gjennom 1987 var på 20 cm.



Figur 24. Skjematisk fremstilling av vassdragsmodellen for Tinnsjø. Lokale nedbørfelt er representert ved grå bokser, magasiner ved blå bokser og utløpet av modellen ved Kirkevoll bru ved svart boks.



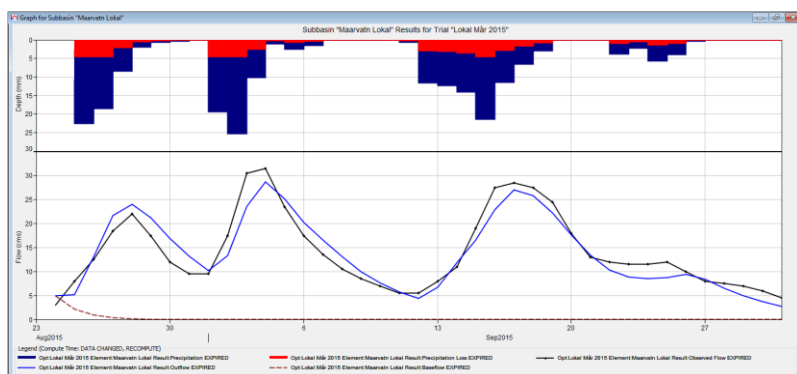
**Figur 25. Sjekk av hydraulikk og tilsigsserie for Møsvatn for 1987. I figuren er observert vannstand representert ved sort linje og simulert vannstand ved turkis linje øverst i figuren. Nedre del av figuren viser tilløp med stiplet blå linje og heltrukken blå linje representerer simulert avløp.**

Tabell 13 oppsummerer simuleringene med tilsigsserier for årene 2015, 2004 og 1987 for alle magasinene i vassdragsmodellen med resulterende Nash-Sutcliffe score for modellen og avvik ved observert maksimalvannstand. Resultatene antyder at den forholdsvis enkle modellen syntes å beskrive dynamikken i vassdraget godt. Dette var gjennomgående for alle magasiner og for alle de tre årene med unntak av Tinnsjø. Hvor mye vann som til enhver tid renner ut av Tinnsjø er avhengig av vannstanden i magasinet og manøvreringen av lukene ved dammen. I vassdragsmodellen er det lagt inn flere kapasitetskurver som beskriver forskjellige kombinasjoner av lukestillinger som beskrevet i 3.2.2. En begrensning i HEC-HMS modellen er at den kun kan kjøres med ett sett med lukestillinger per simulering. Ettersom lukene aktivt manøvreres gjennom året og gjennom flomhendelser klarer ikke modellen å beskrive vannstandsendringen i Tinnsjø på en god måte. For simulering gjennom en enkel flomhendelse kan en konstruere en kombinasjonskurve (kapasitetskurver fra flere sett med lukestillinger kombinert til en kurve basert på vannstand i magasin og observert vannføring nedstrøms) som kan gi gode resultater for den konkrete flomhendelsen, men slike kurver har sjelden stor verdi for simulering over lengre perioder og andre flomhendelser. I dette prosjektet var det imidlertid tilstrekkelig å utføre simuleringer med ett sett med lukestillinger per simulering.

**Tabell 13. Oppsummering av kontroll av hydraulikk og tilsigsserier for 2015, 2004 og 1987. Viser Nash-Sutcliffe (NS) og avvik ved observert maksimalvannstand (m) for hvert magasin og flomhendelse.**

År	Mårvatn		Kalhovd-Gøyst		Møsvatn		Tinnsjø	
	NS	Avvik vst (m)	NS	Avvik vst (m)	NS	Avvik vst (m)	NS	Avvik vst (m)
2015	0,95	0	0,93	-0,4	1,00	-0,2	0,03	1,1
2004	0,99	-0,1	0,99	-0,1	0,98	0,4	0,07	-0,1
1987	1,00	-0,1	0,99	-0,2	1,00	-0,3	0,17	0

Etter å ha bekreftet at dynamikken i vassdraget var godt beskrevet i modellen var det ønskelig å sette opp nedbør-avløps modeller for lokalfeltene til magasinene. Ettersom tilsigsseriene i kombinasjon med hydraulikken i modellen beskrev vassdraget godt, var det rimelig å anta at nedbør-avløpsmodeller kalibrert mot de samme tilsigsseriene også burde gi gode resultater. Det ble valgt å benytte RoS-data fra seNorge som inndata til modellen. Det ble utført kalibrering av nedbør-avløpsmodellene med tre forskjellige simuleringsserier i 2015. En ren hendelsesbasert kalibrering, kalt Flomperiode (24 aug – 1 sep), og to lengre kalibreringsperioder (15 apr – 30 nov og 01 jan – 31 des). Figur 26 viser simulert (blå linje) og observert (sort linje) vannføring for tilløpsflommen til Mårvatn for kalibrering Flomperioden i 2015 (24 aug – 1 sep). Gjennom høstflommen i 2015 var det tre flomtopper som alle beskrives forholdsvis godt av modellen.



Figur 26. Kalibrering av nedbør-avløpsmodell for Mårvatn for flomperioden 2015. Simulert vannføring (blå linje) og tilsigsserien for Mårvatn lokalfelt (sort linje)

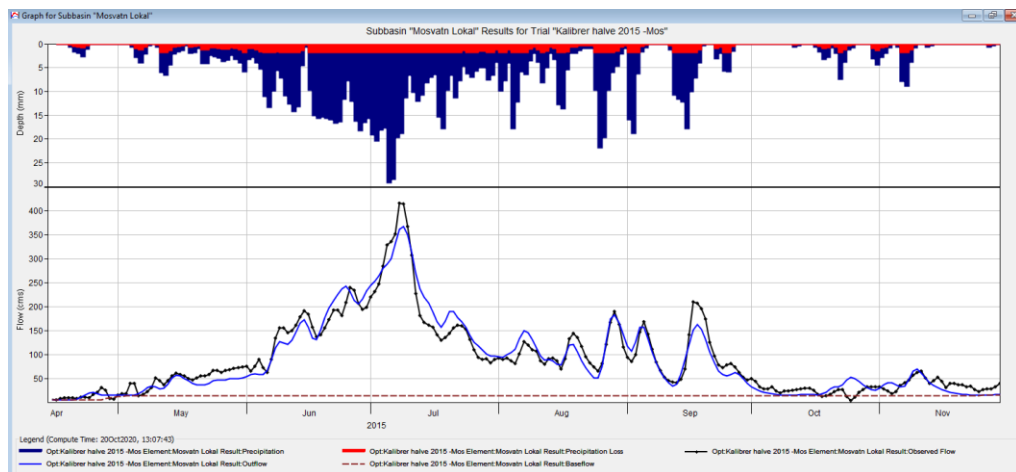
Tabell 14 oppsummerer kalibreringsresultatene for de lokale tilløpsflommene til hvert av de fire magasinene i vassdragsmodellen. Det må påpekes at det er de utarbeidede tilsigsseriene som her benyttes som observert lokaltilsig. Tabell 14 viser at modellen fikk akseptable resultater i form av Nash-Sutcliffe ( $NS > 0.7$ ) for alle de fire lokalfelt og for alle de tre simuleringsserier. Flomtoppene var generelt noe lavere enn det tilsigsseriene gav.

Tabell 14. Oppsummering av kalibreringsresultater (Nash-Sutcliffe og  $Q_{sim} maks/Q_{obs} maks$ ) for lokaltilsigene til de fire magasinene i vassdragsmodellen for Tinnnsjø. Kalibrert med tre forskjellige simuleringsserier.

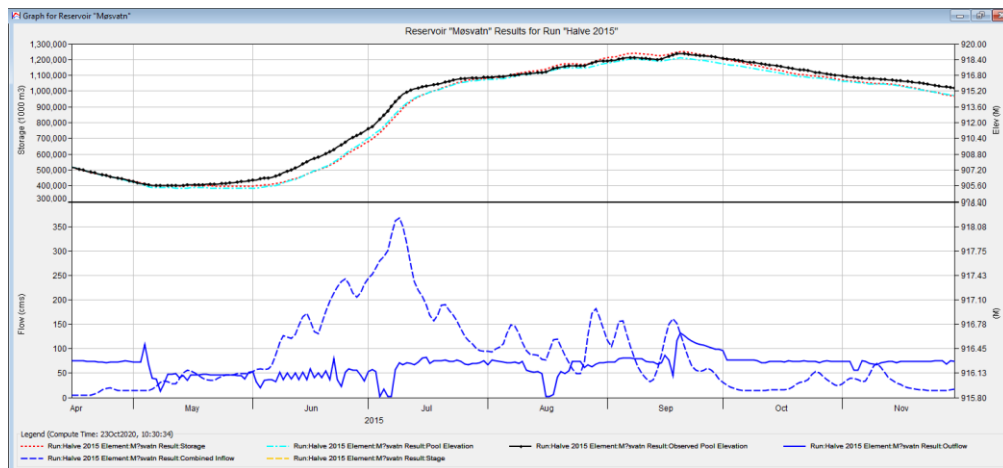
2015	Flomperiode		15-apr – 30 nov		Hele år	
	NS	Qsim/Qobs (%)	NS	Qsim/Qobs (%)	NS	Qsim/Qobs (%)
Mårvatn lok.	0,89	91	0,89	94	0,84	100
Kalhovd lok.	0,72	83	0,88	85	0,84	87
Møsvatn lok.	0,7	93	0,94	88	0,90	92
Tinnnsjø lok.	0,86	100	0,79	74	0,78	62

Under flomhendelser i vassdrag med store innsjøer/magasiner, som Tinnvassdraget, er det tilførte volumet over tid gjerne vel så viktig som selve flomtappen. Følgelig var det også interessant å se hvordan den simulerte vannstanden i magasinene ble sammenlignet med

den observerte vannstanden. Figur 27 og Figur 28 viser simulering av både tilløpet til Møsvatn og ruting gjennom magasinet i kalibreringsperioden 15 apr – 30 nov 2015. Fra Figur 27 kan vi se at selv om vannføringen simuleres ganske godt fra simuleringstart til kulminasjonen av vårflommen, er det simulerte volumet noe lavere enn det observerte. Dette medfører at den simulerte vannstanden i Møsvatn gjennom våren ligger noe lavere enn den observerte vannstanden (Figur 28). Gjennom sommermånedene simulerer modellen noe større tilsig til Møsvatn enn det tilsigsserien gir hvilket medfører at den simulerte vannstanden er svært lik den faktisk observerte vannstanden når høstflommen starter i slutten av august. Fra ca. midten av august observeres det at modellen gir noe mindre vann gjennom flommen i september og følgelig kulminerer den simulerte vannstanden i Møsvatn 40 cm under den observerte kulminasjonsvannstanden.



Figur 27. Simulert og observert tilløp til Møsvatn i kalibreringsperioden 15 apr - 30 nov 2015. Simulert vannføring (blå linje) og observert vannføring (sort linje).



Figur 28. Simulert og observert vannstand i Møsvatn i perioden 15 apr - 30 nov 2015. Øverste del av figuren viser vannstanden i Møsvatn (observerte vannstand i sort og simulert vannstand i turkis). Nedre del av figuren viser simulert tilløp til Møsvatn (stiplet blå linje) og avløpet fra Møsvatn beskrevet ved tidsserien 16.20 Møsvatn ndf.

Tabell 15 gir en oppsummering av kalibreringsresultatene for magasinene i vassdragsmodellen for Tinnvassdraget. Tabellen viser Nash-Sutcliffe og vannstandsavvik ved kulminasjonstidspunktet for hvert magasin og kalibreringsperiode. Resultatene viser at alle magasinene beskrives forholdsvis godt (maks 40 cm avvik ved kulminasjon) i alle de tre kalibreringsperiodene med unntak av Tinnsjø. Det skyldes begrensninger i

fleksibilitet i modellen med tanke på flomluker hvor en for hver simulering kun kan kjøre ved bruk av ett fast sett med lukestillinger. Som nevnt tidligere kan en for enkelthendelser løse denne utfordringen ved å benytte kombinasjonskurver, men denne typen kapasitetskurver vil ofte ha begrenset nytteverdi utover akkurat den aktuelle hendelsen.

**Tabell 15. Oppsummering av kalibreringsresultater for magasinene i vassdragsmodellen for Tinnvassdraget. Viser Nash-Sutcliffe og vannstandsavvik ved kulminasjonstidspunktet for hvert magasin og kalibreringsperiode.**

2015	Flomperiode		15-apr – 30 nov		Hele år	
	NS	Avvik (m) Sim - Obs	NS	Avvik (m) Sim - Obs	NS	Avvik (m) Sim - Obs
Mårvatn	0,98	-0,3	0,98	-0,4	0,93	0,2
Kalhovd-Gøyst	0,98	-0,1	0,92	-0,1	0,86	0,1
Møsvatn	0,54	0,1	0,98	-0,4	0,89	0,0
Tinnsjø	-0,12	-1,4	-0,31	1,8	-0,06	1,3

### 3.2.2.3 Verifisering

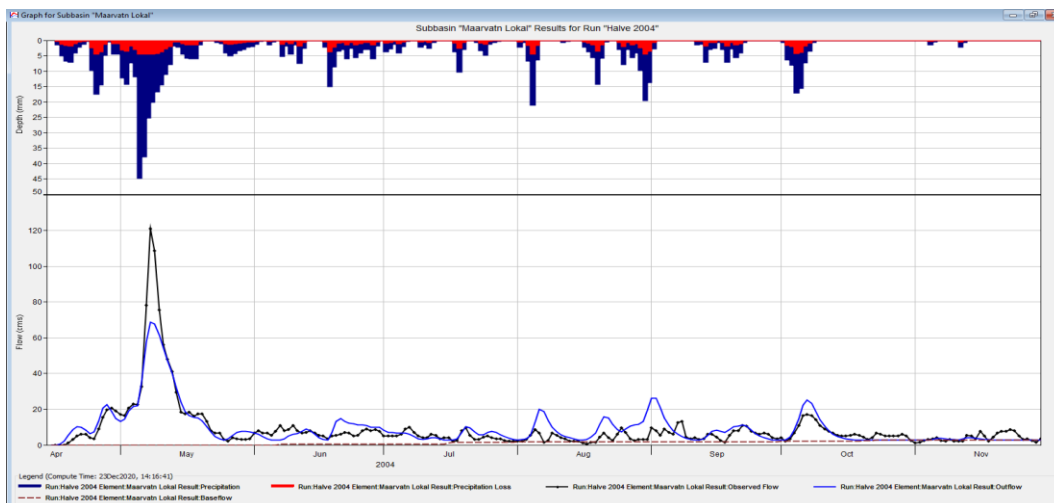
Modelloppsettene fra de tre forskjellige kalibreringsperiodene ble så testet på flommene i 2004 og 1987 for verifisering. Tabell 16 oppsummerer verifiseringen av de tre parametersettene for 2004. Gjennomgående for alle simuleringene var at selv om modellen til en viss grad beskriver vannføringsvariasjonen i lokalfeltene så underestimerer den flomtoppene. Figur 29 illustrerer dette godt ved at både timingen på flomtoppen og resesjonen på hydrografen stemmer godt med tilsigsserien, men at selve flomtoppen blir for liten.

**Tabell 16. Verifisering av nedbør-avløpsmodeller med forskjellige modelloppsett for 2004-flommen**

2004	Flomperiode		15-apr – 30 nov		Hele år	
	NS	Qsim/Qobs (%)	NS	Qsim/Qobs (%)	NS	Qsim/Qobs (%)
Mårvatn lok.	0,79	51	0,77	51	0,79	52
Kalhovd lok.	0,75	49	0,71	49	0,59	48
Møsvatn lok.	0,70	65	0,72	60	0,79	70
Tinnsjø lok.	0,59	82	0,51	66	0,55	56

Det samme observeres i simuleringene for 1987. Resultatene fra modellkjøringene i 1987 er oppsummert i Tabell 17 og en eksempelsimulering er vist i Figur 30. Også her simuleres vannføringen gjennom året forholdsvis godt, men igjen blir flomtoppen for liten. Ettersom hovedformålet med denne studien var å se på effekten av forskjellig arealfordeling av vanntilførsel og initialtilstander under ekstreme hendelser ble modellen

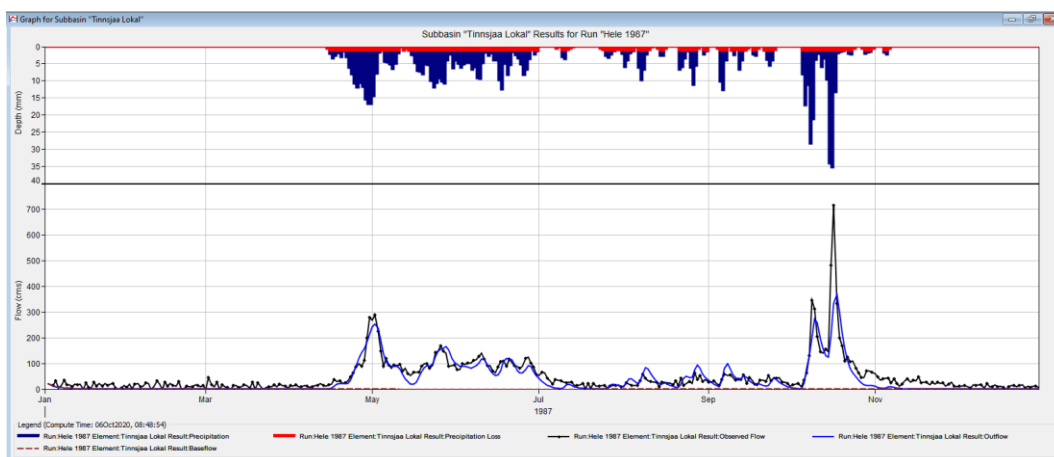
vurdert som god nok for å undersøke disse aspektene selv om modellen simulerte for små flomtopper for de to verifiseringsårene. I det videre simuleringsarbeidet ble modelloppsettet kalibrert for perioden 15 apr – 30 nov 2015 brukt.



Figur 29. Simulering av lokaltilsig til Mårvatn i perioden 15 apr - 30 nov 2004. Simulert vannføring er representert med blå linje og observert vannføring basert på tilsigsserien er representert med sort linje.

Tabell 17. Verifisering av nedbør-avløpsmodeller med forskjellige modelloppsett for 1987-flommen

1987	Flomperiode		15-apr – 30 nov		Hele år	
	NS	Qsim/Qobs (%)	NS	Qsim/Qobs (%)	NS	Qsim/Qobs (%)
Mårvatn lok.	0,73	61	0,69	63	0,62	48
Kalhovd lok.	0,55	60	0,67	63	0,7	55
Møsvatn lok.	0,27	58	0,68	56	0,72	65
Tinnsjø lok.	0,45	79	0,66	61	0,75	52



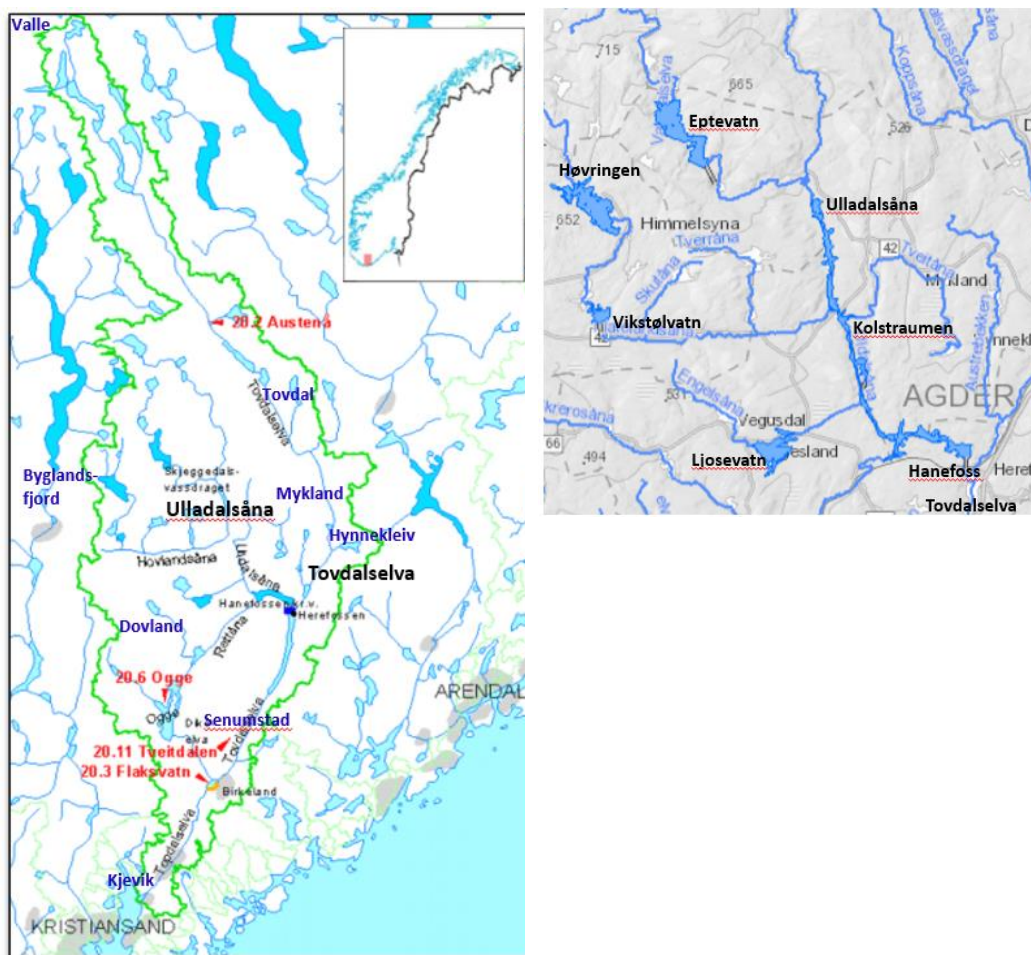
Figur 30. Simulering av lokaltilsig for Tinnsjø ved bruk av nedbør-avløpsmodell for året 1987.



### 3.2.3 Tovdalsvassdraget

Tovdalsvassdraget drenerer et område på nesten 1900 km<sup>2</sup> i Agder. Vassdraget består av to hovedgreiner, Ulladalsåna fra vest og Tovdalselva fra nord. Ulladalsåna (ca. 900 km<sup>2</sup>) og Tovdalselva (ca. 650 km<sup>2</sup>) renner ut i innsjøen Herrefossfjorden. Modellen er satt opp med nederste punkt ved Flaksvatn, som ligger noen kilometer nedstrøms Herrefossfjorden. Her er totalfeltet ca. 1800 km<sup>2</sup> (Figur 31).

Tovdalsvassdraget strekker seg fra havnivå og opp til ca. 1100 moh. Median høyde i feltet er ca. 350 moh, og kun 10 % av nedbørfeltet ligger høyere enn 740 moh.



Figur 31. Oversikt over nedbørfeltet til Tovdalsvassdraget. Hydrologiske målestasjoner i vassdraget er vist med rødt og aktuelle meteorologiske stasjoner er med blå skrift. I kartutsnittet til høyre er reguleringsmagasinene i Ulladalsåna, den vestlige delen av Tovdalsvassdraget vist.

#### 3.2.3.1 Målestasjoner

I Tovdalsvassdraget er det to målestasjoner for vannføring som har vært sentrale ved oppsettet av HEC-HMS-modellen for vassdraget. Det er 20.3 Flaksvatn, som ligger langt ned i vassdraget og 20.2 Austenå som ligger nord i Tovdalselva. Stasjonen Austenå er ikke påvirket av reguleringene i vassdraget. Hoveddata for Tovdalsvassdraget er vist i Tabell 18.

Tabell 18. Noen hoveddata for Tovdalsvassdraget

	Nedbørfelt (km <sup>2</sup> )	Sum tilsig (mill m <sup>3</sup> /år)	Sum magasin-volum (mill m <sup>3</sup> )	Reg.grad volum
20.2 Austenå	276	319	0	0 %
Tovdalselva v. utløp Herrefossfjorden	652	664	0	0 %
Hanefoss (sum Ulladalsåna)	891	948	98	10 %
20.3 Flaksvatn	1781	1868	98	5 %
Tovdalselva v. utløp i Tofdalsfjorden	1868	1952	98	5 %

Tabell 19. Fakta om magasin og delfelt til magasin som er modellert i HEC-HMS Tovdalsvassdraget.

Magasin	Lokalfelt (km <sup>2</sup> )	Q <sub>normal</sub> 61-90 (mill. m <sup>3</sup> /år)	Mag. areal ved HRV (km <sup>2</sup> )	Mag. volum (mill. m <sup>3</sup> )	HRV	LRV	Reg. høyde (m)
Eptevatn	72,3	86	3,92	44	350,00	328,60	21,40
Høvringen	37,8	48	3,81	22	482,63	474,63	8,00
Vikstøvatn	37,1	45	0,72	7,5	436,67	420,67	16,00
Kolstraumen	381,8	377	3,04	8,6	160,90	158,18	2,72
Ljosevatn	33,4	35	2,21	4,8	222,56	220,06	2,50
Hanefoss	328,6	358	2,93	11,55	148,69	140,69	8,00

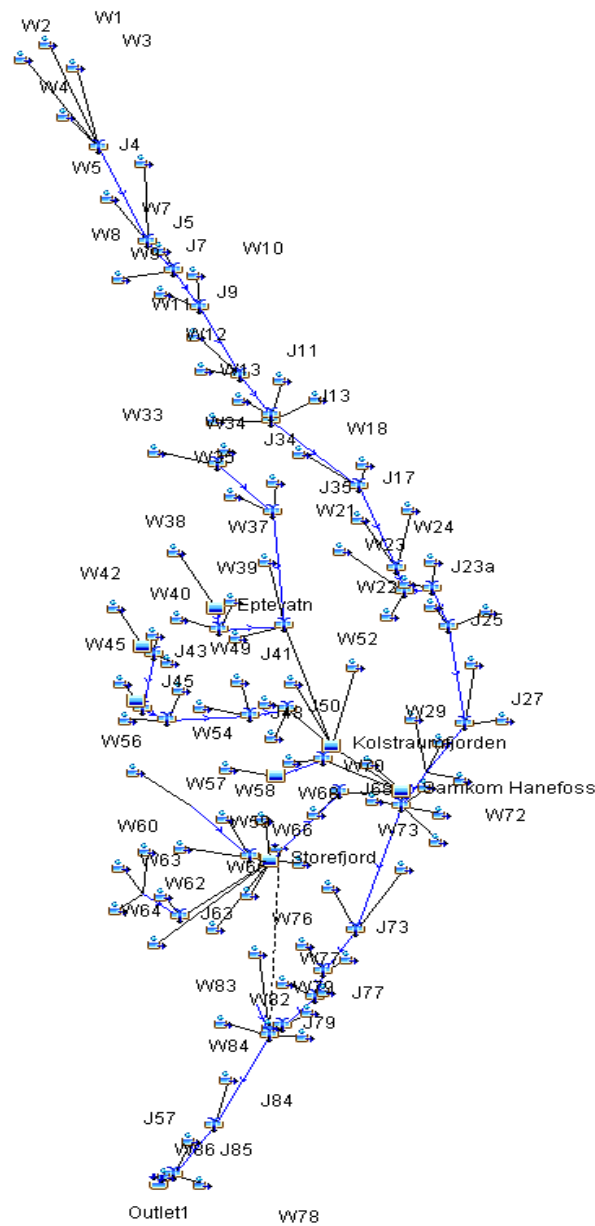
Tabell 20. Aktuelle nedbørstasjoner

Stasjon (vassdrag)	moh	Døgnverdier fra	Timesverdier i 2017
Kjevik	12	1946	Nei
Senumstad	67	1999	Nei
Dovland	259	1958	Nei
Hynnekleiv	162	2012	Ja
Mykland	245	1895	Nei
Tovdal	227	1926	Nei
Byglandsfjord	212	2011	Ja
Valle	308	1957	Ja

Det er åtte nedbørstasjoner i eller nær Tovdalsvassdraget som har vært benyttet i modellarbeidet (Tabell 20). Stasjonene ligger fra omkring havnivå og opp til ca. 300 moh. I Ulladalsåna er det seks mindre magasin (se Figur 31 og Tabell 19). Disse ligger fra ca. 150 til 500 moh. De har et samlet reguleringsvolum på 98 mill m<sup>3</sup>. Det gir en reguleringsgrad på 5 % ved målestasjonen 20.3 Flaksvatn og 10 % ved Hanefoss, som er det nederste kraftverket i Ulladalsåna.

### 3.2.3.2 Modelloppsett

Det er satt opp en HEC-HMS-modell av «Dr. Blasey - Dr. Øverland» (Blasy og Øverland, 2019) med 87 delfelt, (Figur 32). Alle magasiner er skilt ut som egne felt, og det er også to relativt store uregulerte innsjøer som er modellert separat i modellen. Delfeltene i modellen varierer i størrelse fra omkring 2 til ca. 70 km<sup>2</sup>.



Figur 32. HEC-HMS modell for Tovdalsvassdraget.

I tillegg er det lagt inn 33 elvestrekninger for å ta hensyn til både transporttider og flomdempning i elvestrengene i vassdraget. De ulike elvestrengene varierer i lengde fra omkring 1 til 14 km. Helningen av elva/bekken varierer fra ca. 0,1 m/km (nesten flatt) til drøyt 40 m/km, og elvebredden varierer fra ca. 10 til 500 m.

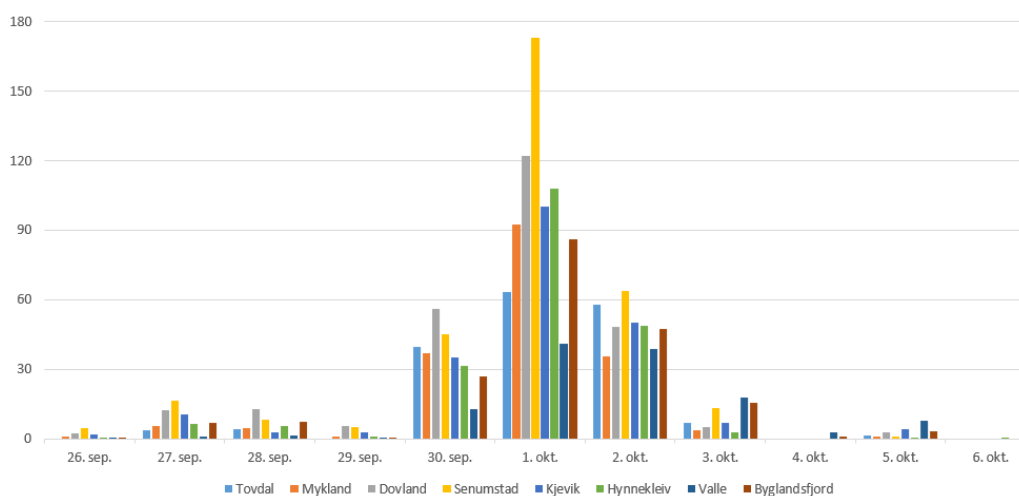
De seks reguleringsmagasinene er modellert ved å benytte magasinkurver (magasin vannstand og volum) og kapasitetskurver (vannstand og flomavledningskapasitet) som gitt i henhold til flomberegninger for damsikkerhet i vassdraget.

En mer detaljert beskrivelse av modellen finnes i rapporten «Nedbør-avløpsmodell Tovdalsvassdraget» (Blasy og Øverland, 2019).

### 3.2.3.3 Kalibrering

Modellen er kalibrert mot en stor flom i Tovdalsvassdraget i september/oktober 2017. Maksimal vannføring ved målestasjonen 20.3 Flaksvatn hadde et beregnet gjentaksintervall på omkring 200 år. Ved målestasjonen 20.2 Austenå var ikke flommen like "sjelden", der hadde flommen et gjentaksintervall på omkring 50 år.

Det kom svært mye nedbør i området fra 30. september – 2. oktober. Mest nedbør ble målt på Senumstad med drøyt 280 mm i løpet av 3 døgn og 173 mm som største døgnet nedbør (Figur 33). Minst nedbør kom rett nord for Tovdalsvassdraget ved målestasjonen Valle. Her ble det i løpet av 3 døgn målt i underkant av 100 mm. I sum kom det disse dagene 50 – 60 % mer nedbør ved Senumstad enn gjennomsnittet for alle åtte nedbørstasjonene.

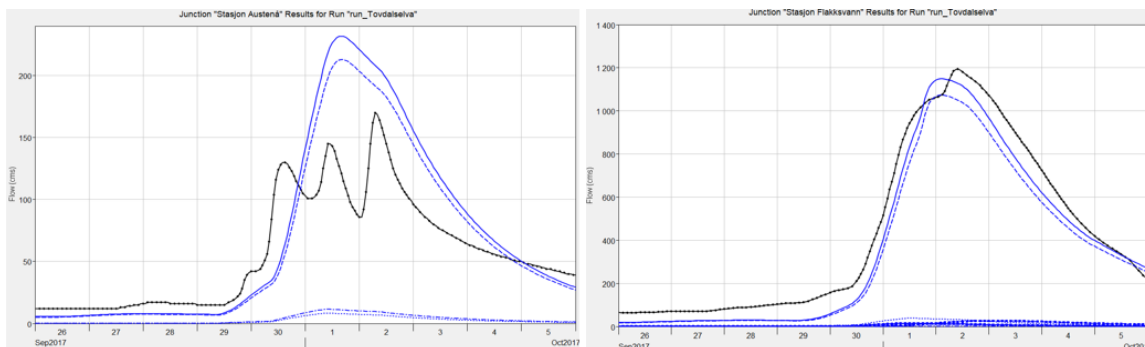


**Figur 33. Døgnet nedbør i mm ved målestasjonene i/ nær Tovdalsvassdraget 26. september – 6. oktober 2017.**

Ved kalibrering av modellen ble det først beregnet nedbør for de enkelte delfeltene ut fra alle åtte nedbørstasjonene, hvor disse ble vektet ut fra invers avstand. Det medførte imidlertid at simulert vannføring ved både Austenå og Flaksvatn ble en god del mindre enn observert. Ved kun å benytte data fra målestasjonen Senumstad ble resultatet for Flaksvatn vesentlig bedre, mens vannføringen ved Austenå ble overestimert (Figur 34). Maksimal vannføring ut av Flaksvatn ble observert til ca. 1200 m<sup>3</sup>/s, mens simuleringene gir en maksimal verdi på ca. 1150 m<sup>3</sup>/s.

Dette tyder på at i denne situasjonen ble arealnedbøren for vassdraget bedre beskrevet ved kun å benytte stasjonen som fikk mest nedbør og ikke en vektet nedbør fra alle åtte stasjonene. Noe av årsaken kan være at de fleste av nedbørmålerne ligger under 250 moh, mens medianhøyden i feltet er ca. 350 moh. Vanligvis regner det mer i høyereliggende områder enn i lavereliggende. En måte å “kompensere” for dette er å benytte stasjonen som ga mest nedbør som representativ for hele feltet. I dette tilfelle ga dette et OK resultat.

Det ble derfor konkludert med å benytte dette forenklete oppsettet, bruk av kun nedbørstasjonen Senumstad, da hensikten i dette delprosjektet først og fremst har vært å se på virkningen av reguleringene på flomforholdene i vassdraget.



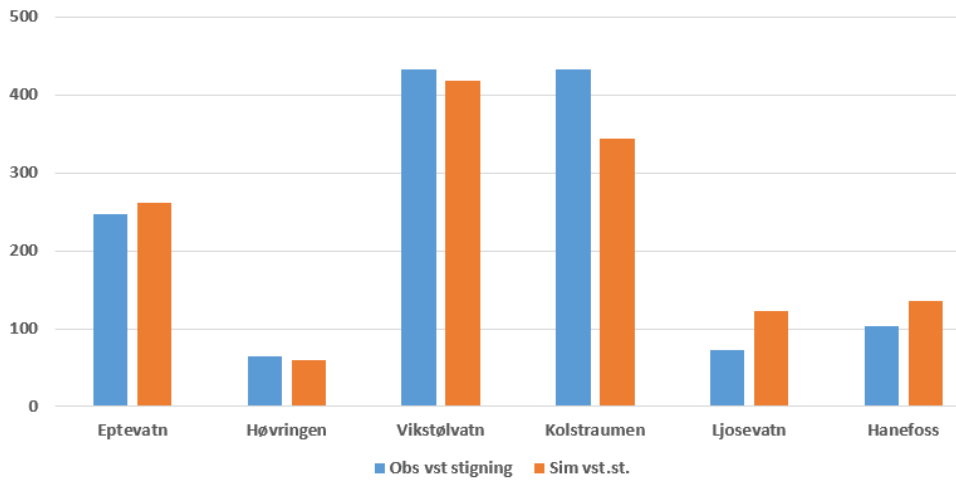
**Figur 34. Simulert (blå) og observert (svart) vannføring ved målestasjonene 20.2 Austenå (venstre) og 20.3 Flaksvatn (høyre) under flommen i september/oktober 2017. Nedbør er fra kun stasjonen Senumstad.**

For ytterligere å sjekke at modellen ga rimelige resultater, er observert og simulert maksimal magasin vannstand i de seks magasinene sammenlignet. Som starttilstand ble modellen kjørt med observert vannstand 26. september 2017. Observert og simulert vannstandsstigning i magasinene er vist i Figur 35. For de fleste magasinene er det rimelig godt samsvar mellom observerte og beregnede verdier.

Størst avvik har Kolstrømmen med nesten 90 cm. En viktig årsak til dette er sannsynligvis at her begynner det å renne vann i terrenget ved en vannstand som er 20 cm over HRV. Maksimal observert vannstand i Kolstrømmen under flommen var ca. 3 m over HRV. Dette gir økt usikkerhet knyttet til den benyttede avløpskapasiteten for dette magasinet.

Videre er det ved Hanefoss tre flomluker. Det er i beregningene antatt at kun en luke var i bruk under flommen. Bruk av to eller tre luker i hele eller deler av flomforløpet ville gitt lavere simulert vannstand, og en enda bedre overensstemmelse mellom simulert og observert verdier.

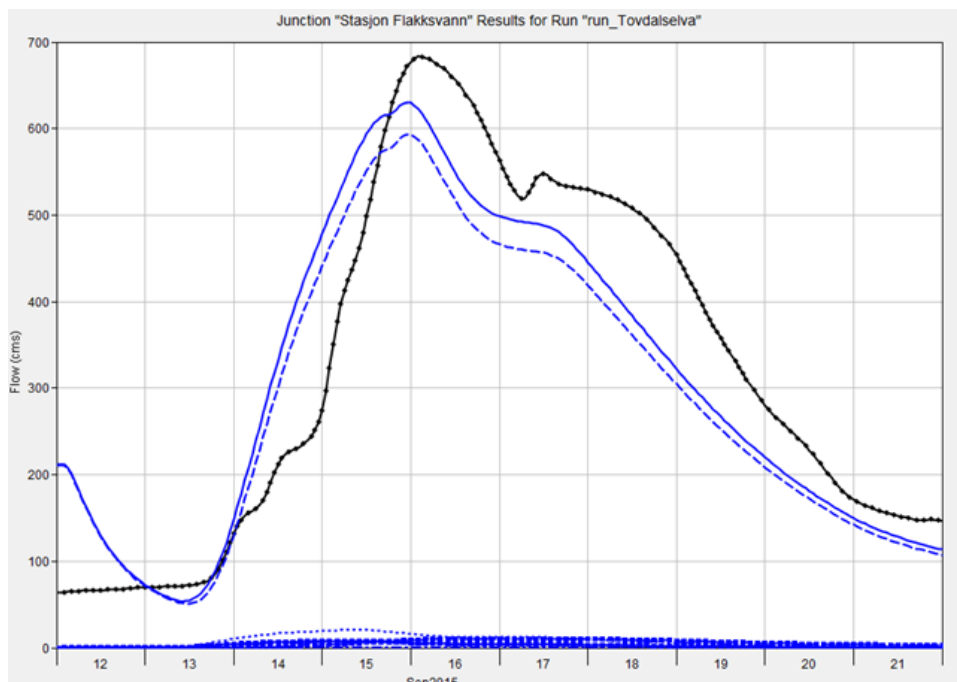
Vi har ikke detaljert informasjon om hvordan vassdraget ble manøvrert disse dagene. Ut fra de valgte forutsetningene, synes derfor HEC-HMS-modellen å gi rimelige resultater for de ulike magasinene, selv med kun bruk av en nedbørstasjon, Senumstad, under flommen i 2017.



Figur 35. Observert (blå) og simulert (oransje) vannstandsstigning i cm i magasinene i Tovdalsvassdraget i perioden 26. september – 2. oktober 2017.

### 3.2.3.4 Verifisering

For å verifisere modellen ble det også gjort en beregning med nedbør-input fra 12. – 22. september 2015 (Figur 36). Også da var det relativt stor flom i vassdraget. Under denne hendelsen kom det 185 mm Senumstad i løpet av 3 døgn og ca. 240 mm i løpet av 5 døgn. Også under denne hendelsen kom det 50 - 60 % mer nedbør ved Senumstad enn gjennomsnittet for alle åtte nedbørstasjonene.



Figur 36. Simulert (blå) og observert (svart) vannføring ved målestasjonene 20.3 Flaksvatn under flommen i september 2015.

Som startmagasin under denne hendelsen ble observert vannstand i det enkelte magasin 12. september benyttet. Beregningene ga en maksimal vannføring ut av Flaksvatn på ca. 630 m<sup>3</sup>/s, mens maksimalt observert avløp var ca. 680 m<sup>3</sup>/s. Også i denne situasjonen kan deler av avviket forklares med manøvrering av magasinene, spesielt bruk av luker ved Hanefoss. For flommen i 2015 ble simulert vannstand i Hanefoss ca. 60 cm høyere enn

observert, noe som kan tyde på at det ble tappet noe mer gjennom lukene også i denne situasjonen enn lagt til grunn i beregningene.

### 3.2.4 Randsfjorden

Randsfjorden utgjør ca. 3700 km<sup>2</sup> av Drammensvassdragets østlige del. Denne delen av vassdraget har vært påvirket av regulering siden 1912 da Randsfjorden ble regulert (327 mill. m<sup>3</sup>). Arealet av Randsfjorden er 140 km<sup>2</sup>. Reguleringen av Randsfjorden ble økt på slutten av 1950-tallet. Før 1920 ble det foretatt noen mindre reguleringer i sidevassdrag til Randsfjorden.

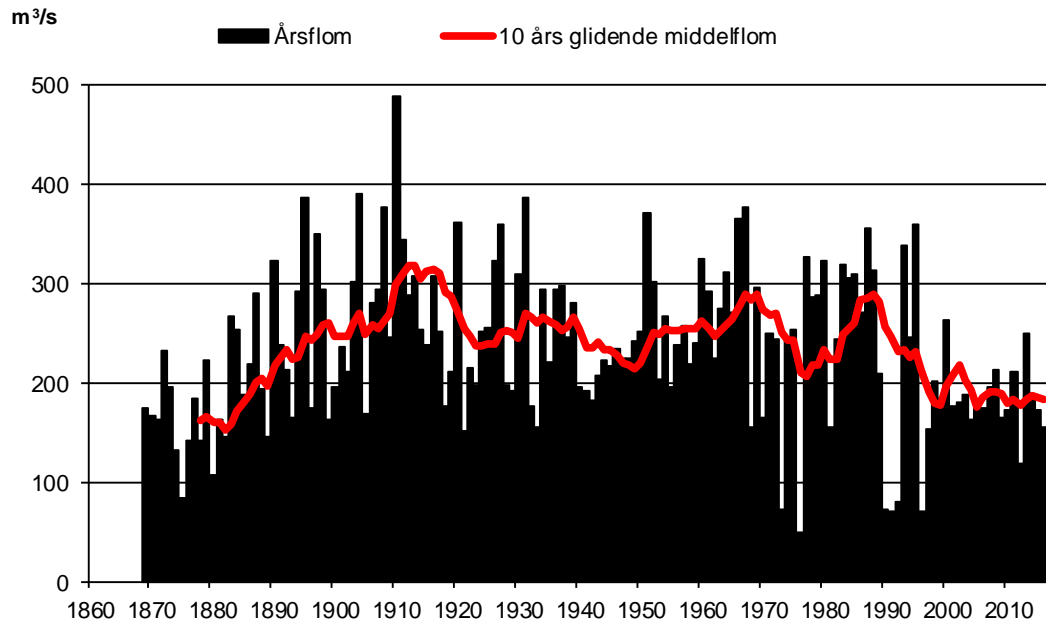
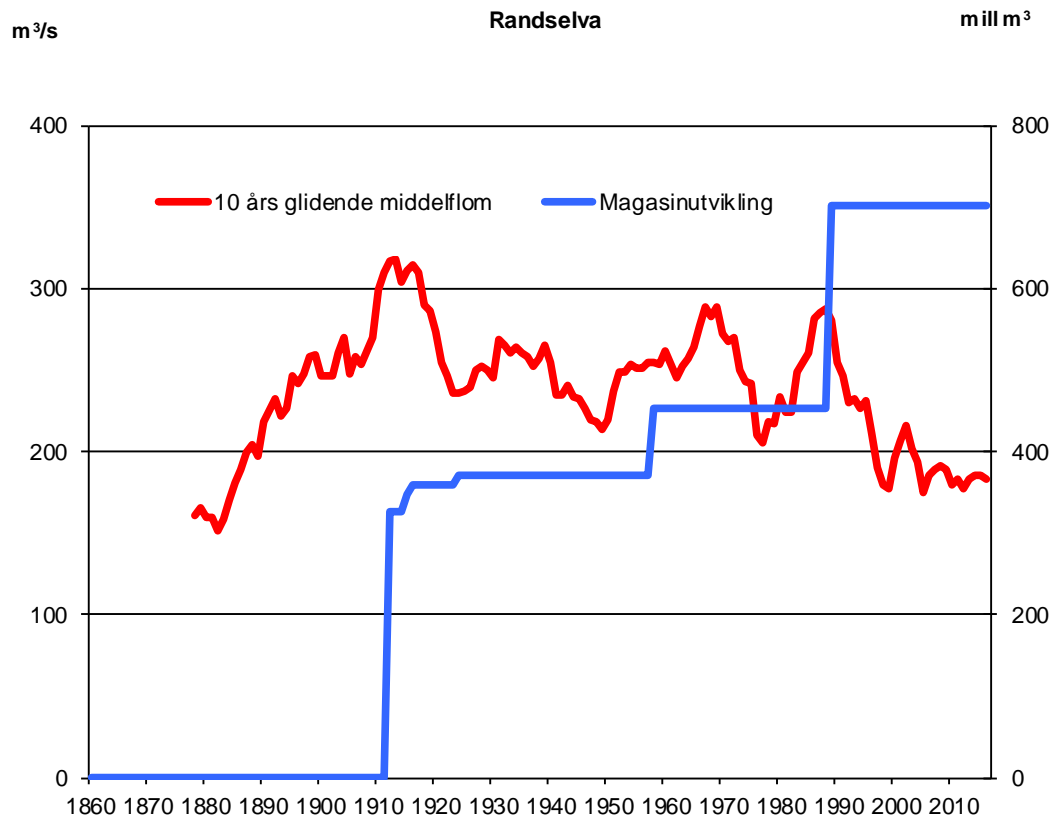
Siste større inngrep i vassdraget er utbyggingen av Dokka. Den øvre delen av Dokka magasineres i Dokkfløyvatn og utnyttes i kraftverkene Torpa og Dokka. Kraftverkene ble satt i drift i 1989. Nedbørfeltet til Dokkfløyvatn inkludert overføring av Synna er 602 km<sup>2</sup>, og regulerbart volum er 250 mill. m<sup>3</sup>. Dette gir en reguleringsgrad på 59 prosent.

#### 3.2.4.1 Måleserier

Vi har data for Randselva fra 1869 til d.d., men dataene før 1880 er svært usikre.

Figur 37 viser største døgnmiddelvannføring hvert år i perioden 1869 – 2016 og et glidende 10-års middel. 10-års middelet har i hovedsak variert mellom 200 og 300 m<sup>3</sup>/s. Det kan se ut til at flomverdiene er redusert de siste årene, noe som følger av utbyggingen av Dokka på slutten av 1980-tallet. Randsfjorden er også benyttet til å holde tilbake vann for å redusere flommer nedover i vassdraget i enkelte år. Det kan dermed være noe inkonsistens mellom vannstanden i Randsfjorden og vannføringen i Randselva under flom.

Dokkfløyvatn har et stort reguleringsvolum, og får tilsig fra ca. 16 % av nedbørfeltet til Randsfjorden. De siste årene har det ikke vært overløp ved dammen, og kraftverket tapper normalt ikke fra Dokkfløyvatn i en flomsituasjon.



Figur 37. Flommer i Randselva fra 1869 til 2016.

De største flommene i Randselva har stort sett vært i mai og juni. Den største registrerte flommen i Randselva er 25. mai 1910 med 488 m<sup>3</sup>/s.



Men det har også vært flere tilfeller av vannføringer på 300 m<sup>3</sup>/s eller mer i alle månedene fra juli til november. Største høstflom er 18. oktober 1987 med 373 m<sup>3</sup>/s, og dette året var det også en stor vårfloam med 381 m<sup>3</sup>/s.

**Tabell 21. Aktuelle målestasjoner i vassdraget.**

Stasjon	Periode	Areal (km <sup>2</sup> )	Merknad
12.8 Grøndvold bru	1978-d.d.	934	Mangler lengre perioder med data. Regulert fra 1989.
12.69 Randsfjord	1869-1915	3692	Flomdata før 1880 er svært usikre.
12.70 Etna	1919-d.d.	569	
12.200 Kolbjørnshus	1978-d.d.	2063	Regulert fra 1989.
12.228 Kistefoss	1916-d.d.	3704	
12.286 Jaren ndf.	1952-d.d.	113	Mangler lengre perioder med data.

### 3.2.4.2 Modelloppsett

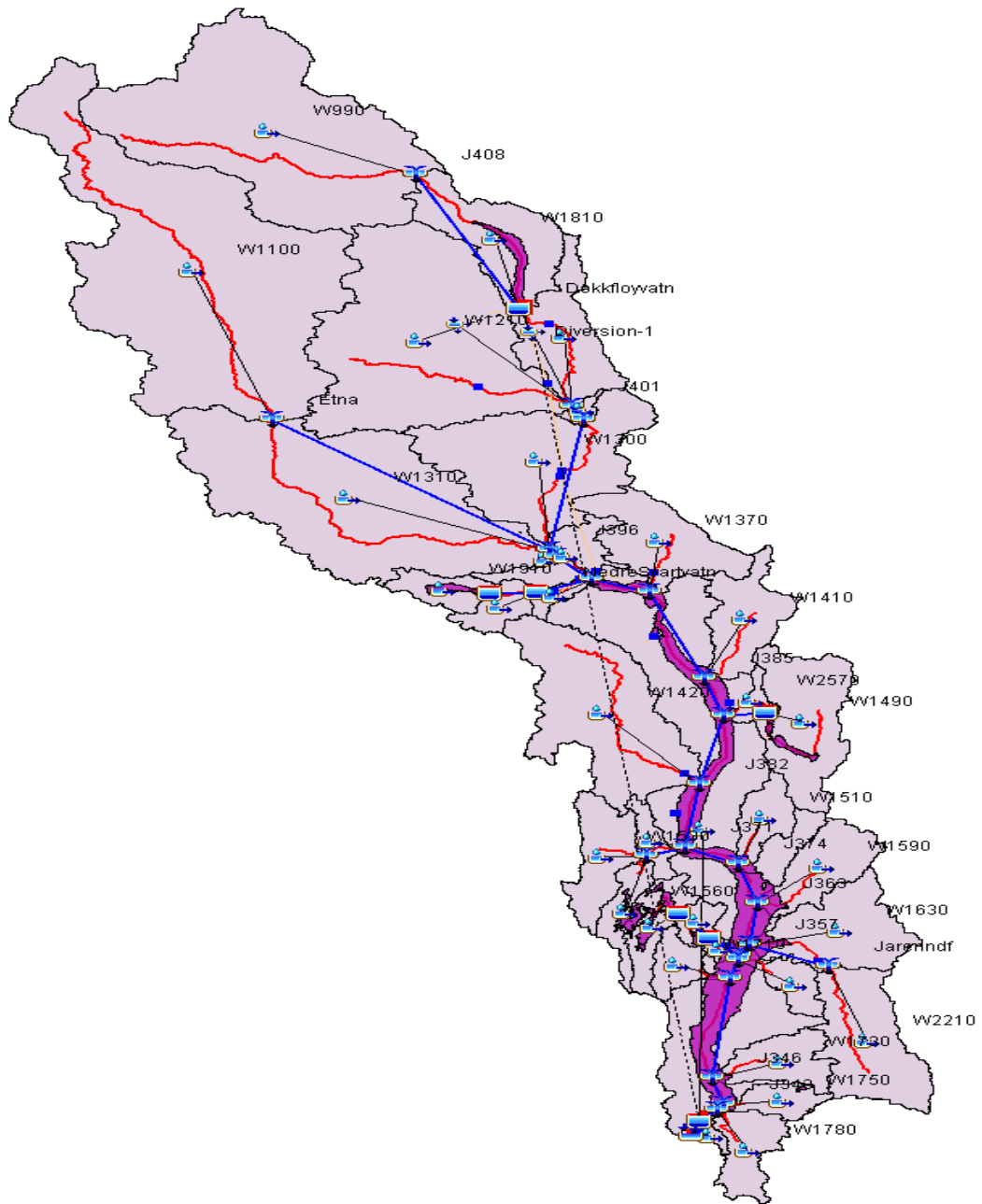
HEC-HMS er benyttet for å modellere nedbørfeltet til Randsfjorden. Modellen har utløp ved målestasjon 12.228 Kistefoss, som ligger nedstrøms utløpet av Randsfjorden. Modellen er bygd opp av 35 delfelt, 7 reguleringsmagasiner og er laget som to versjoner. En tilpasset nedbør- og temperatur og en som tilsigsmodul. Nedbør- avløpsmodellen er en gridet versjon med gridcellestørrelse på 1x1 km og det er i realiteten benyttet regn- og snøsmelting (RoS-data) fra seNorge som inngangsdata. Dette forenkler kalibreringen og en slipper å kalibrere snømodulen i modellen.

Det er modellert 7 magasiner. Av disse er det lagt vekt på å modellere 2 i mer detalj, Dokkfløyvatn og Randsfjorden. De resterende er lagt inn med overløpskurver og går til overløp uten at det er lagt inn noen form for tapping.

Tapping er lagt inn i modellen som tidsserier gjennom «Additional/Specified release» opsjonen i HEC-HMS. Det er estimert tapping fra Dokkfløy for å få mer riktig vannhusholdning i enkeltår. Bergerfoss styrer utløpet/kapasiteten ut av Randsfjorden. Ved kalibrering av modellen, er vannføringen ut av Randsfjorden lagt inn som tapping. Dette gir muligheten til å kalibrere et mer riktig volum på tilløpet. Ved kortere simuleringer, benyttes kapasitetskurven og riktig/ønsket initialtilstand i modellen.

Av overføringer er nedbørfeltet til Synna overført til Dokkfløy, samt at Torpa og Dokka kraftverk utnytter vannføringen i elva Dokka. Dokka kraftverk har utløp direkte i Randsfjorden. Overføringene er modellert som «Diversion» i modellen. For Synna er det lagt inn en begrensning i overføringskapasiteten på 30 m<sup>3</sup>/s.

Tidsserier for vannføring, vannstand, tilsig og RoS er lastet inn i HEC-DSSVue.



Figur 38 Randsfjorden – totalfelt, delfelt og magasiner i modellen.

Tabell 22. Fakta om magasin og delfelt til magasin som er modellert i HEC-HMS modellen for Randsfjorden.

Magasin	Lokalfelt (km <sup>2</sup> )	Q <sub>N</sub> (61-90) (mill. m <sup>3</sup> /år)	Mag. areal HRV (km <sup>2</sup> )	Mag. volum (mill. m <sup>3</sup> )	HRV	LRV	Reg. høyde (m)	Reg. (%)
Akksjøen	26,8	15,30	3,99	12,0	603,5	600,06	3,44	78,5
Svartvatnet	14,7	8,10	0,26	0,65	535,5	533,0	2,5	8,0
Dokkfløyvatn	602	424,0	9,42	250	735,0	670	65,0	59,0
Trevatna	108	46,20	4,84	13,44	383,59	380,59	3,0	29,1
Velmunden	58,4	22,20	10,37	16,0	403,5	401,4	2,1	72,1
Sortungen	15,1	5,84	1,28	4,00	365,6	361,1	4,5	68,5
Randsfjorden	2875	1308	140,7	408,6	134,5	131,3	3,2	31,2
<b>Totalt</b>	<b>3703</b>	<b>1830</b>	-	<b>704,7</b>	-	-	-	<b>38,5</b>

### 3.2.4.3 Kalibrering

Tilsigsversjonen er manuelt kalibrert for å få volumet til å passe noenlunde ved målestasjoner i vassdraget og ved magasinene Dokkfløyvatn og Randsfjorden.

Kalibreringen som følger viser tilpasningen for tidsserie med «sum nedbør og snøsmelting» (RoS) fra seNorge, døgndata, for perioden 2013. Tidsoppløsningen i modellen er på 1-døgn.

Det ble utført automatisk kalibrering ved hjelp av HEC-HMS sine egne optimeringsrutiner og er forsøkt kalibrert med to metoder; Simplx og MC-MC-simuleringer. I versjonen presentert her er det kalibrert på flomtopp og volum og metoden er «Simplex». Parameterene i HEC-HMS som er kalibrert er

- Initial loss
- Constant rate
- Time of concentration
- Storage coefficient
- Initial discharge
- Recession constant
- Ratio to peak
- Lag time (min)

Kalibreringen ble utført på data for året 2013 og for følgende punkter i vassdraget:

#### Vannføring

- Etna
- Grøndvold bru
- Kolbjørnshus
- Jaren ndf.
- Kistefoss

#### Vannstand

- Randsfjorden
- Dokkfløyvatn

Andre initialtilstander og forutsetninger som er lagt til grunn i modellen er:

- Initialtilstanden i magasinene ble hentet fra observerte vannstander (1/1-2013).
- Tapping fra magasinene Dokkfløyvatn og Randsfjorden er modellert som «Additional Release» (der estimert/observert tapping slippes ved dammene).

Tilpasningen er sammenfattet i Tabell 23 og Tabell 24 under, samt i figurene 39 - 44.

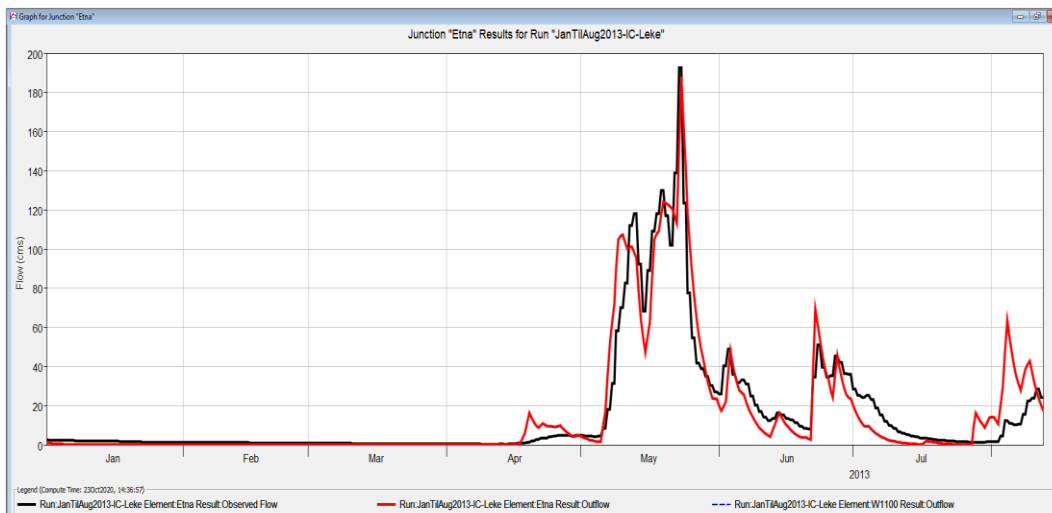
**Tabell 23 Kalibreringsresultater vannføring fra perioden 1. januar – 12. august 2013.**

Delfelt	Obs Peak (m <sup>3</sup> /s)	Sim. Peak (m <sup>3</sup> /s)	Nash-Sutcliffe	SimPeak/ObsPeak (%)	SimVol/ObsVol (%)
12.70 Etna	193	188	0,88	97	99
12.8 Grøndvold bru	168	169	0,61	101	99
12.200 Kolbjørnshus	499	502	0,86	101	100
12.228 Kistefoss	249	250	1,00	100	100
12.286 Jaren ndf.	7,1	6,3	0,81	89	94

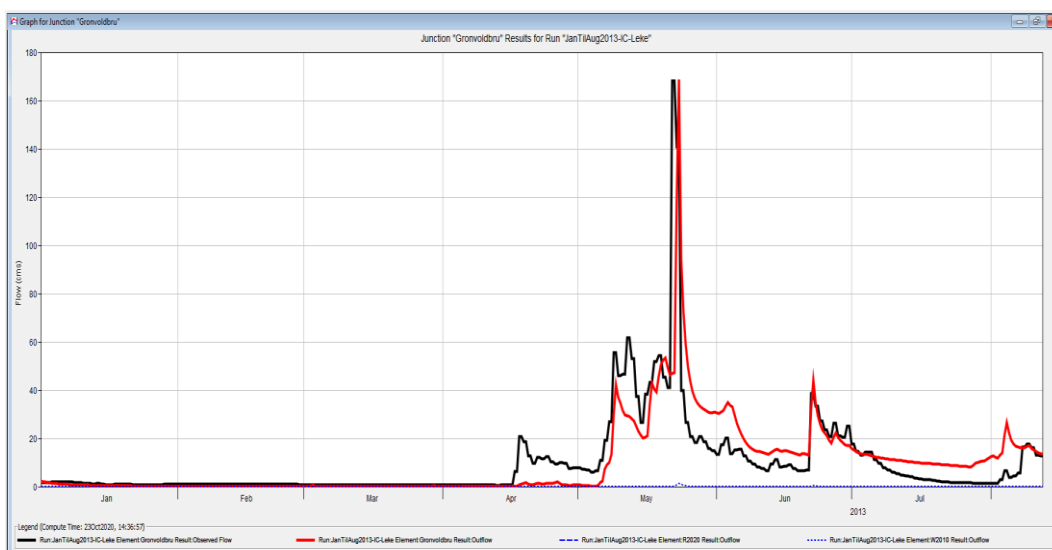
**Tabell 24 Kalibreringsresultater vannstand i magasiner for flomhendelsen (2013).**

Delfelt	Obs Peak (m)	Sim. Peak (m)	Nash-Sutcliffe
Dokkfløyvatn	736	736	0,80
Randsfjorden	134,82	134,86	0,70

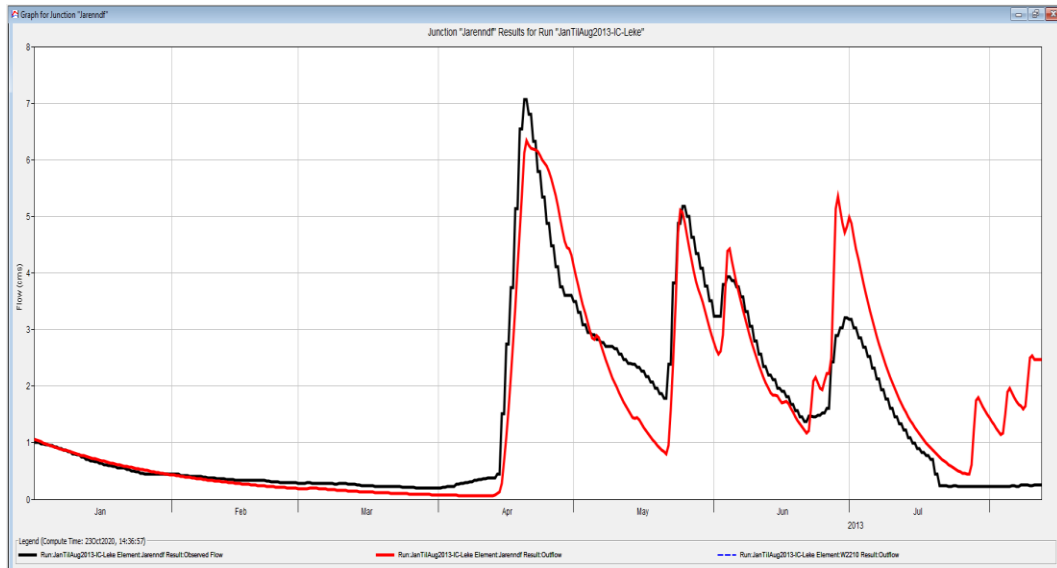
Kalibreringen ser ut til å gi relativt god tilpasning til observasjonene, og RoS-data gir et godt grunnlag for simuleringer i vassdraget. Tilpasningen som er gitt i Tabell 23 for målestasjon 12.228 Kistefoss er basert på observert tapping ved Bergerfoss, slik at i teorien blir observasjoner sammenlignet med observasjoner. Se derfor heller på tilpasningen av vannstanden i Randsfjorden for å få et bedre inntrykk av tilpasningen.



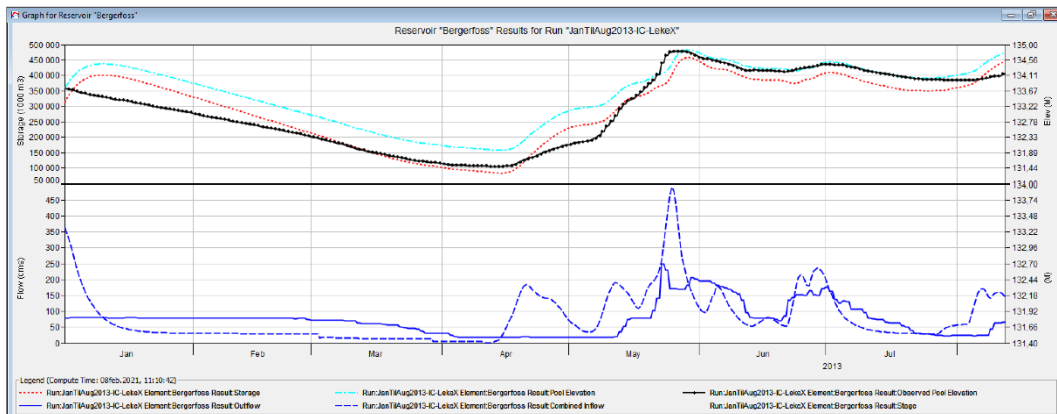
**Figur 39. Kalibrering av vannføring ved målestasjon 12.70 Etna. Perioden er 1.1 - 12.8 2013. Sort linje viser observert vannføring og rød linje simulert vannføring.**



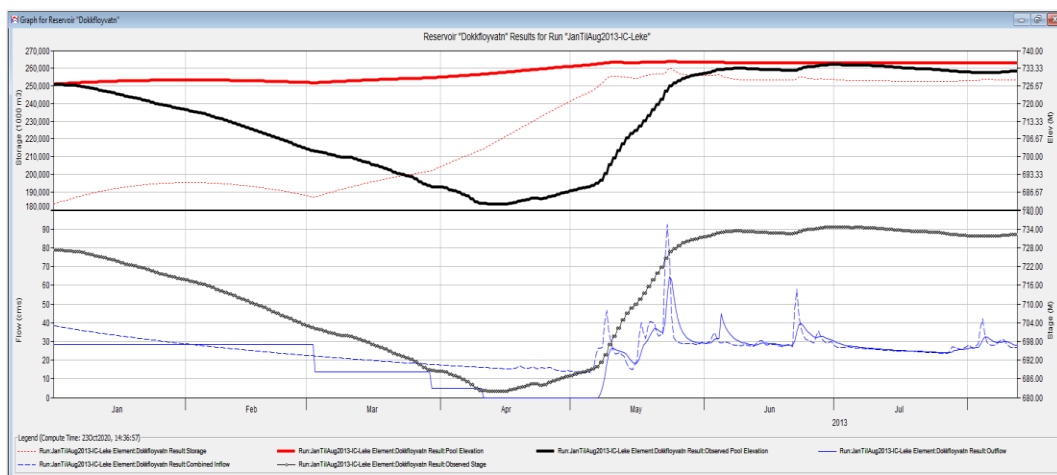
**Figur 40. Kalibrering av vannføring ved målestasjon 12.8 Grønvold bru. Perioden er 1.1 - 12.8 2013. Sort linje viser observert vannføring og rød linje simulert vannføring.**



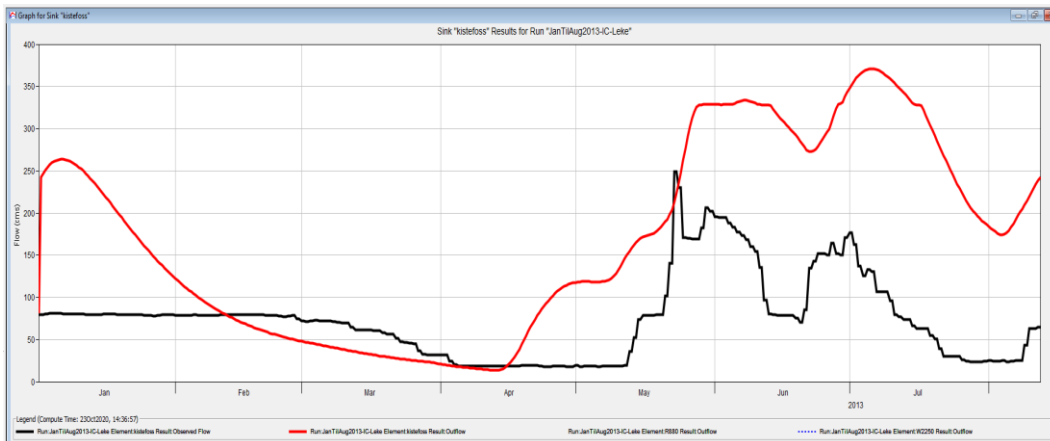
Figur 41. Kalibrering av vannføring ved målestasjon 12.286 Jaren ndf. Perioden er 1.1 - 12.8 2013. Sort strek viser observert vannføring og rød strek simulert vannføring.



Figur 42. Kalibrering av vannstand ved målestasjon Bergerfoss. Perioden er 1.1 - 12.8 2013. Sort strek viser observert vannstand og turkis stiplest strek (over) simulert vannstand. Blå heltrukket strek er observert vannføring ut, mens blå stiplest strek er simulert tilløp til Randsfjorden. Under flommen ble det holdt noe vann tilbake i Randsfjorden for redusere flommen nedstrøms i vassdraget.



Figur 43. Kalibrering av vannstand ved målestasjon Dokkfløyvatn. Perioden er 1.1 - 12.8 2013.



Figur 44. Kalibrering av vannføring ved målestasjon 12.228 Kistefoss. Perioden er 1.1 - 12.8 2013. Sort strek viser observert vannføring og rød strek simulert vannføring.

### 3.2.4.4 Verifisering

Det er tilgjengelig seNorge-data for tidsperioden (1958-2019). Reguleringsforutsetningene i vassdraget har derimot endret seg noe og det er spesielt Dokkfløyvatn, som ble satt i drift i 1989, som har størst betydning. Det mangler også observasjoner i flere magasiner i denne perioden.

For å verifisere modellen er det derfor valgt å modellere to enkelthendelser fra årene 2000 (høstflom) og 2007 (sommer-/regnflo). Verifiseringsperiodene er satt til hhv. 15 juni – 31.juli og 1. oktober til 31. desember. Initialtilstandene i magasinene er hentet fra observerte magasin vannstander ved starten i verifiseringsperioden.

I Tabell 25 og Tabell 26 er resultatene for simulert vannføring ved ulike målestasjoner. Generelt viser simulert vannføringen relativt dårlig tilpasning til datagrunnlaget i periodene. Det ser ut til at simulert volum er overestimert kraftig i begge periodene ved utløpet av modellen.

Tabell 25. Verifisering vannføring fra perioden 1/10 – 31/12 2000. Det mangler observerte data fra målestasjonene Grøndvold bru og Jaren ndf.

Delfelt	Obs Peak (m3/s)	Sim. Peak (m3/s)	Nash-Sutcliffe	SimPeak/ObsPeak (%)	SimVol/ObsVol (%)
12.70 Etna	133	122	0,59	92	48
12.8 Grøndvold bru	-	76	-	-	-
12.200 Kolbjørnhus	407	347	0,63	85	49
12.286 Jaren ndf.	-	12	-	-	-
12.289 Kistefoss	262	512	-6,3	195	234

**Tabell 26. Verifisering vannføring fra perioden 1/10 – 31/12 2007. Det mangler observerte data fra målestasjonen Jaren ndf.**

Delfelt	Obs Peak (m <sup>3</sup> /s)	Sim. Peak (m <sup>3</sup> /s)	Nash-Sutcliffe	SimPeak/ObsPeak (%)	SimVol/ObsVol (%)
12.70 Etna	67	88	0,25	131	127
12.8 Grøndvold bru	61	34	0,57	55	71
12.200 Kolbjørnhus	257	206	0,67	80	109
12.286 Jaren ndf.	-	8	-	-	-
12.289 Kistefoss	195	459	-20	235	351

I Tabell 27 og Tabell 28 er det vist tilpasningen av simulert vannstand i magasinene Dokkfløyvatn og Randsfjorden. Det er god tilpasning for Dokkfløyvatn under flommen høsten 2000, mens i Randsfjorden blir flomtappen kraftig overestimert pga. for stort tilsigsvolum. Under sommerflommen i 2007 er det relativt dårlig tilpasning for begge magasinene med kraftig overestimert flomvannstand i begge magasinene.

For Etna er det i tillegg simulert vannføring for hele perioden 1958 – 2019. Dette ga en NS verdi på 0,63 noe som er ok sett i lys av den korte kalibreringsperioden.

Det er uklart hvorfor det er så dårlig tilpasning av modellen for verifiseringsperiodene, og dette bør undersøkes nærmere. For flommen i 2013 er derimot tilpasningen god. Vi tror derfor det er ok å bruke 2013 flommen som utgangspunktet for videre simuleringer. Analyseresultatene vil også være basert på sammenligninger av relative resultater, det antas derfor at tilsiget dermed får mindre grad av betydning.

**Tabell 27 Verifisering vannstand i magasiner for flomhendelsen (2000).**

Delfelt	Obs Peak (m)	Sim. Peak (m)	Nash-Sutcliffe
Dokkfløyvatn	735,60	735,62	0,70
Randsfjorden	135,21	136,8	-14

**Tabell 28 Verifisering vannstand i magasiner for flomhendelsen (2007).**

Delfelt	Obs Peak (m)	Sim. Peak (m)	Nash-Sutcliffe
Dokkfløyvatn	734,66	735,48	0,28
Randsfjorden	134,80	136,40	-15



# 4 Resultater

## 4.1 Variasjon av startvannstander i magasin

Det er utført simuleringer med vassdragsmodellene der startvannstanden i magasinene (også definert som aktuell reguleringsgrad) er blitt variert. Startvannstanden i magasinene er bestemt ut fra fyllingsgrad. Fyllingsgraden er variert fra 100 % (HRV) til 95, 90, 75, 50, 25 og 0 % (LRV) fyllingsgrad. Aktuell reguleringsgrad for hvert enkelt magasin er så beregnet. For definisjon av fyllingsgrad, reguleringsgrad og aktuell reguleringsgrad, se beskrivelse i kapittel 1.2.

### 4.1.1 Målselvvassdraget

I Målselvvassdraget er det to magasiner i Bardugrenen. Altevatn, det øverste og største magasinet, med en reguleringsgrad på 93 % og Innsetvatn, det nederste magasinet, med en total reguleringsgrad på 79 %. Regner man bare med lokalfeltet blir reguleringsgraden 2 % for Innsetvatn. I Målselvgrenen er det et magasin, Devdisvatn, som har en reguleringsgrad på 85 %. Reguleringsgrad sammen med noen andre magasinifakta er presentert i Tabell 29.

Tabell 29. Data for magasinene som inngår i vassdragsmodellen for Målselvvassdraget.

Magasin	Mag. vol. (M m <sup>3</sup> )	HRV (moh)	LRV (moh)	Reg. høyde (m)	Reg. grad (%)
Altevatn	1027	489,0	472,8	16,2	93
Innsetvatn lok.	3,9	301,0	298,0	3,0	2
Innsetvatn tot.	1027 + 3,9	-	-	-	79
Devdisvatn	135,7	413,5	380,5	33,0	85

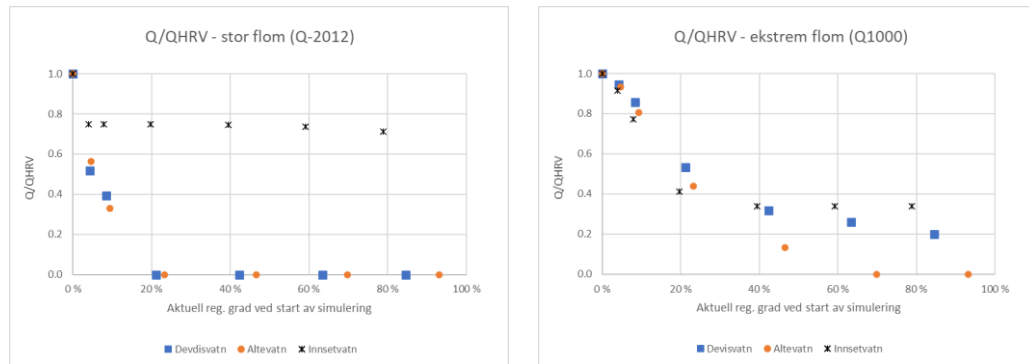
Det er simulert for to ulike flomsituasjoner: «ekstrem flom» og «stor flom». «Stor flom» er altså den mindre flommen i avsnittene under.

For «ekstrem flom» brukes et nedbørførløp med 1000 års gjentaksintervall. Ekstremnedbør er utarbeidet av Metrologisk institutt (MET) og hentet fra siste godkjente flomberegningen for Altevatn (Gröndal og Berg, 2016) og Devdisvatn (Weltzien, 2016b). Det er valgt å bruke de samme verdiene ( $P_{1000}$ ) som er i rapportene, dvs. hhv. sommer og år. Nedbørverdiene for Devdisvatn er brukt for alle delfelt som ligger i Målselvgrenen og verdiene for Altevatn er brukt for alle delfelt i Bardugrenen. Dette er ikke helt konsistent da hverken arealreduksjonsfaktorene eller nedbørverdiene (uten arealreduksjonsfaktor) for Devdisvatn og Altevatn er helt representative for de andre delfeltene. Målsetningen for denne oppgaven er å se på effekten av ulike initialtilstander, og ikke å beregne dimensjonerende flom. Det er derfor vurdert som at denne tilnærmingen er god nok for dette formålet.

For «stor flom» er *Vanntilførsel* (RoS) fra seNorge for flomepisoden i juli 2012 benyttet som datagrunnlag. I NVE rapport 24-2013, «Flom og skred i Troms juli 2012» (Devoli mfl., 2013), ble gjentaksintervallet for kulminasjonsvannføringene ved målestasjonene i

vassdraget estimert til ca. 80-år for Måselvfossen og mer enn 100-år ved de fleste andre stasjonene. Unntaket er Lille Rostavatn der gjentaksintervallet ble oppgitt til ca. 2 år. Det er ikke gjort noen vurdering av hvilket gjentaksintervall som seNorge dataene fra 2012 representerer.

Resultatene fra simuleringene, med ulike startvannstander i magasinene (aktuell reguleringsgrad), er sammenfattet i Figur 45 og Figur 46.

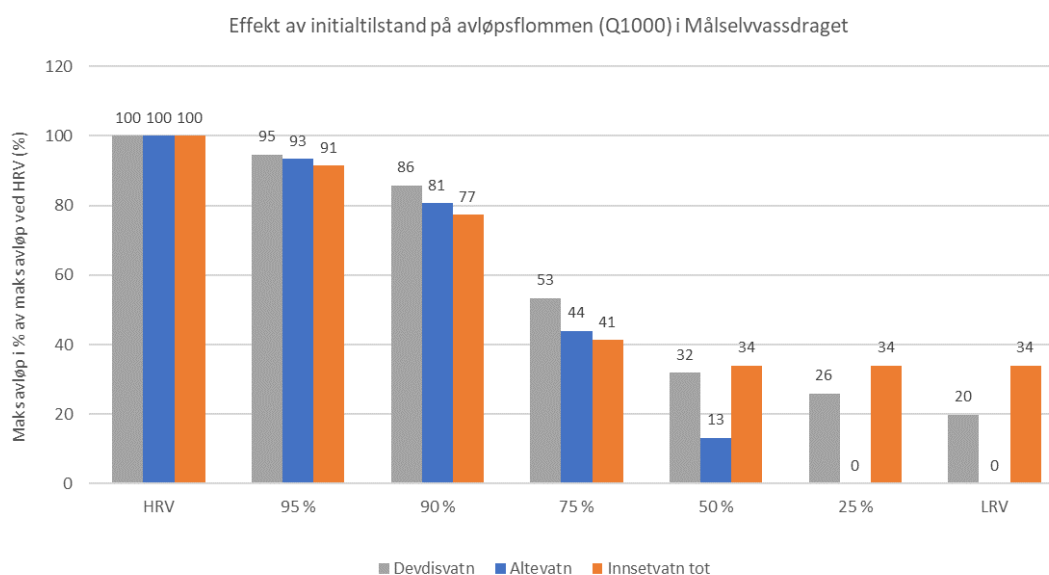
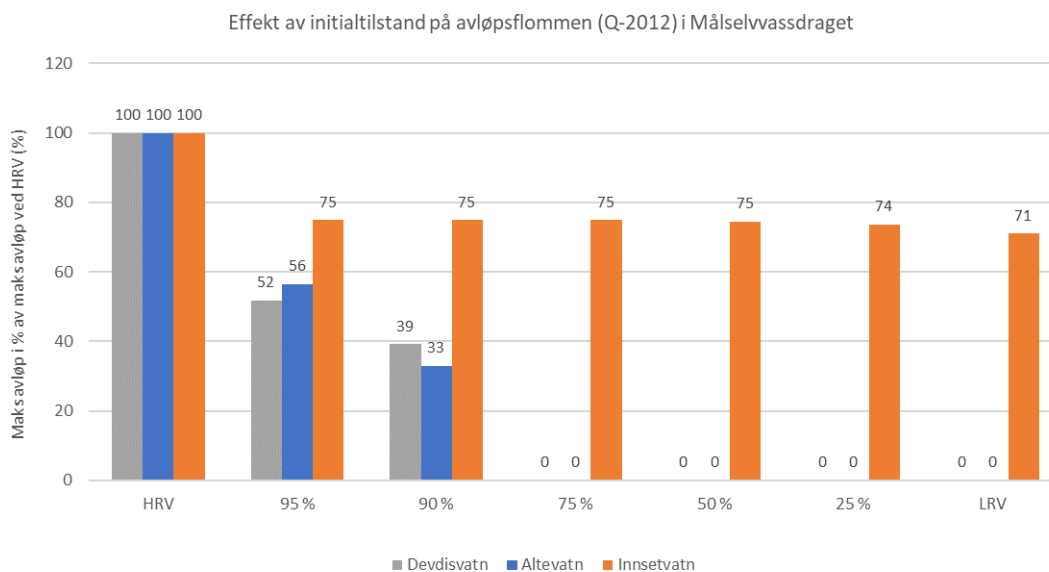


**Figur 45** Figuren viser aktuell reguleringsgrad ved start av simulering (x-aksen) mot forholdstallet av maksimal avløpsflom og maksimal avløpsflom ved startvannstand i magasin på HRV (y-aksen) for de tre magasinene i Måselvmodellen. Med startvannstand i magasinene på HRV er aktuell reguleringsgrad 0%, ved startvannstand i magasinene på LRV er aktuell reguleringsgrad lik total reguleringsgrad i hvert enkelt magasin (Innsetvatn 79 %, Devdisvatn 85 % og Altevatn 93 %).

Figur 45 viser aktuell reguleringsgrad på x-aksen, mens y-aksen viser maksimal avløpsflom (Q) i % av maksimalt avløp ved startvannstand i magasinet på HRV.

Figur 46 viser fyllingsgrad ved start simulering på x-aksen), mens y-aksen viser maksimal avløpsflom (Q) i % av maksimalt avløp ved startvannstand i magasinet på HRV. Ved HRV er det 100 % fyllingsgrad og ved LRV er det 0 % fyllingsgrad.

Grafene viser at den relative reduksjonen i avløpsflommene, med økende aktuell reguleringsgrad, er størst for mindre flommer («stor flom»), med unntak for Innsetvatn. Den totale flomdempingen i Innsetvatn styres av to faktorer: dempingen i eget magasin, som er liten, og dempingen i oppstrøms magasin (Altevatn), som er mye større. Dempningen i oppstrøms magasin er styrende ved høye fyllingsgrader og/eller større flommer, som fører til overløp fra Altevatn. I en slik situasjon følger dempingen i Innsetvatn i stort sett dempingen i Altevatn. Dette illustreres godt i Figur 45 til høyre (ekstrem flom), der dempingen i Altevatn og Innsetvatn i følger hverandre ned til aktuell reguleringsgrad 20 %. Ved aktuell reguleringsgrad 40 % dempes flommen i Altevatn mer enn i Innsetvatn. Med stor tilgjengelig magasinering i Altevatn blir overløpet forholdsvis lite og ikke lenger dominerende. Dempningen i eget magasin er styrende ved lave fyllingsgrader og/eller mindre flommer da Altevatn holder igjen alt tilsig. I slike situasjoner er lokaltilsiget og den egne dempingen i Innsetvatn dominerende. I så små magasin dempes store flommer i liten grad og avløpet blir da likt som tilsiget, med andre ord ingen demping, se Figur 45 og Figur 46



**Figur 46 Flomdempingseffekt på avløpsflommen som følge av varierende initialtilstand (fyllingsgrad, på x-aksen) for de tre magasinene i Målselvassdraget**

Videre ser vi at i de store magasinene (Altevattn og Devdisvatn) magasineres hele flomforløpet når magasinet er tappet langt ned. Denne effekten forsvinner ved ekstreme flommer med stort volum og langt forløp. For Innsetvatn, som har liten reguleringsgrad i lokalfeltet, dempes flommene kun i liten grad. Dette vises spesielt tydelig ved simuleringen av den mindre flommen (2012-flommen). Ved økende reguleringsgrad blir til slutt hele tilsiget holdt igjen i oppstrøms magasin, mens vi ser at avløpsflommen fra lokalfeltet reduseres med bare noen få prosent.

Ved initialtilstand i magasinene på fyllingsgrad 90%, dempes avløpsflommen med omkring 15 – 25 % ved «ekstrem flom», mens ved mindre flommer («stor flom») varierer dempingen i magasinene fra 25 % (Innsetvatn) til nesten 70% (Altevattn).

#### 4.1.2 Tinnvassdraget

I Tinnvassdraget er det fire store magasiner Mårvatn, Kalhovd-Gøyst, Møsvatn og Tinnsjø. Tre av de er reguleringsmagasiner i fjellet, mens Tinnsjø, som er nederste magasin i vassdragsmodellen i denne studien, ligger ca. 190 moh. Fra Tabell 30 kan en lese at magasinene Mårvatn og Kalhovd-Gøyst-Strengen har reguleringsgrader på over 100%. Dette vil si at magasinvolumene er større enn det gjennomsnittlige årstilsiget. Møsvatn og Tinnsjø har reguleringsgrader på respektive 62 % og 53 %. Simuleringene ble utført med alle fire flomlukene åpne ut av Tinnsjø.

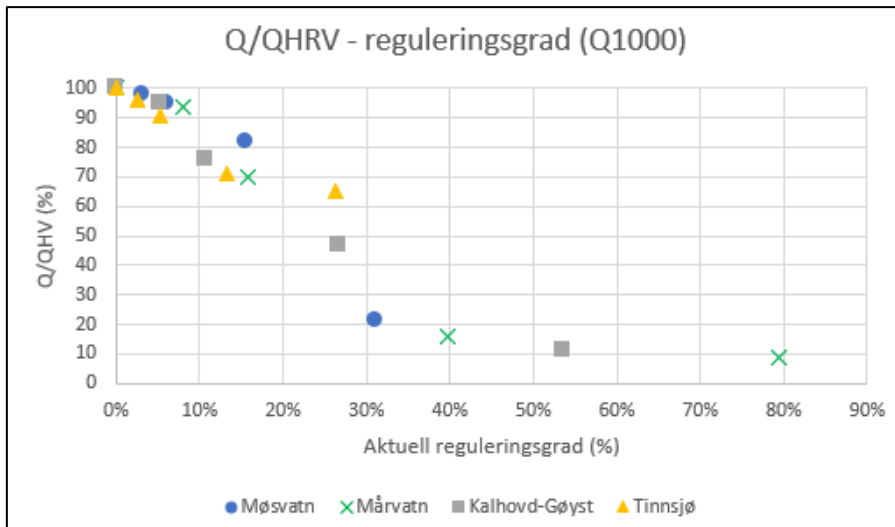
Tabell 30. Data for magasinene som inngår i vassdragsmodellen for Tinnsjøvassdraget.

Magasin	Areal lok. (km <sup>2</sup> )	Mag vol. (mill m <sup>3</sup> )	Hmax (moh)	Hmin (moh)	LRV (moh)	HRV (moh)	Reg. grad vol. (%)
Mårvatn	273	321	1471	1120	1100	1121,28	159
Kalhovd-Gøyst-Strengen	388	257	1563	1086	1075	1086,6	124
Møsvatn	1508	1064	1628	916	900	918,5	62
Tinnsjø	1676*	204	1865	191	187,62	191,62	53

\* Arealet for lokalfeltet til Tinnsjø inkluderer her restfeltet mellom utløpet av Tinnsjø og til Kirkevoll bru som en modellteknisk forenkling

Det ble kjørt simuleringer av en ekstremflom gjennom vassdragsmodellen med initialtilstander satt til 50 %, 75 %, 90 %, 95 % fyllingsgrad, samt HRV. Ekstremflommen som ble kjørt gjennom modellen er en ren oppskalering av tilsigsserien for totalfeltet til Tinnsjø i 1927 (1.24\*1927-flommen). Dette anses å være et svært grovt og konservativt estimat av 1000-årsflommen, og skal ikke sees opp mot beregnede dimensjonerende verdier for vassdraget hvor det gjøres langt mer grundige vurderinger.

Resultatene fra simuleringene, med ulike startvannstander i magasinene (aktuell reguleringsgrad), er sammenfattet i Figur 47. Grovt sett viser Figur 47 at det for de 4 magasinene er en reduksjon i flomtoppen på 10% per 5% økning i aktuell reguleringsgrad inntil 20%. En kan også se at for de fire simuleringene hvor aktuell reguleringsgrad er på over 30% blir avløpsflommene redusert til ca 10-20 % av flomtoppene simulert med HRV som startvannstand.



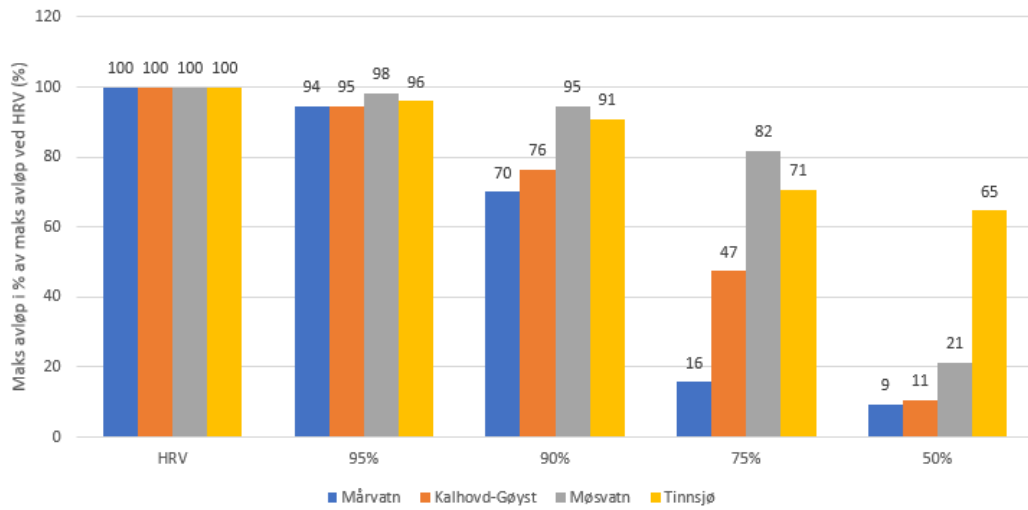
Figur 47. Figuren viser aktuell reguleringsgrad ved start av simulering (x-aksen) mot forholdstallet av maksimal avløpsflom og maksimal avløpsflom ved startvannstand i magasin på HRV (y-aksen) for de fire magasinene i vassdragsmodellen for Tinnvassdraget. Flommen som er kjørt gjennom vassdragsmodellen er 1927-flommen oppskalert med en faktor 1,24.

Figur 48 viser flomdempningseffekt på avløpsflommen i magasinene når initialtilstanden endres fra HRV til henholdsvis 95 %, 90 %, 75 % og 50 % fyllingsgrad ved simuleringstart. Ikke uventet, er det stor forskjell i hvor mye flomtappen reduseres i de fire magasinene når initialtilstanden endres. Allerede ved 90 % fyllingsgrad i magasinene ved simuleringstart er flomtappene ut av Mårvatn og Kalhovd-Gøyst redusert til 70-76 %. Med 50 % magasinvolum tilgjengelig ved simuleringstart er avløpsflommene fra høyfjellsmagasinene Mårvatn, Kalhovd-Gøyst og Møsvatn redusert til 10 – 20 %.

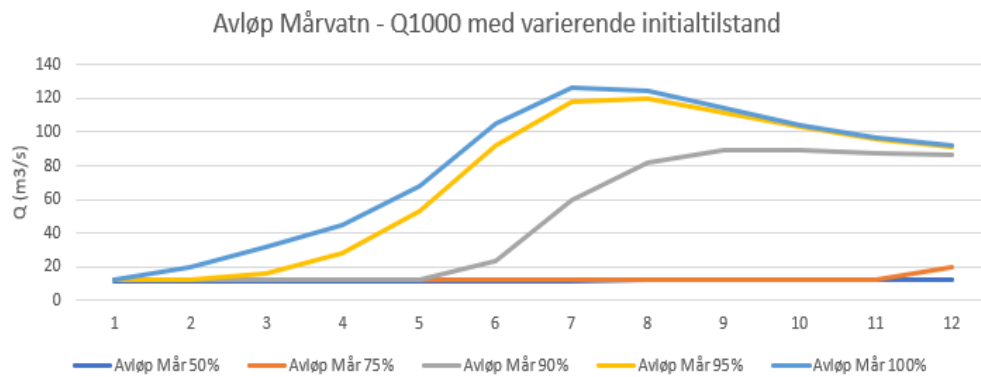
Dette er illustrert i Figur 49 som viser avløpsflommen fra Mårvatn i de forskjellige simuleringene. Når initialtilstanden settes til 50 % og 75 % fyllingsgrad er magasinkapasiteten i Mårvatn så stor at hele flommen holdes igjen i magasinet utover at Stegaros kraftverk kjøres gjennom simuleringen.

Tinnsjø som har et stort uregulert lokalfelt (ca 40 % av totalfeltet) er flomdempningen vesentlig mindre, men fortsatt betydelig og avløpsflommen reduseres til 71 % og 65 % med henholdsvis 75 % og 50 % fyllingsgrad som initialtilstand. Figur 50 viser at avløpsflommen fra Tinnsjø reduseres fra ca. 1500 m<sup>3</sup>/s med HRV som initialtilstand i simuleringen til ca. 1000 m<sup>3</sup>/s om en setter startvannstand tilsvarende 50 % fyllingsgrad i magasinene. Dette tilsvarer en vannstandsforskjell i Tinnsjø på ca 1,9 m mellom Q1000 med HRV som initialvannstand og Q1000 med initialtilstand satt til tilsvarende 50 % fyllingsgrad i alle magasinene.

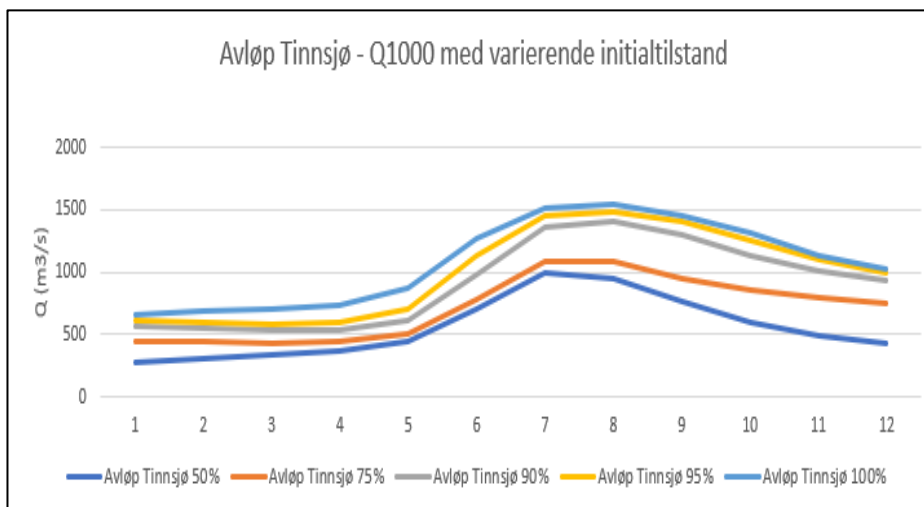
Effekt av initialtilstand på avløpsflommen (Q1000) i Tinnvassdraget



Figur 48. Flomdempingseffekt på avløpsflommen som følge av varierende initialtilstand for de fire magasinene i Tinnvassdraget.



Figur 49. Simulert avløpsflom (ca. Q1000) fra Mårvatn ved varierende initialtilstand i magasinene



Figur 50. Simulert avløpsflom (ca. Q1000) fra Tinnsjø ved varierende initialtilstand i magasinene.

### 4.1.3 Tovdalsvassdraget

De seks magasinene i Tovdalsvassdraget kan deles i to grupper med hensyn til reguleringsgrad. Magasinene Hanefoss, Kolstraumen og Ljosevatn har en relativt liten reguleringsgrad (10 – 15 %), mens magasinene Vikstølsvatn, Høvringen og Eptevatn har vesentlig større reguleringsgrad (ca. 30 – 50 %).

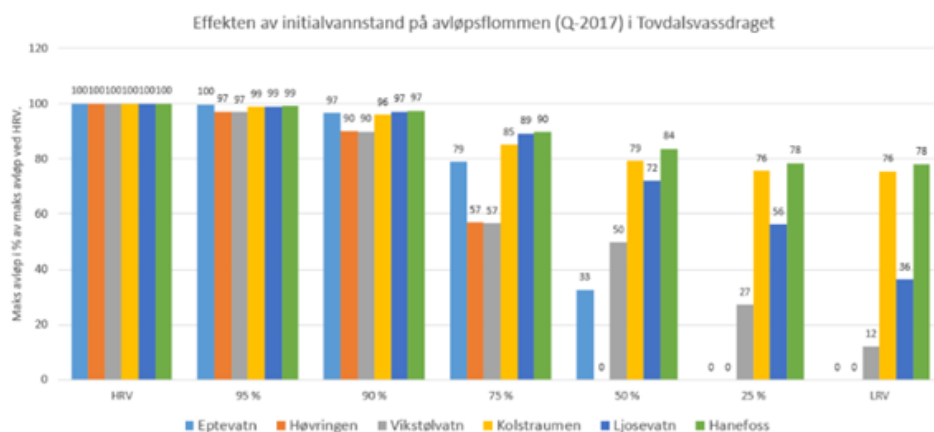
Resultatene fra simuleringer med ulike initialvannstander i magasinene i Tovdalsvassdraget er sammenfattet i Figur 51 og Figur 52. I denne sammenheng betegnes 2007-flommen som en «stor flom», og 1,5 x 2017-flommen som en «ekstrem flom».

For de tre magasinene med størst reguleringsgrad viser Figur 51 at ved «stor flom» (2017), reduseres avløpsflommene til ca. 60 – 80 % med en startvannstand i magasinene som tilsvarer 75 % fylling sammenlignet med det avløpet en får med fulle magasiner (HRV). Med tilsvarende initialvannstander og «ekstrem flom» (1,5 x 2017) reduseres avløpsflommene til ca. 80 – 95 %. Flomdempningseffekten av ledig magasin kapasitet ved flommens start blir altså noe mindre med økende flomstørrelser.

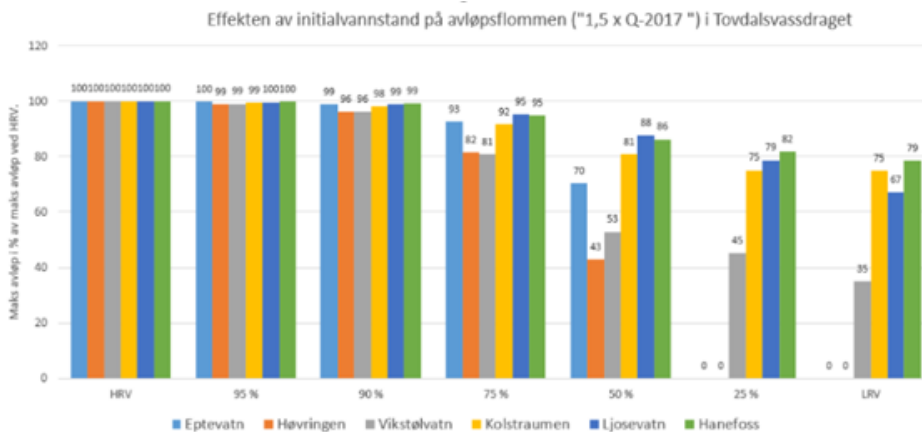
For magasinene med mindre reguleringsgrad, er bildet det samme. Her reduseres avløpsflommen til 85 – 90 % ved «stor flom» og 90 – 95 % ved «ekstrem flom» når beregningene startes med magasinifylling på 75 % kontra HRV.

Videre viser disse beregningene at flomdempningseffekten naturlig nok er større for magasiner med høy kontra lav reguleringsgrad gitt samme relative nedtapping i forkant av flommen.

Beregningene viser og at for Eptevatn og Høvringen vil en magasinifylling på 25 % ved flommens start medføre at hele tilsiget kan lagres også ved «ekstrem flom». I praksis er ikke dette et realistisk scenario, da magasinifyllingen som regel er langt større på høsten da de største flommene i dette området vanligvis forekommer.



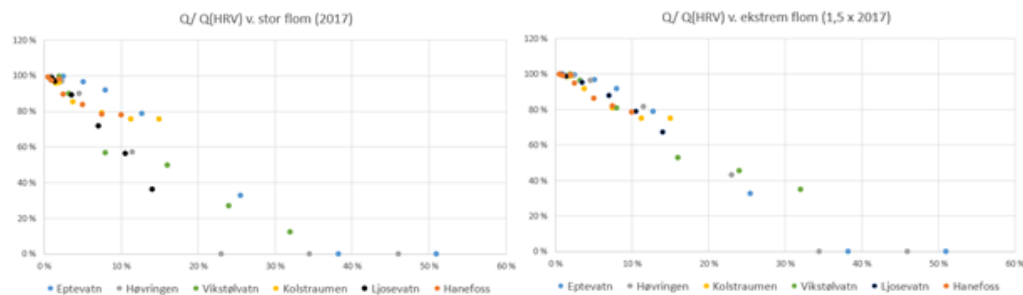
Figur 51. Flomdempningseffekt på avløpsflommen som følge av varierende initialtilstand for de seks magasinene i Tovdalsvassdraget. Viser beregninger basert på simulering av 2017-flommen (ca. 200-årsflom).



**Figur 52. Flomdempingseffekt på avløpsflommen som følge av varierende initialtilstand for de seks magasinene i Tovdalsvassdraget. Viser beregninger basert på en oppskalering av 2017-flommen med 1,5 (ca. 1000-årsflom)**

I Figur 53 er dette illustrert ved å plote aktuell reguleringsgrad på x-aksen. For eksempel viser figuren at med en aktuell reguleringsgrad på 5 - 10 %, reduseres avløpsflommene til ca. 55 - 97 % ved «stor flom» og 80 - 97 % ved «ekstrem flom». Ved ekstrem flom reduseres grovt sett avløpsflommene med omkring 10 % pr 5 % økt reguleringsgrad inntil ca. 30 %.

For magasinet som ligger lengst ned i vassdraget, Hanefoss er reguleringsgraden 10 % når alle magasiner er på LRV. For dette magasinet reduseres avløpsflommen til ca. 80 %, ved både «stor» og «ekstrem flom», når alle magasin er tomme ved flommens start. En magasinifylling på 75 - 95 % er sannsynligvis et mer realistisk startscenario ved en høstflom. Da viser disse beregningene at for Hanefoss vil flommen reduseres med 0 - 5 % eller til 95 - 100 % av beregnet avløpsflom med fulle startmagasin. Det vil si ingen eller en relativt marginal flomdemping.



**Figur 53. Figuren viser aktuell reguleringsgrad ved start av simulering (x-aksen) mot forholdstallet av maksimal avløpsflom og maksimal avløpsflom ved startvannstand i magasin på HRV (y-aksen). Figuren til venstre viser simuleringer med beregnet flomforløp fra 2017 for Tovdalsvassdraget («stor flom», ca. 200-årsflom) og figuren til høyre en skalering av 2017-flommen med 1,5 («ekstrem flom», ca. 1000-årsflom).**



#### 4.1.4 Randsfjorden

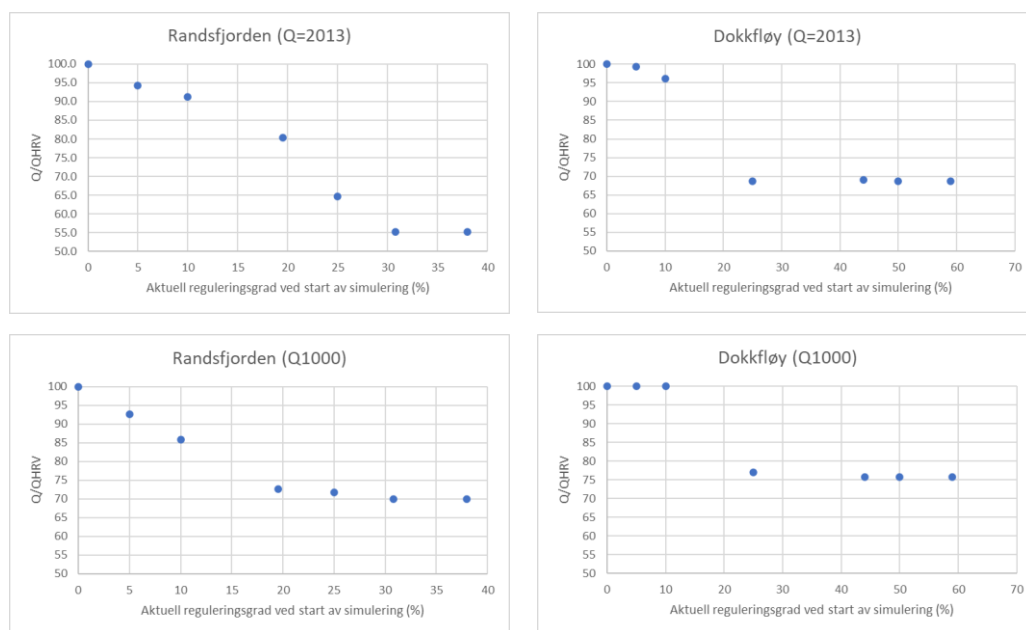
I nedbørfeltet til Randsfjorden er det totalt 7 magasiner, der to av dem har et betydelig reguleringsvolum. I modellen er det simulert for to magasiner; Dokkfløyvatn og Randsfjorden. De resterende magasinene er antatt å starte på HRV – 0,5 m og går til overløp når de når HRV.

Det er simulert to hendelser, 2013 flommen og estimert 1000-årsflom (1,45 x 2013). Det er også forsøkt å kjøre med to forskjellige startdatoer for simuleringen. Jo tidligere man starter, dess større fyllingsgrad er det i magasinene ved kulminasjonene av tilløpsflommen. En med start 1. mai – 31. juli og 15. mai – 31. juli. Flomtoppen (tilsig) er antatt å kulminere i perioden 22. – 23. mai.

I Dokkfløyvatn er overløpet bredt og kapasiteten øker raskt over HRV. Dvs. at når vannstanden når HRV er det videre relativt liten dempning i avløpsflommene. Allikevel vil redusert volum over hele flomforløpet ha betydning for Randsfjorden, der fyllingen av Randsfjorden går saktere.

Lokalfeltene til hhv. Dokkfløy og Randsfjorden har en reguleringsgrad på 59,0 % og 31,2 %. Inkluderer man alle magasinene, blir total reguleringsgrad for vassdraget på 38,5 %. Reguleringsgrad sammen med noen andre magasin fakta er presentert i Tabell 22.

Simulerte endringer i flommer som følge av ulike startvannstander i magasinene (aktuell reguleringsgrad), er sammenfattet i Figur 54.



Figur 54. Figuren viser største simulerte avløpsflom ved ulike aktuelle reguleringsgrader i forhold til simulert avløpsflom ved start HRV for magasinene Randsfjorden og Dokkfløyvatn.

Figur 54 har aktuell reguleringsgrad på x-aksen, mens y-aksen viser maksimal avløpsflom (Q) i % av maksimalt avløp ved startvannstand i magasinet på HRV. Flomforløpet er simulert ut fra vær-situasjonen i 2013 (øverst) og en tilnærmet 1000-års hendelse (1,45 x 2013) nederst. Grafen viser at avløpsflommene generelt reduseres med rundt 10 % pr 10 % økning av reguleringsgraden.

Dokkfløyvatn har høy reguleringsgrad, og hele eller store deler av flomforløpet kan tas opp i magasinet om fyllingsgraden i utgangspunktet er liten. Dammen har derimot et bred overløp om vannstanden overstiger HRV. Kapasitetskurven er i simuleringene satt til å være null under HRV, og øker raskt med økende vannstand over HRV. Videre flomdemping utover HRV er dermed liten. Vi ser derfor at om magasin vannstanden overstiger HRV før kulminasjonstidspunktet av tilløpsflommen, så dempes avløpsflommene lite. I simuleringene er det benyttet et flomforløp på 2,5 måneder, og magasinet blir fylt opp selv om initialvannstanden er ved LRV. Ved økende ledig kapasitet i magasinet, konvergerer største avløpsflommen mot flomtopp i slutten av perioden. I dette magasinet ser vi dermed tydelige «terskeeffekter» avhengig av når magasinet når HRV.

I Randsfjorden ser vi en jevnere resesjon på kurvene i Figur 54. Kapasitetskurven i Randsfjorden har også en vesentlig kapasitet i vannstander under HRV (i motsetning til Dokkfløy). Generelt ser det ut til at Randsfjorden kan dempe flomtoppen mer sammenlignet med Dokkfløyvatn (forutsatt at denne går til overløp). Men i simuleringene her ser det også ut til at dempningen konverterer mot et nedre terskelnivå.

Sammenligner vi de øverste grafene (stor flom) med nederste grafene (ekstremflom) er den relative dempningen i vassdraget med økende magasinkapasitet større for den lille flommen. Dette er for så vidt i tråd med antakelser som tidligere er gjort i flomberegninger i regulerte vassdrag utført av NVE. Samtidig ser det ut til at ved tider der det er stor ledig kapasitet i magasinene, kan en fortsatt se at vassdragsreguleringene har en dempende effekt selv på ekstremflommer.

## 4.2 Variasjon av nedbør i tid og rom

Ved bruk av nedbør- avløpsmodeller i flomberegninger er det en vanlig tilnærming å kombinere dimensjonerende nedbørverdier over alle varigheter til et forløp med en tilnærmet symmetrisk fordeling rundt maksimal nedbør. I Retningslinjer for flomberegninger (Midttømme mfl., 2011) anbefales følgende: ved langt forløp, ca. to døgn eller mer, anbefales det å fordele nedbøren slik at maksimal nedbør kommer etter ca. en tredel inn i forløpet. For kortere varigheter anbefales maksimal nedbør sentrert i midten av forløpet. Snøsmeltingen fordeles vanligvis jevnt under hele nedbørforløpet og regnes som et tillegg til nedbøren. Et slikt forløp er ikke realistisk og opptrer sjelden i naturen. Det vil også ofte være en konservativ antakelse.

I rapporten «Flood evaluation, hazard determination and risk management», (ICOLD, 2019), er det sett på hvordan ulike nedbørfordelinger i tid og rom påvirker flomhydrogrammet. Det ble laget tre forenklete scenarier. Hvert scenario inneholdt tre ulike flomhendelser. I de to første scenariene var volumet likt, men fordelingen av nedbøren ble variert på ulike måter. I det siste scenariet ble volumet variert med +/- 20%, men fordelt jevnt i forløpene. Resultatene fra denne analysen viste at så lenge det totale nedbørvolumet var likt så ble variasjonen i de responderende flomhydrogrammene forholdsvis like, innenfor +/- 5% på kulminasjonsverdien. Variasjon i totalt nedbørvolum ga større utslag, +/- 12%.

Vi ønsket å undersøke noe av de samme utfordringene, men har valgt en annerledes tilnærming. I kapittel 4.2.1 ser vi på utslaget i flomstørrelsene for Målselvvassdraget når nedbørtoppen i en 1000-års nedbørhendelse plasseres ulikt i forløpet, mens volumet

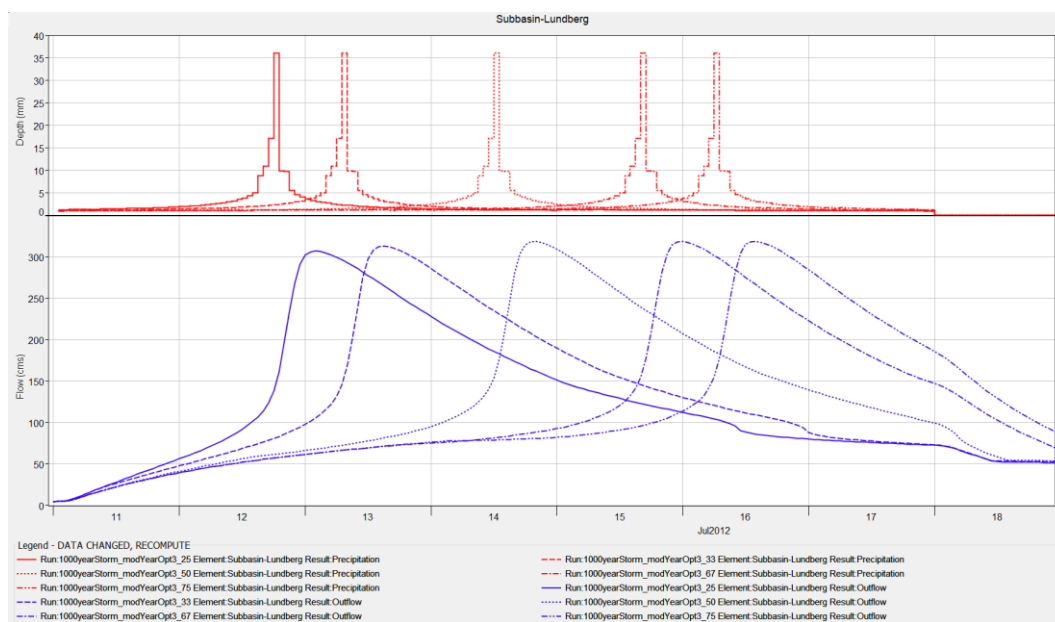
holdes likt. I kapittel 4.2.2 tar vi utgangspunkt i vanntilførsel (RoS) data fra seNorge, dvs. en kombinasjon av regn og snøsmelting, og ser på hvilken effekt ulik fordeling i tid og rom har på flomstørrelsene. Dataene fra seNorge brukes altså for å beregne et sett med dimensjonerende hendelser som deretter brukes inn i vassdragsmodellene for Målselvassdraget og Tinnvassdraget for å beregne tilhørende avløpsflommer.

#### 4.2.1 Plassering av nedbørtoppen i forløpet

For å se på følsomheten til flommene i forhold til plassering av den mest intense nedbøren, har vi valgt å variere nedbørtoppen til fem ulike tidspunkter i forløpet. Nedbørtoppen ble plassert en fjerde- og en tredjedel inn i forløpet, i midten av forløpet og to tredje- og tre fjerdedeler inn i forløpet (25-, 33-, 50-, 67- og 75-% inn i forløpet), se øverste grafen i Figur 55.

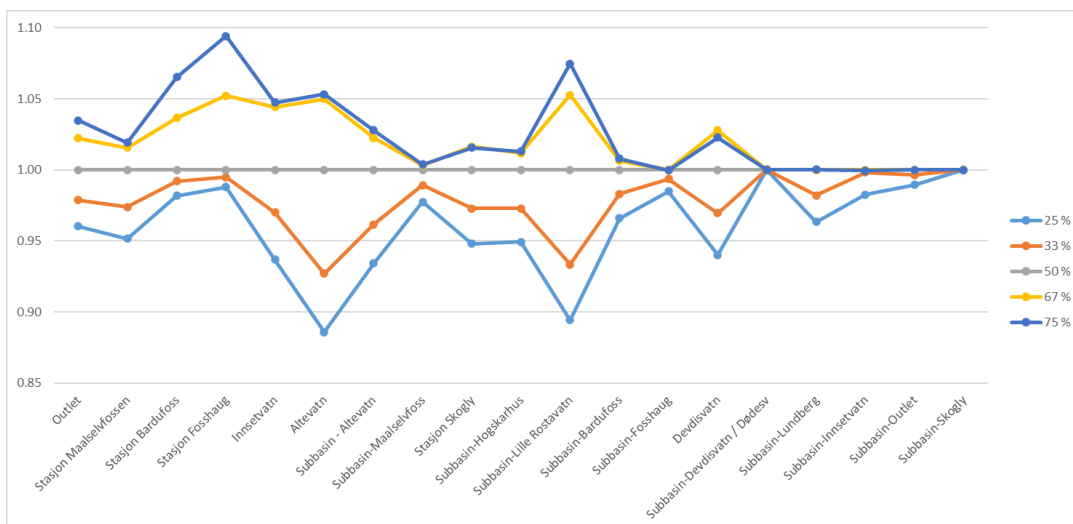
Det er tatt utgangspunkt i 1000-års nedbøren for Altevatn (beskrevet i kap. 4.1.1) for alle delfeltene i modellen. Alle magasinene ble satt til HRV i starten av simuleringene. Nedbørforløpet går over 7 døgn og simuleringsforløpet er satt til tre uker.

I Figur 55 vises resulterende flomforløp med de fem ulike nedbørfordelingene for delfelt Lundberg, som er et uregulert og relativt lite raskt felt. Kulminasjonsverdien varierer lite for Lundberg, kun 4 %, mens flomverdien for Lille Rostavatn varierer mye mer, 20 %, (se Figur 56).



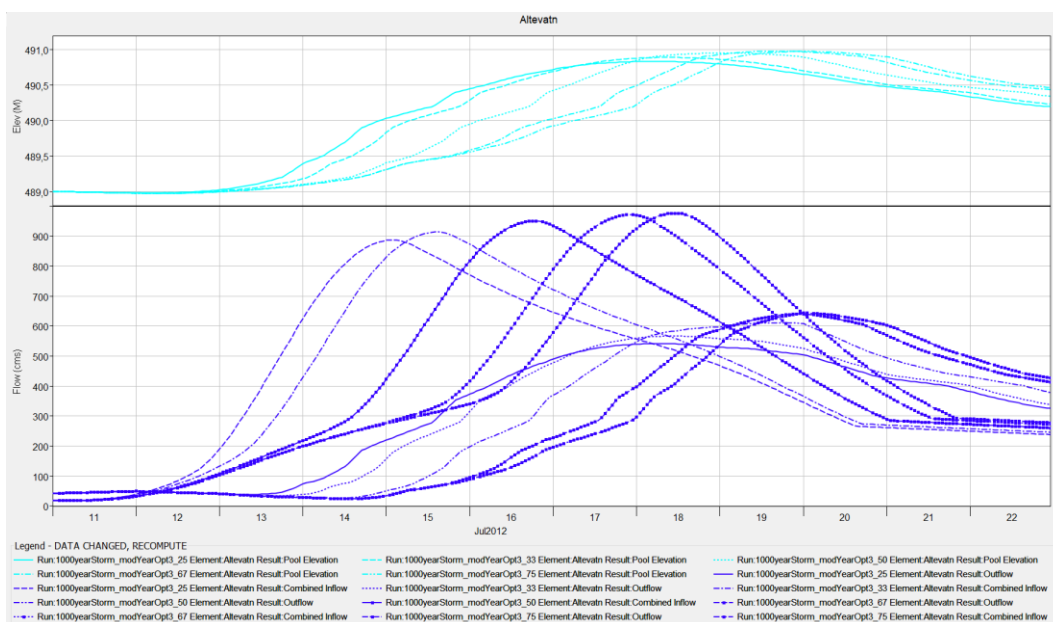
**Figur 55 De fem ulike nedbørforløpene, der nedbørtoppen er fordelt på fem ulike tidspunkter, er vist i den øverste grafen. Resultierende flomforløp i et uregulert og relativt lite delfelt (stasjon 196.12 Lundberg) er vist i den nederste grafen.**

I Figur 56 vises de simulerte maksimale flomverdiene med de ulike nedbørforløpene, i forhold til maksimale flomverdier med sentrert nedbørforløp. Det er presentert flommer fra alle 11 delfelt i modellen, avløpsflommer fra de tre magasinene samt flomverdier ved vannføringsstasjonene. Punktene i vassdraget er sortert etter stigende feltstørrelse, fra høyre til venstre. Flomtoppene varierer på det meste med omkring +/- 10 % rundt sentrert nedbørforløp.



**Figur 56. Simuleringer med fem ulike nedbørførløp. Figuren viser størrelsen av kulminasjonsflommene relativt til flommen med sentrert nedbørførløp. Plasseringene i vassdraget er sortert langs x-aksen etter total feltstørrelse, størst til venstre og minst til høyre.**

Figur 57 viser hvordan tilløpsflom, avløpsflom og vannstand varierer i Altevatn med utgangspunkt i de fem ulike nedbørførløpene. Tilløpsflommene varierer med ca. 10 %, avløpsflommene med 20 % og vannstanden med 20 cm.



**Figur 57. Tilløpsflommer, avløpsflommer og vannstander i Altevatn simulert med de fem ulike nedbørførløpene der nedbørtoppen har ulik plassering i tid.**

Generelt ser vi at plasseringen av flomtøppen har mindre betydning med avtakende feltstørrelse. Andre forhold som stor magasineringskapasitet over HRV har også stor innvirkning. Dette vises tydelig både for Altevatn, som er et forholdsvis stort magasin og for Lille Rostavatn som har en stor uregulert innsjø nederst i delfeltet (Figur 56). Som ventet (se bla kapittel 1.1.1) ser vi også her at flommene øker noe når nedbørtoppen plasseres sent sammenlignet med tidlig i forløpet.

## 4.2.2 Analyser av tidsserier for regn- og snøsmelting

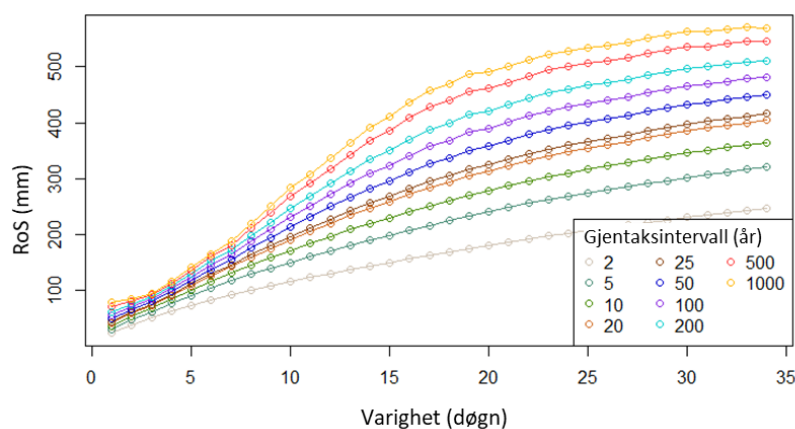
I analyser presentert i dette kapitlet er det benyttet tidsserier av vanntilførsel, dvs. regn- og snøsmelting (RoS) hentet fra seNorge. I kapittel 3.1 er metoder for generering av nedbørforløp i tid og rom beskrevet. I kapitlene 4.2.2.1 og 4.2.2.2 er generering av dimensjonerende RoS-hendelser og resultatene av simuleringene i vassdragsmodellene for hhv. Måselvassdraget og Tinnsjøvassdraget presentert. Til slutt er estimerte ekstremverdier fra seNorge-data sammenlignet med standard ekstremnedbøranalyser utført av Meteorologisk institutt (MET).

### 4.2.2.1 Vanntilførselhendelser for Måselvassdraget

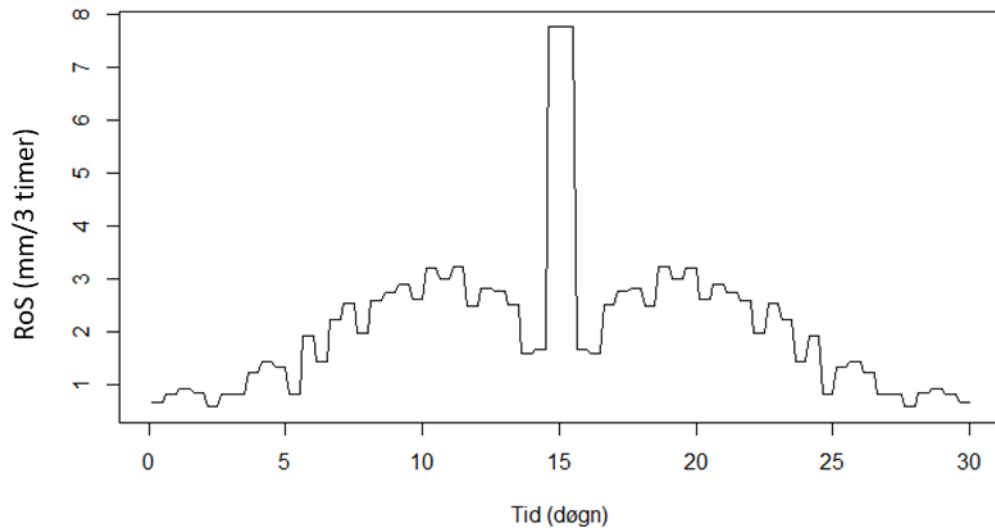
For Måselvassdraget ble RoS med tidsoppløsning døgn for elleve delfelt brukt. Første skritt i analysen var å beregne IVF-kurve for RoS for varigheter fra 1– 30 døgn, kurven er vist i Figur 58, og 200-års hendelsen for alle varigheter er vist i Tabell 31. For å beregne et forløp for RoS, ble 200-års hendelsen brukt. Det resulterende symmetriske forløpet er vist i Figur 59. Den midterste hendelsen har en varighet på 1 døgn. Deretter ble det lagt til RoS som symmetrisk dekker 12 timer på hver side slik at alle varigheter har et gjentaksintervall på 200 år. Denne empiriske tilnærmingen for å konstruere en sentrert og symmetrisk RoS-hendelse fører til den uregelmessige formen der intensiteten i forkant av de høyeste intensitetene ikke er strengt stigende og heller ikke intensitetene i etterkant.

Tabell 31. 200-års vanntilførsel (RoS) for varigheter (V) fra ett til 30 døgn

V (Døgn)	RoS (mm)	V (Døgn)	RoS (mm)	V (Døgn)	RoS (mm)	V (Døgn)	RoS (mm)	V (Døgn)	RoS (mm)
1	62	7	173	13	314	19	415	25	467
2	75	8	198	14	334	20	422	26	471
3	88	9	222	15	350	21	432	27	478
4	108	10	248	16	370	22	444	28	485
5	130	11	269	17	388	23	454	29	492
6	153	12	292	18	400	24	460	30	497



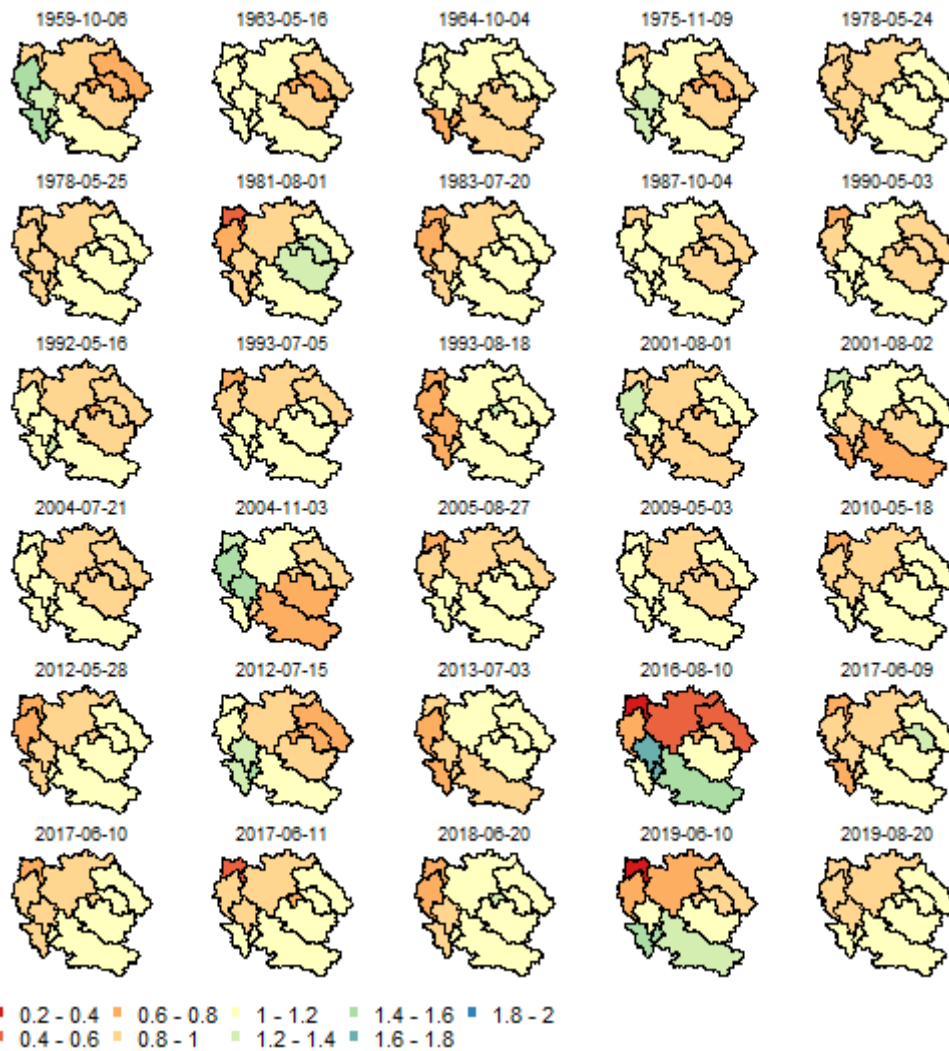
Figur 58. IVF-kurve for Måselvassdraget



Figur 59. 200-års RoS-hendelse for Måselvassdraget. Y-aksen viser RoS pr tre timer, og tidsoppløsningen er på 3 timer. Den midterste hendelsen har en varighet på 1 døgn. Deretter legges det til RoS som symmetrisk dekker 12 timer på hver side slik at alle varigheter har et gjentakintervall på 200 år. Denne empiriske tilnærmingen for å konstruere en sentrert og symmetrisk RoS-hendelse fører til den uregelmessige formen der intensiteten i forkant av de høyeste intensitetene ikke er strengt stigende og heller ikke intensitetene i etterkant.

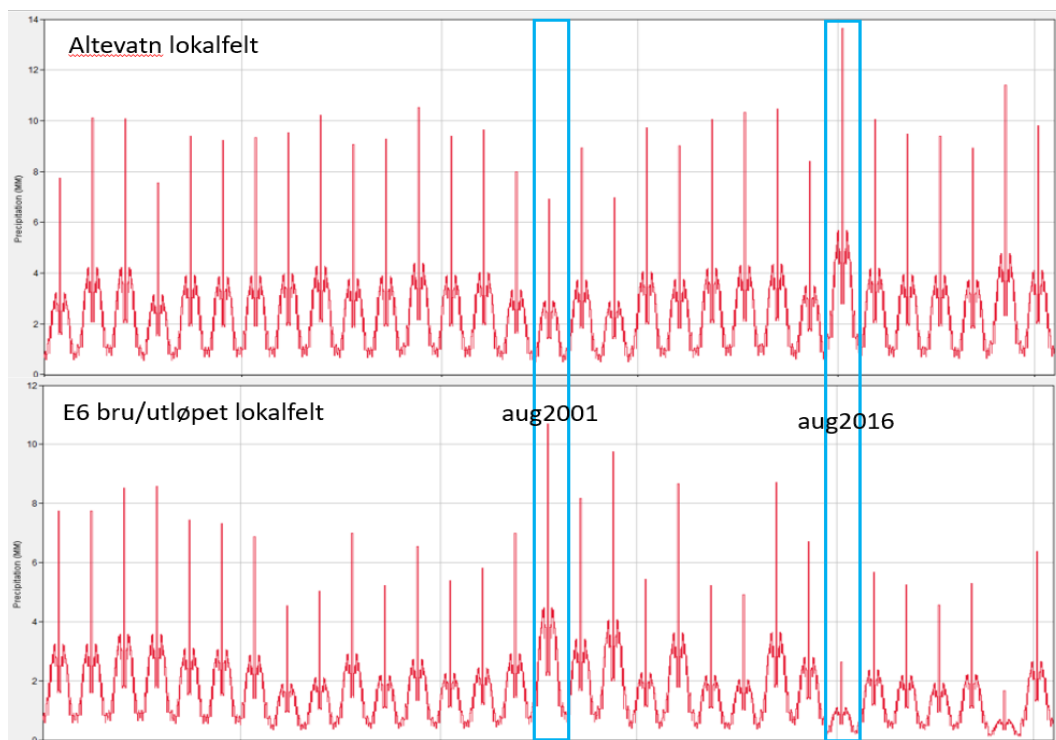
#### 4.2.2.1.1 Romlig fordeling av vanntilførsel (arealfordeling)

Som nevnt innledningsvis i dette kapittelet var det ønskelig å se på effekten av romlig fordeling av vanntilførsel (RoS) under ekstreme hendelser. I vassdrag med store reguleringsmagasiner høyt oppe i nedbørfeltet, som eksempelvis i Barduelv i Måselvassdraget, vil en med tilgjengelig magasin kapasitet kunne redusere tilsiget fra arealene oppstrøms magasinene betraktelig, og det vil ofte være det tilnærmet uregulerte lokaltilsiget som bestemmer hvor stor flommen blir nedover i vassdraget. Ved å anvende vassdragsmodellen for Måselvassdraget i kombinasjon med historiske fordelinger av RoS, er det mulig å undersøke hvor stor betydning ulik romlig fordeling av vanntilførsel har på flommene i vassdraget.



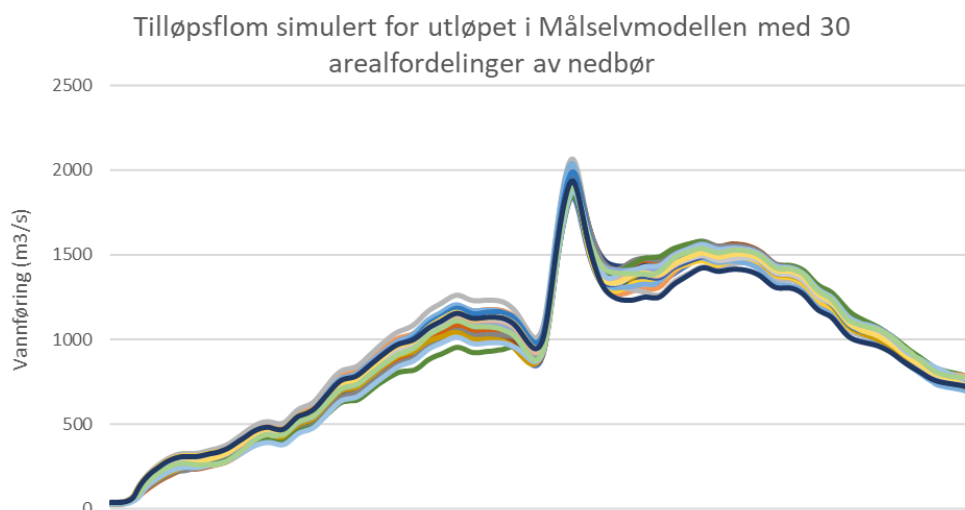
Figur 60. Fordeling av RoS for de 30 største hendelsene i Målselvvassdraget. Figuren viser forholdstallet mellom RoS for delfelt og RoS for hele vassdraget. Dato for hver hendelse står over kartet.

For å beregne romlig fordeling av RoS, brukte vi de største 30 1-døgn hendelsene fra perioden 1958-2020 fra seNorge. Vi brukte 1-døgn hendelser siden det vil gi større variasjoner mellom delfelt enn lengre varigheter. Vi beregnet da forholdstallet mellom RoS for hvert delfelt og midlere RoS over hele feltet. Volumet som tilføres vassdraget er det samme i alle de 30 simuleringene. Figur 60 viser hvordan RoS fordelte seg i de 30 tilfellene. Vi ser at det er stor romlig variasjon over nedbørfeltet. I august i 2016 får eksempelvis lokalfeltet til Altevatn, Innsetvatn og Fosshaug en mye større andel av RoS enn gjennomsnittet for hele vassdraget. I et slikt tilfelle vil Altevatn kunne dempe store deler av RoS dersom det er tilgjengelig magasineringskapasitet. I august 2001 er situasjonen omtrent det motsatte, her får de søndre delene av vassdraget under gjennomsnittet av RoS for hele vassdraget, mens lokalfeltet til utløpet får mer enn gjennomsnittet. I en slik situasjon kommer størsteparten av RoS nedstrøms magasinene som kan føre til større vannføringer i nedre deler av vassdraget sammenlignet med situasjonen i 2016. Figur 61 illustrerer også forskjellene i arealfordeling fra to ulike delfelt i modellen, delfeltet til Altevatn og lokalfeltet til utløpet. De ulike arealfordelingene i 2016 og 2001 vises tydelig i grafene.



**Figur 61. De 30 ulike RoS-forløpene, 200-års gjentaksintervall, med arealfordeling ut fra 30 historiske hendelser. Den første hendelsen, lengst til venstre, er den teoretiske hendelsen med lik arealfordeling over alle feltene. Øverste figur viser RoS-forløp til delfeltet til Altevatn og nedre figur viser RoS-forløp til lokalfeltet til utløpet.**

Figur 62 viser simulert totaltilsig til utløpet i Måselvmodellen, basert på en teoretisk 200-årshendelse og varierende romlig fordeling (arealfordeling) basert på de 30 historiske hendelsene. For alle simuleringene er initialvannstanden i magasinene satt til HRV og uten produksjon i kraftverkene. Den resulterende vannføringen fra den teoretiske 200-årshendelsen, med lik arealfordeling over hele nedbørfeltet, er vist med mørkeblå linje i figuren.

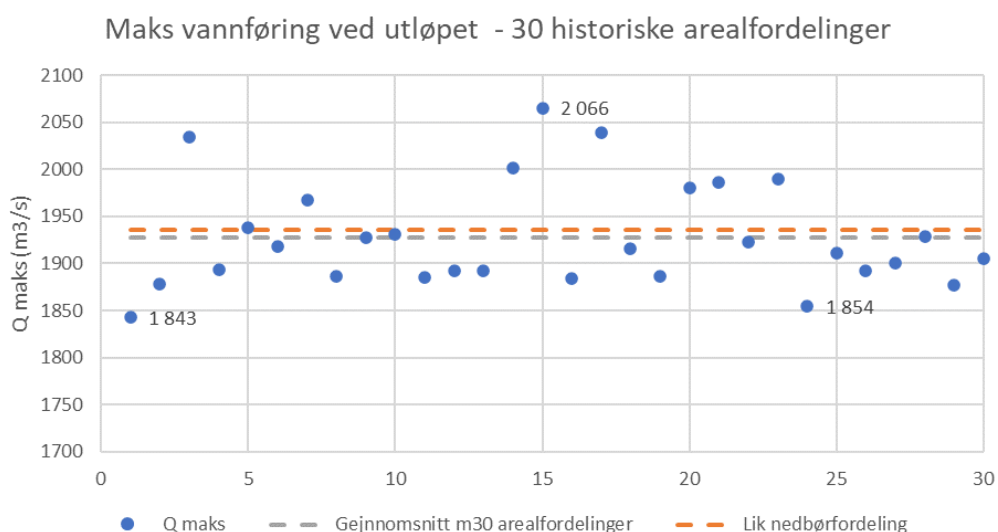


**Figur 62. Forløp ved utløpet av Måselv-modellen (E6 bru over Måselva) med ulike arealfordelingsfaktorer for de ulike delfeltene i modellen (som vist i Figur 60). Forløpet/hendelsen med jevnt fordelt RoS over alle delfeltene vises med mørkeblå strek.**



Figur 63 viser kulminasjonsverdien til de simulerte flomforløpene (Figur 62). Vi ser at vannføringen varierer med litt over 200 m<sup>3</sup>/s eller ca. 10 %. Videre ser vi at fordeling nr. 15 (august 2001) gir den største vannføringen og fordeling nr. 1, (oktober 1959) gir den minste vannføringen og fordeling nr. 24 (august 2016) gir den nest minste kulminasjonsvannføringen.

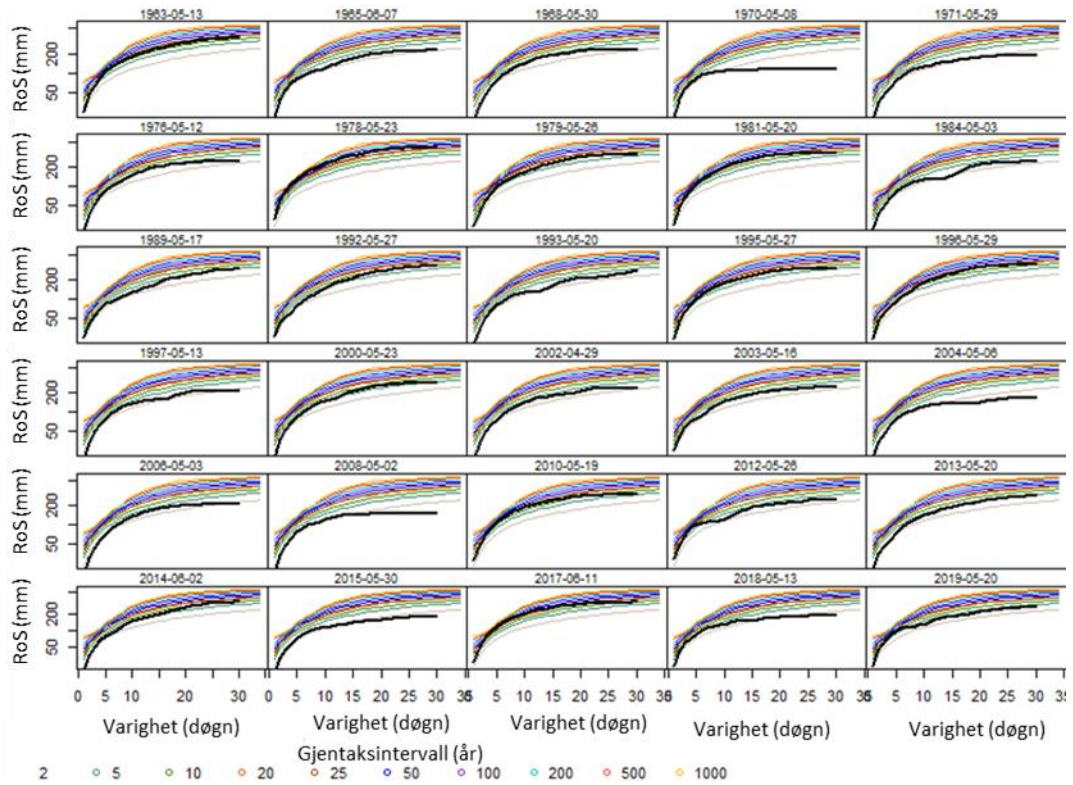
I figuren er det inkludert to stiplede linjer som representerer kulminasjonsverdien for tilløpsflommen til utløpet med jevn fordeling av vanntilførsel (oransje) og gjennomsnittlig kulminasjonsverdi for de 30 simuleringene (grå) basert på historisk arealfordeling. Vi ser også at simuleringen med jevnt fordelt vannføring over hele feltet, gir en vannføring som ligger nært den gjennomsnittlige vannføringen fra de 30 ulike historiske fordelingene.



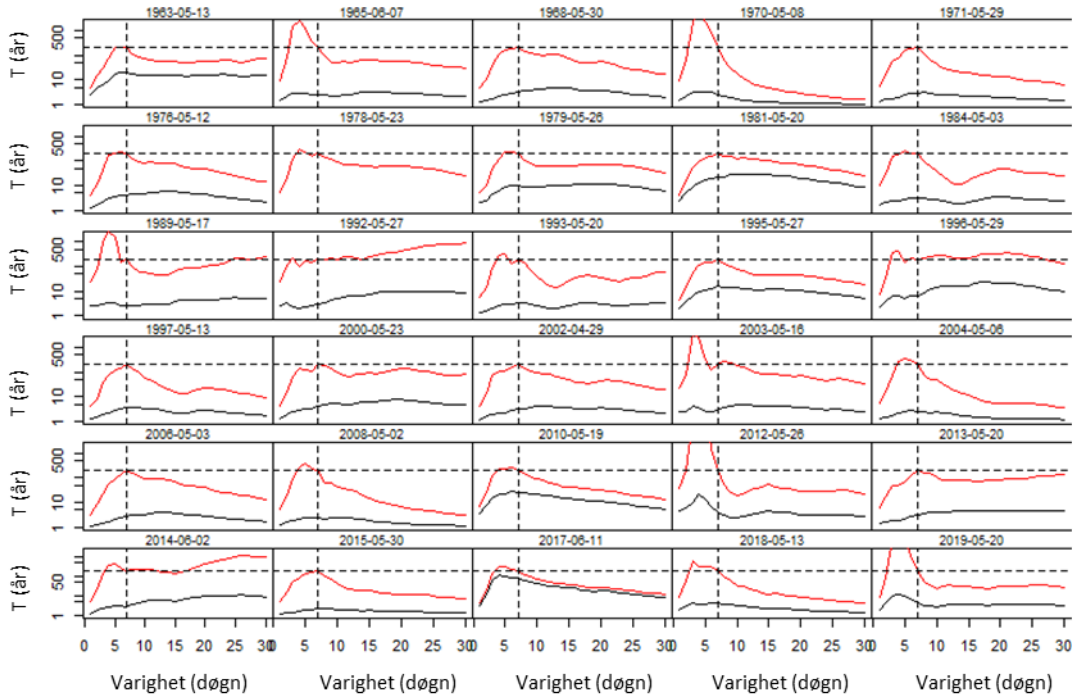
Figur 63. Simulerte vannføringer ved utløpet av Målselv-modellen (E6 bru over Målselvvassdraget) med ulike arealfordelingsfaktorer på nedbøren. Den røde stiplede linjen viser gjennomsnittet for de 30 ulike hendelsene/forløpene.

#### 4.2.2.1.2 Fordelinger av vanntilførsel i tid (tidsforløp)

For Målselvvassdraget ble det også sett på hvordan ulike fordelinger av vanntilførsel (RoS) gjennom selve forløpet (fordeling i tid) påvirket flomverdiene ved utløpet i modellen. Vi tok utgangspunkt i de 30 største 7-dagers hendelsene slik at vi får hendelser med en lang varighet. Figur 64 viser hvordan RoS for Målselvvassdraget for de 30 historiske hendelsene for flere varigheter faktisk var i forhold til de teoretisk utarbeidede IVF-kurvene. De 30 hendelsene i figuren ble skalert slik at alle hendelsene hadde en 200-års verdi for 7-dagers hendelsen. I Figur 65 vises de 30 hendelsene i form av gjentaksintervall for hver varighet. Vi ser at ingen av de opprinnelige 7-dagers varighetene hadde et gjentaksintervall på 200 år. Etter at hendelsene er skalert opp slik at 7-dagers varigheten har et gjentaksintervall på 200-år, ser vi at gjentaksintervallet varierer for andre varigheter. For de fleste hendelsene er gjentaksintervallet for varigheter over 7 dager lavere enn 200 år. For noen hendelser er gjentaksintervallet for varigheter kortere enn 7 dager betydelig høyere enn 200 år.



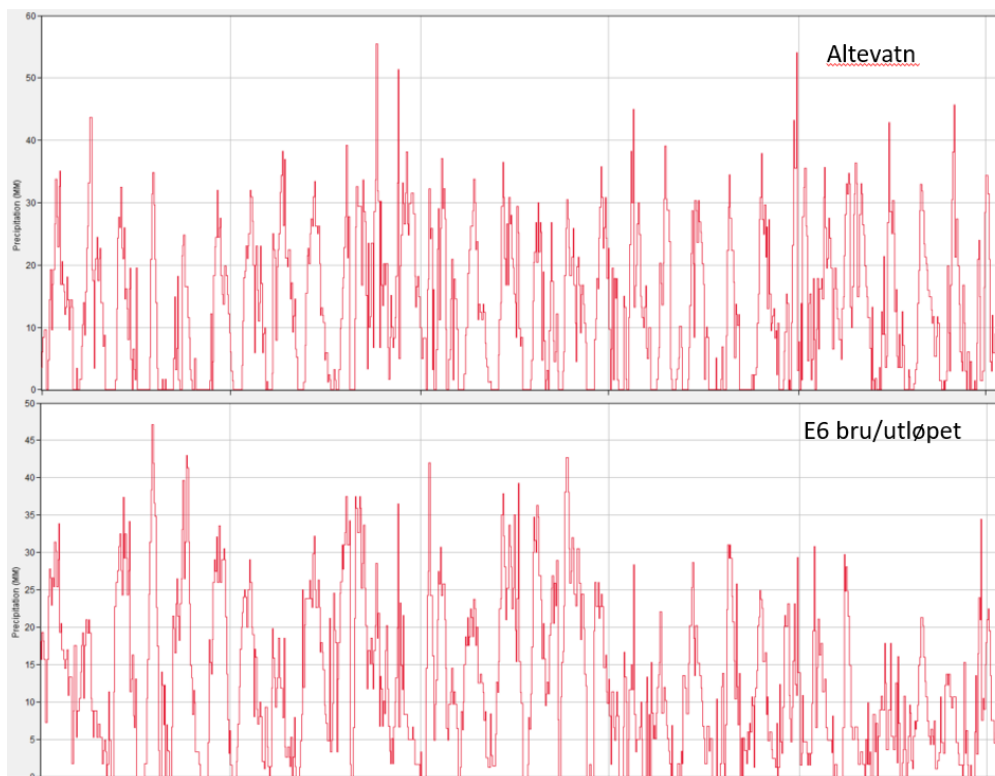
Figur 64. IVF-kurver for akkumulert vanntilførsel for varighet 1 – 30 dager sammen med IVF-kurve for valgte historiske hendelser med vanntilførsel i Måselvvasdraget (sort linje).



Figur 65. Gjentaksintervall for varigheter fra 1 – 30 døgn for valgte RoS-hendelser. Varighet i døgn er gitt på x-aksen, mens y-aksen viser gjentaksintervall (T). Svart linje viser gjentaksintervall for opprinnelig RoS-hendelse. Rød linje viser gjentaksintervall for skalert RoS-hendelse slik at 7-dagers RoS har gjentaksintervall på 200-år.

Det ble valgt å konstruere et forløp med 31 dagers varighet for de 30 ulike historiske vanntilførsel-hendelsene, skalert slik at totalvolumet for hele Måselvvasdraget tilsvarer

en 200-års hendelse med 7-dagers varighet. Totalvolumet for hele nedbørfeltet varierte dermed noe fra hendelse til hendelsene. Eksempel på ulike fordelinger av vanntilførsel fra delfeltene til Altevatn og utløpet er vist i Figur 66.



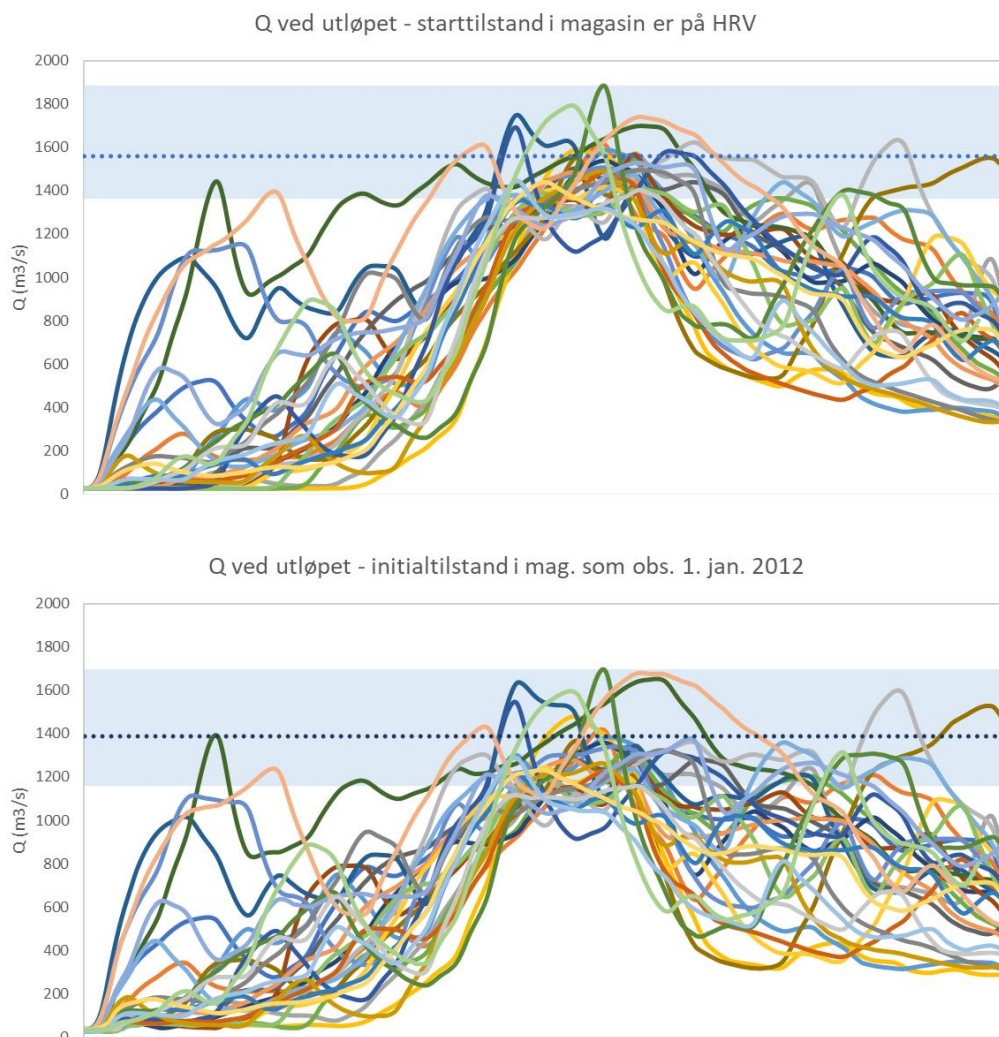
**Figur 66. 30 ulike historiske vanntilførsel-forløp, skalert opp slik at totalvolumet for hele Målselvvassdraget tilsvarer en 200-års hendelse med 7-dagers varighet. Den totale varigheten over hver hendelse er likevel satt til 31 dager. Øvre figur: eksempel fra delfeltet til Altevatn. Nedre: figur eksempel fra lokalfeltet til utløpet.**

Simulerte vannføringer ved utløpet av modellen er vist i Figur 67. I den øverste grafen er startvannstanden i magasinene satt til HRV og det er ikke produksjon i kraftverkene. I den nederste grafen i figuren er forholdene forsøkt å ligne mer på en «normalsituasjon». Startvannstanden i magasinene er satt lik observert vannstand fra 1. januar 2012 (Altevatn 486,47 moh, Innsetvatn 300 moh, Devdisvatn 409,58 moh), som er høyere i både Altevatn og Devdisvatn enn observert vannstander i mai samme år. Driftsvannføringen er satt til observert driftsvannføring med start 1. januar 2012 og så løpende derfra for hver hendelse. Driftsvannføringen blir dermed «tilfeldig valgt» og litt forskjellig fra hendelsene til hendelse.

Flomtoppen ved utløpet, med startvannstand i magasinene på HRV, varierer fra 1363 til 1885 m<sup>3</sup>/s, med en gjennomsnittsverdi på 1559 m<sup>3</sup>/s. Med andre ord er den største kulminasjonsverdien 520 m<sup>3</sup>/s, eller nesten 40 %, større enn den minste kulminasjonsverdien.

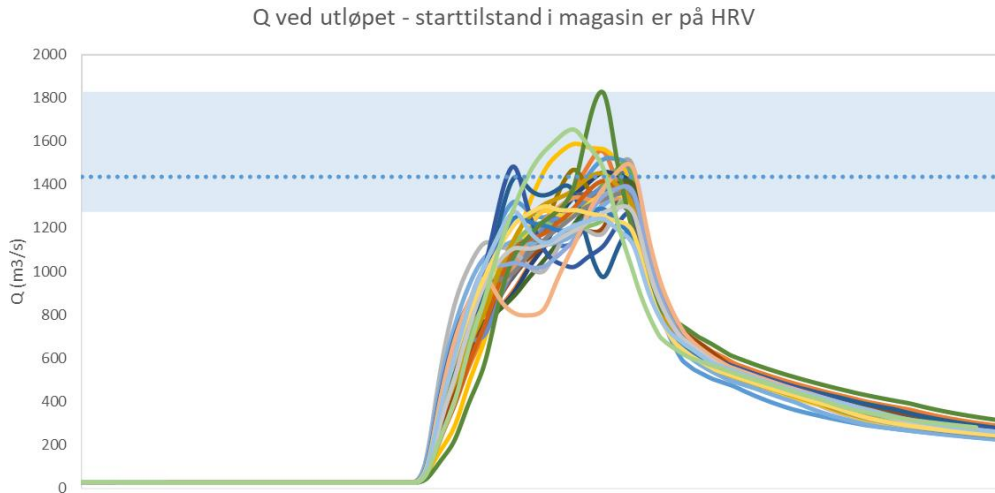
Med starttilstand i magasinene på observert vannstand fra 1. januar 2012, varierer flomtoppen fra 1159 til 1697 m<sup>3</sup>/s, med en gjennomsnittsverdi på 1388 m<sup>3</sup>/s. Med andre ord er den største kulminasjonsverdien omkring 540 m<sup>3</sup>/s, eller ca. 45 %, større enn den minste kulminasjonsverdien. Dette betyr at variasjonen fra minste til største

kulminasjonsverdi øker noe med økende tilgjengelig magasinkapasitet, selv om gjennomsnittsverdien minker.



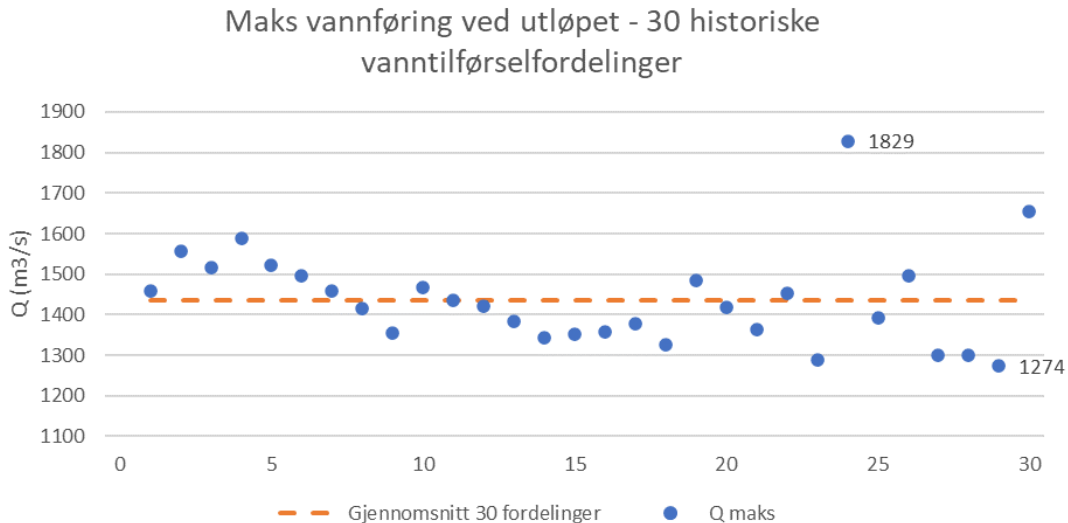
**Figur 67. Simulert vannføring ved utløpet (E6 bru over Måselva) med 30 ulike historiske vanntilførsel hendelser skalert til 200-års gjentakintervall over 7 døgn for hele feltet. Simuleringsvarigheten er satt til 31 dager slik at totalvolumet fra hendelse til hendelse variere noe. Gjennomsnittet for maksimal vannføring (kulminasjonsvannføring) vises med stiplet linje. Det blå skyggede området viser utfallsrommet for største og minste kulminasjonsverdi.**

I Figur 68 er det gjort simuleringer med vanntilførsel i 7-dagers perioden som er lagt til grunn for å velge ut de observerte hendelsene. Totalvolumet for hele nedbørfeltet blir dermed likt for alle de 30 hendelsene. Det er likevel valgt å beholde samme simuleringsperiode (31 dager) av modelltekniske grunner. Det forenkler i tillegg sammenligning med simuleringene med vanntilførsel over hele perioden, og vurderes å ha neglisjerbar innvirkning på simuleringsresultatene.



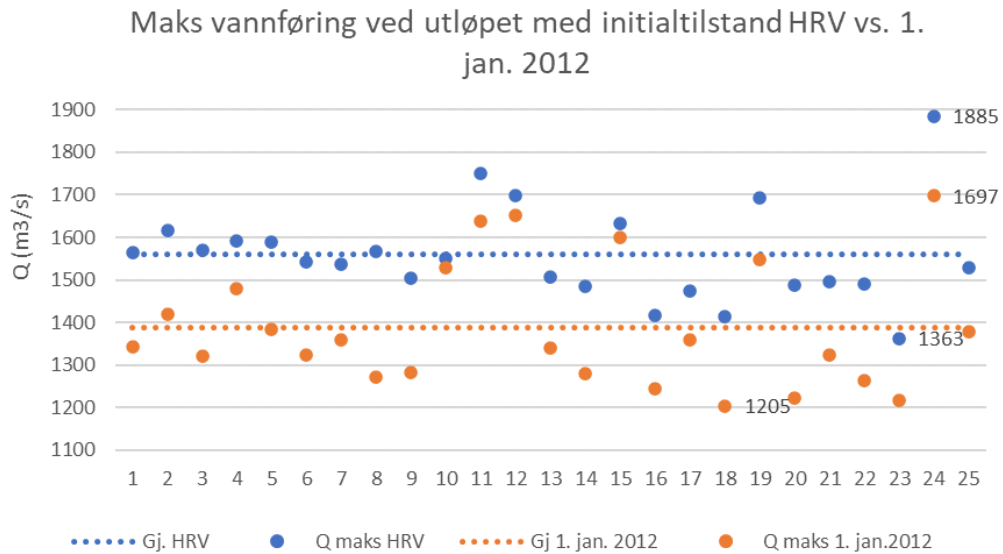
**Figur 68. Simulert vannføring ved utløpet (E6 bru over Målselva) med 30 ulike historiske vanntilførsel hendelser skalert til 200-års gjentaksintervall over 7 døgn for hele feltet. Varigheten av forløpet er satt til 31 dager, men det er kun nedbør i den skalerte 7-dagers perioden. Totalvolumet over hele nedbørfeltet er dermed likt mellom alle 30 hendelser. Gjennomsnittet for maksimale vannføringene (kulminasjonsvannføringene) vises med stiplet linje. Det blå skyggede området viser utfallsrommet for største og minste kulminasjonsverdien.**

I Figur 68 og Figur 69 ser vi at flomtoppen ved utløpet varierer fra 1274 til 1828 m<sup>3</sup>/s, med en gjennomsnittsverdi på 1436 m<sup>3</sup>/s. Med andre ord er den største flomtoppen 555 m<sup>3</sup>/s, eller ca. 45 %, større sammenlignet med den minste flomtoppen. De fleste scenarioene gir likevel en maksimal vannføring på omkring 1300-1600 m<sup>3</sup>/s, en variasjon på 20-25 % (se Figur 69).



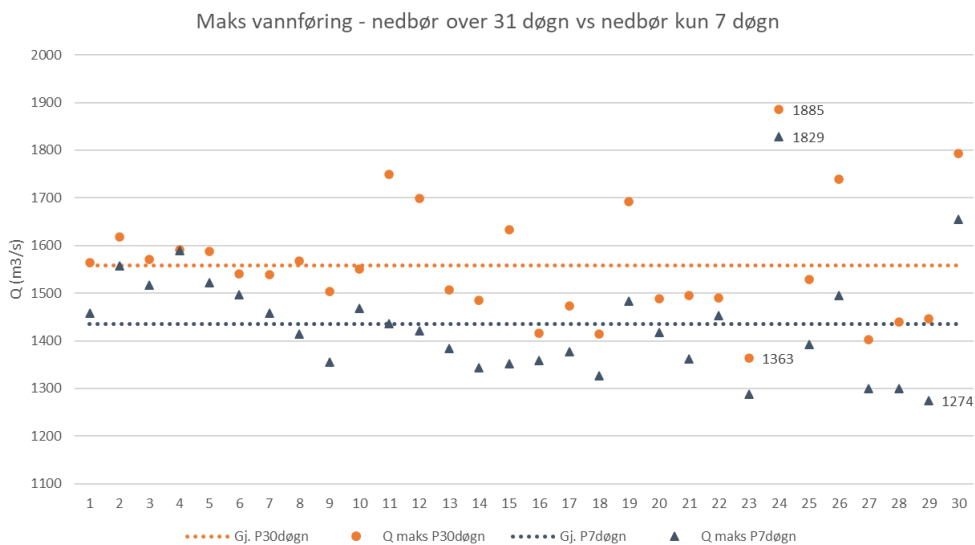
**Figur 69. Maks simulert vannføring ved utløpet av Målselv-modellen (E6 bru over Målselva) fra hver av de 30 historiske RoS-hendelsene skalert opp til en 200-års hendelse over 7 døgn.**

I Figur 70 sammenlignes maksimale vannføringer ved utløpet med startvannstand på HRV og startvannstand som observert vannstand 1. januar 2012. Gjennomsnittsverdien er ca. 170 m<sup>3</sup>/s, litt over 10 %, større for simuleringer med initialtilstander i magasinene på HRV sammenlignet med observert vannstand fra 1. januar 2012. Avviket mellom de to simuleringene for enkelt-hendelsene varierer fra ca. 0 – 20 %.



**Figur 70. Maks vannføringer ved utløpet fra 30 ulike historiske vanntilførsel hendelser skalert opp til en 200-års hendelse over 7 døgn.**

I Figur 71 sammenlignes maks vannføring ved utløpet med vanntilførsel over hele forløpet og med vanntilførsel kun i en 7-dagers periode. Gjennomsnittsverdien er ca. 120 m<sup>3</sup>/s eller omkring 10 % større for kjøring med vanntilførsel over hele forløpet sammenlignet med kjøring med kun vanntilførsel i 7-dagers perioden. Avviket mellom hver enkel hendelse variere fra null til omkring 20 %.



**Figur 71. Maks vannføringer ved utløpet fra 30 ulike historiske vanntilførsel hendelser skalert opp til en 200-års hendelse over 7 døgn. Initialtilstand i magasinene var HRV for alle simuleringer.**

#### 4.2.2.2 Vanntilførselhendelser for Tinnvassdraget

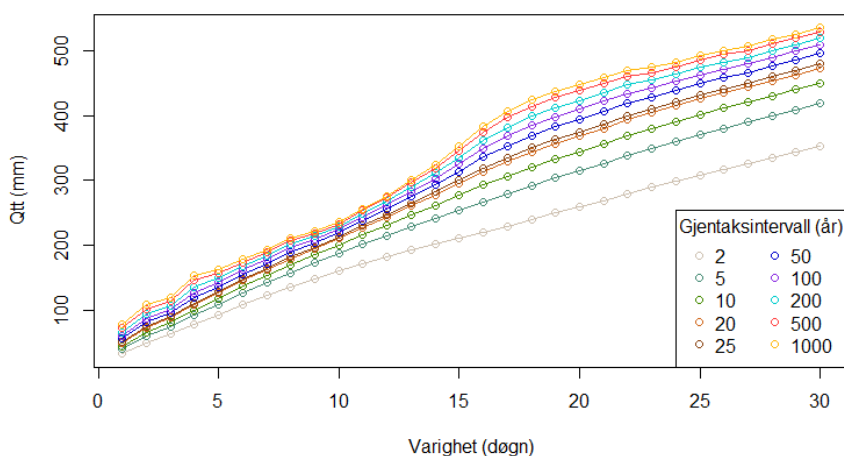
Gjennom å se på de historisk 30 største vanntilførselhendelsene i Tinnvassdraget fra 1958-2020 er det undersøkt hvor mye den romlige fordelingen i vanntilførsel historisk sett har variert. Det er undersøkt hvordan den tradisjonelle tilnærmingen med jevn fordeling av vanntilførsel slår ut sammenlignet med historiske arealfordelinger hentet fra

seNorge. Det ble også sett på den kombinerte effekten av forskjellige arealfordelinger av vanntilførsel og initialvannstand i magasinene.

For Tinnvassdraget ble sum av regn og snøsmelting (vanntilførsel) med tidsoppløsning på ett døgn for fire delfelt brukt. Første skritt i analysen var å beregne IVF-kurve for vanntilførsel for varigheter fra 1 – 30 døgn, kurven er oppsummert i Tabell 32 og vist i Figur 72. For å beregne et forløp for vanntilførsel, ble 200-års hendelsen brukt. Den resulterende symmetriske kurven er vist i Figur 73.

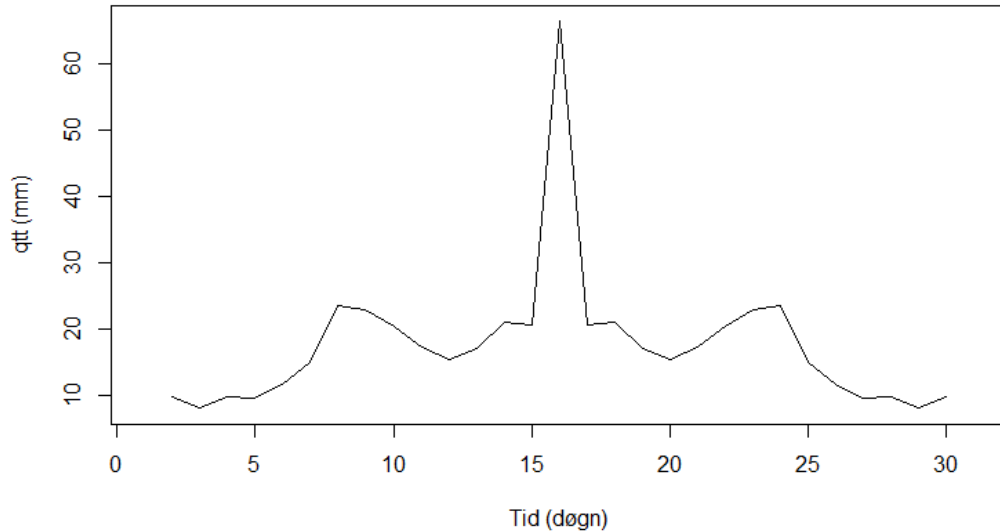
**Tabell 32. 200-års vanntilførsel (RoS) for varigheter (V) fra 1 til 30 døgn basert på seNorge-data**

V (Døgn)	RoS (mm)	V (Døgn)	RoS (mm)	V (Døgn)	RoS (mm)	V (Døgn)	RoS (mm)	V (Døgn)	RoS (mm)
1	66	7	183	13	289	19	412	25	474
2	94	8	201	14	311	20	423	26	482
3	107	9	214	15	335	21	435	27	490
4	135	10	229	16	361	22	447	28	500
5	150	11	249	17	382	23	454	29	509
6	168	12	268	18	399	24	464	30	519

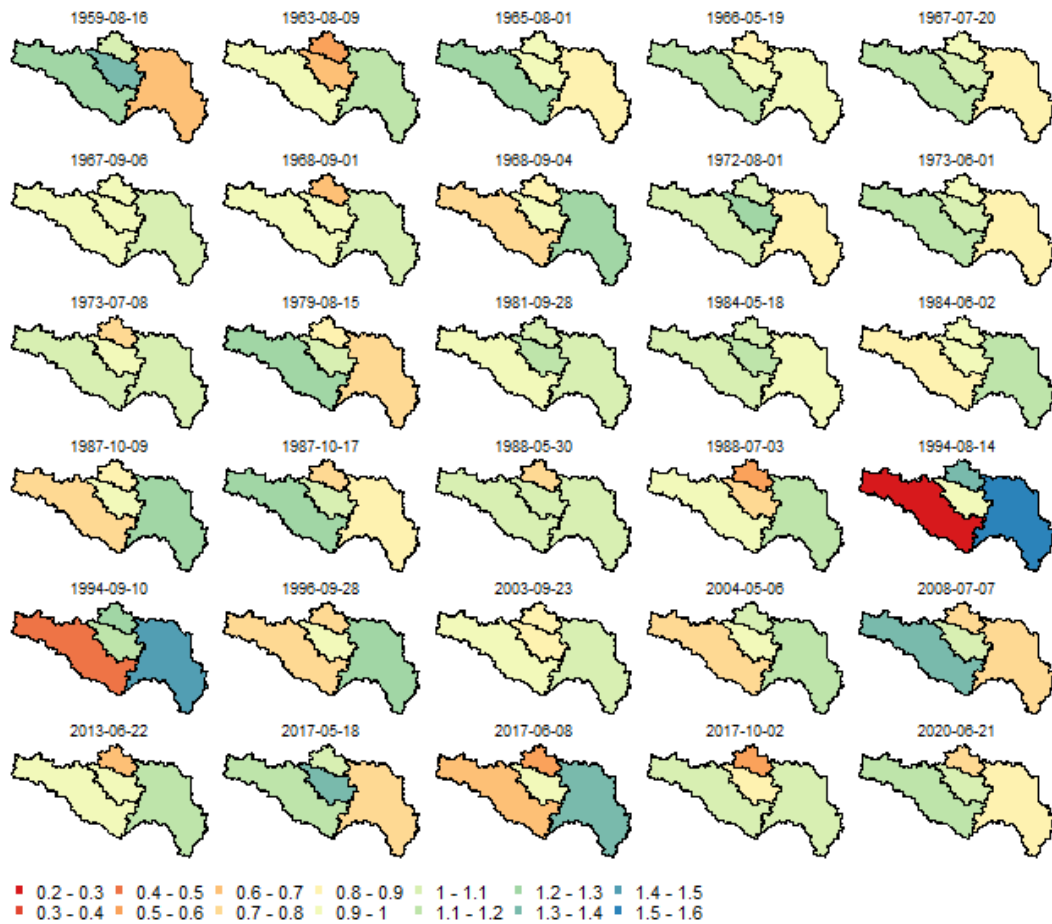


**Figur 72. IVF-kurve for Tinnvassdraget basert på seNorge-data.**

For å beregne arealfordeling av vanntilførsel, brukte vi de 30 største hendelsene fra perioden 1958-2020 fra seNorge. Vi beregnet forholdstallet mellom vanntilførsel for hvert delfelt og midlere vanntilførsel over hele feltet. Volumet som tilføres vassdraget er det samme i alle de 30 simuleringene. Figur 74 viser hvordan nedbøren fordelte seg for de 30 tilfellene. Vi ser at fordelingen av vanntilførsel varierer betydelig og at, eksempelvis, lokalfeltet til Tinnsjø i august i 1994 får 60 % mer vanntilførsel enn gjennomsnittet for hele vassdraget, mens lokalfeltet til Tinnsjø under hendelsen i august 1959 kun hadde 60 % av den gjennomsnittlige vanntilførselen for hele vassdraget. I vassdrag med store reguleringsmagasiner høyt oppe i nedbørfeltet som Tinnvassdraget, vil en med tilgjengelig magasinkapasitet kunne redusere tilsiget videre nedover i vassdraget fra



**Figur 73. Teoretisk vanntilførsels-hendelse der alle varigheter har et gjentakintervall på 200 år for Tinnvassdraget.**

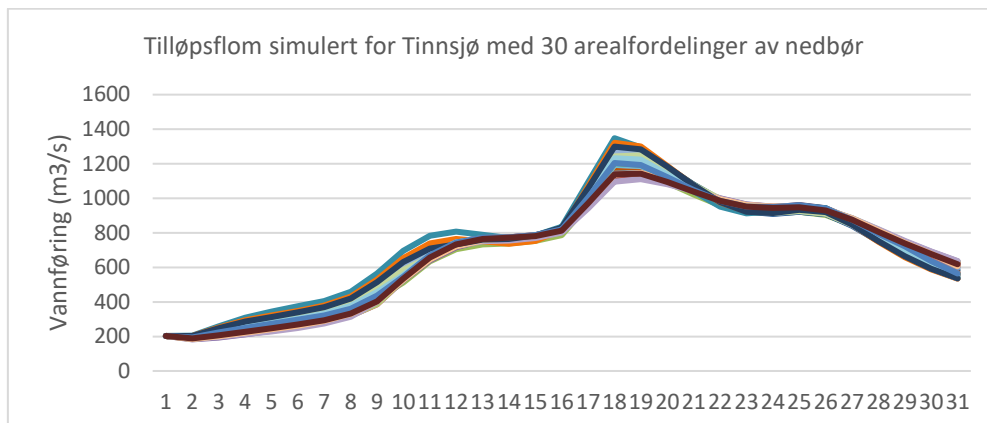


**Figur 74. Fordeling av RoS for de 30 største 1-døgns hendelsene i Tinnvassdraget. Figuren viser forholdstallet mellom RoS for delfelt og RoS for hele vassdraget.**

arealene oppstrøms disse magasinene betraktelig. Uregulerte lokaltilsiget kan i slike situasjoner har stor betydning for hvor stor flommen blir. Ved å anvende

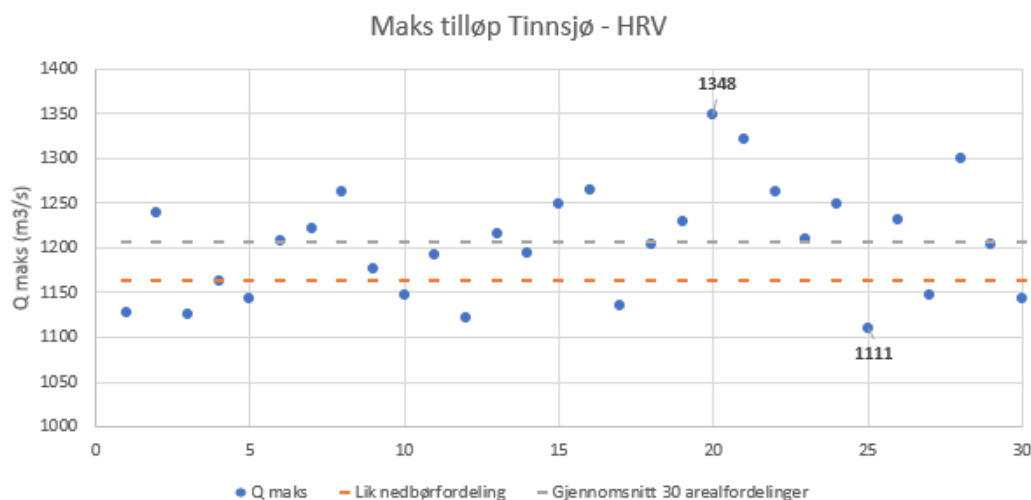


vassdragsmodellen for Tinnsjø i kombinasjon med historiske fordelinger av vanntilførsel var det mulig å beskrive hvor stor betydning arealfordelingen av vanntilførsel har for flommene i Tinnsjø.



**Figur 75. Simulert tilløpsflom for Tinnsjø med 30 forskjellige arealfordelinger av vanntilførsel basert på historiske hendelser og med HRV i alle magasiner som initialtilstand.**

Ved å kjøre vassdragsmodellen med de forskjellige historiske arealfordelingene kunne vi se på sensitiviteten til Tinnvassdraget for arealfordelingen under hendelser med stor vanntilførsel. Figur 75 viser 31 dagers simulert totaltilsig til Tinnsjø basert på en teoretisk 200-årshendelse og varierende arealfordeling basert på 30 historiske hendelser. For alle simuleringene er initialvannstanden satt til HRV i alle magasinene. I simuleringene er det lagt inn kjøring av Frøystul kraftverk (75 m<sup>3</sup>/s) og Mår kraftverk (27 m<sup>3</sup>/s), samt åpne flomluker ut av Tinnsjø. I de 30 simulerte tilløpsflommene varierer kulminasjonsverdien fra 1111 m<sup>3</sup>/s – 1348 m<sup>3</sup>/s.



**Figur 76. Maks tilløpsflom for Tinnsjø simulert med 30 forskjellige arealfordelinger av nedbør basert på historiske hendelser og med HRV i alle magasiner som initialtilstand. Oransje stiplet linje viser maks tilløpsflom om en fordeler vanntilførselen jevnt. Grå stiplet linje viser gjennomsnittlig maksverdi for 30 historiske arealfordelinger.**

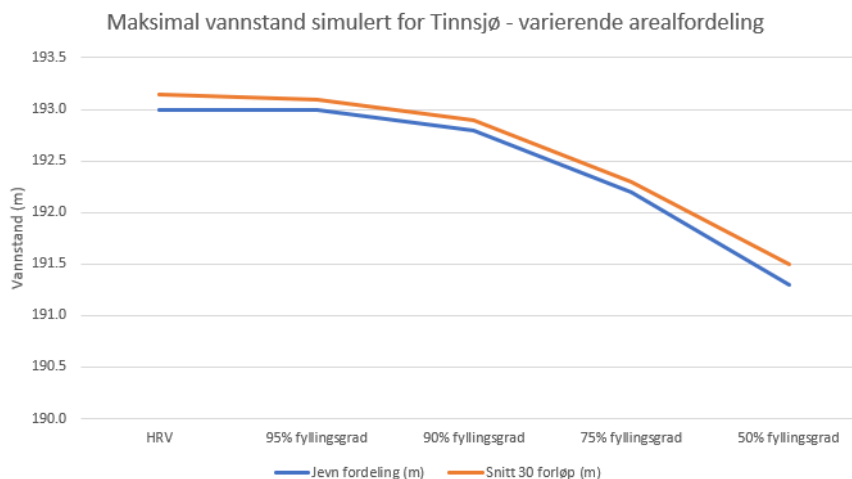
Figur 76 viser kulminasjonsverdien til de simulerte flomforløpene vist i Figur 75. Figuren viser at det er forholdsvis stor spredning i resultatene. I figuren er det inkludert to stiplede linjer som representerer kulminasjonsverdien for tilløpsflommen til Tinnsjø med jevn romlig fordeling av vanntilførsel (oransje) og gjennomsnittlig kulminasjonsverdi for de 30 simuleringene (grå) basert på historiske arealfordelinger. Simuleringene viser at

tilløpsflommen til Tinnsjø ved jevn fordeling av vanntilførsel over hele vassdraget er mindre (1162 m<sup>3</sup>/s) enn gjennomsnittet av 30 historiske arealfordelinger (1205 m<sup>3</sup>/s).

Av de 30 historiske arealfordelingene av RoS var det hendelsen hvor det var størst vanntilførsel i lokalfeltet til Tinnsjø som ga størst kulminasjonsverdi for tilløpsflommen og også høyest simulert vannstand i Tinnsjø.

Det var også ønskelig å se hvordan initialvannstanden i magasinene i kombinasjon med ulik romlig fordeling av vanntilførsel ville slå ut i simuleringene for Tinnsjø. Samme simulering som beskrevet over ble utført med varierende fyllingsgrad i magasinene som initialtilstand. Følgende fyllingsgrader utover HRV (100%) ble testet: 95%, 90%, 75% og 50%.

Figur 77 viser maksimal simulert vannstand for Tinnsjø under en teoretisk 200-årshendelse med varierende fyllingsgrad som initialtilstand hvor blå linje representerer simuleringer med jevnt fordelt vanntilførsel over hele nedbørfeltet og oransje linje representerer gjennomsnittet av 30 historiske romlige fordelinger. Resultatene viser at simulering med jevn nedbørfordeling for Tinnvassdraget gir en lavere kulminasjonsvannstand i Tinnsjø enn gjennomsnittet av 30 historiske hendelser for alle de utprøvde initialtilstandene. Forskjellen er imidlertid forholdsvis beskjeden (10-20 cm forskjell i høyeste simulerte vannstand i Tinnsjø).

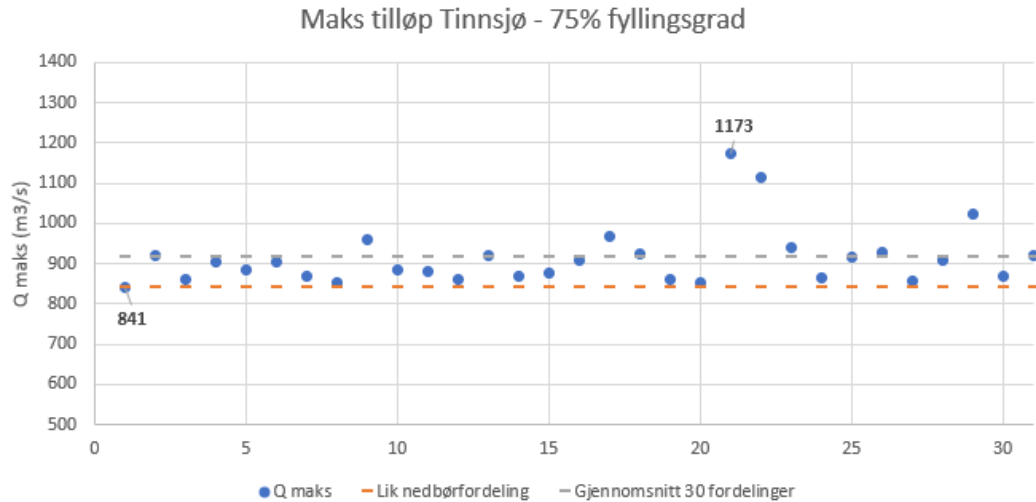


**Figur 77. Maksimal simulert vannstand for Tinnsjø ved teoretisk 200-årshendelse simulert med varierende startvannstand og gjennomsnittet av 30 historiske arealfordelinger av vanntilførsel.**

Figur 78 viser kulminasjonsverdien for hver av de 30 historiske arealfordelingene av vanntilførsel med 75 % fyllingsgrad som initialtilstand. Med 75 % fyllingsgrad som initialtilstand ga jevn arealfordeling av vanntilførsel mindre tilløpsflom enn **alle** de 30 historiske fordelingene. Den prosentvise forskjellen mellom gjennomsnittet av 30 hendelser og jevn fordeling var imidlertid liten (2-9 % større).

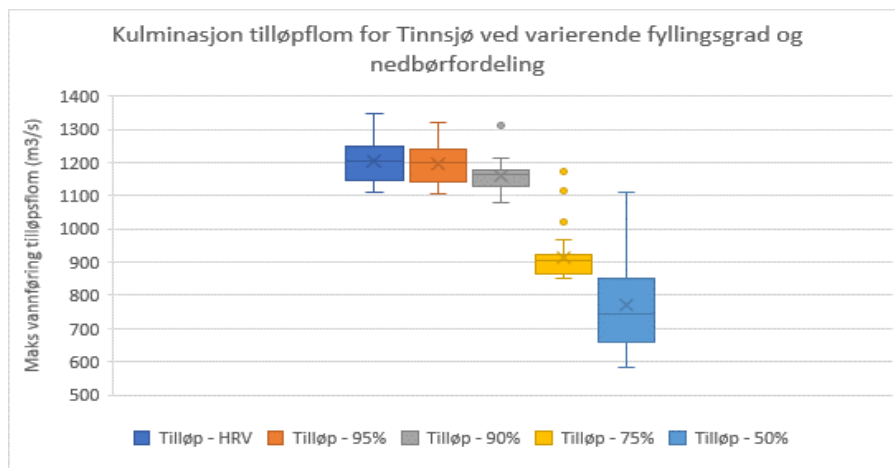
Figur 79, Figur 80 og Figur 81 viser tre sett med boksplokk som oppsummerer maksimalverdiene for en teoretisk 200-års hendelse basert på frekvensanalyser av seNorge-data i kombinasjon med forskjellige initialtilstander i magasinene. For hver initialtilstand ble vassdragsmodellen kjørt 30 ganger hvor arealfordelingen av vanntilførsel varierte basert på 30 store historiske hendelser. Resultatene i boksplokkene viser simulerte maksimalverdier for total tilløpsflom til Tinnsjø, høyeste simulerte vannstand i Tinnsjø og påfølgende avløpsflom fra Tinnsjø. Fra plottene kan vi se at

resulterende maksimal simulert vannstand i Tinnsjø på tvers av alle arealfordelinger av vanntilførsel og initialvannstand varierer mellom 191,0 moh og 193,4 moh. Altså er forskjellen i maksimal vannstand i Tinnsjø på 2,4 m mellom den høyeste simuleringen med HRV som initialtilstand og den laveste simuleringen med 50 % fyllingsgrad som initialtilstand. Dette medfører at avløpsflommen varierer mellom 521 m<sup>3</sup>/s og 1169 m<sup>3</sup>/s.



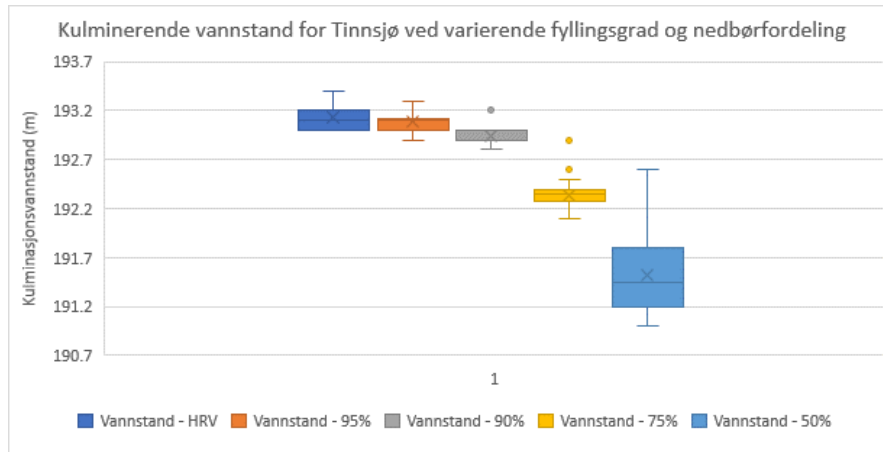
Figur 78. Maks tilløpsflom for Tinnsjø simulert med 30 forskjellige arealfordelinger av nedbør basert på historiske hendelser og med 75 % fyllingsgrad i alle magasiner som initialtilstand. Oransje stiplet linje viser maks tilløpsflom om en fordeler vanntilførselen jevnt. Grå stiplet linje viser gjennomsnittlig maksverdi for 30 historiske arealfordelinger.

Videre kan en observere at spredningen i resulterende flomstørrelser blir større ettersom initialvannstanden settes lavere. Dette antyder at effekten av variert arealfordeling av vanntilførsel er mindre viktig når utgangspunktet er fulle magasiner (HRV) enn når utgangspunktet er mer gunstig, dvs. lavere initialvannstand i magasinene. Det skal likevel nevnes at maksimal simulert vannstand i Tinnsjø var 40 cm høyere for den mest ugunstige arealfordelingen av vanntilførsel kontra den mest gunstige med startvannstand ved HRV i alle magasiner.

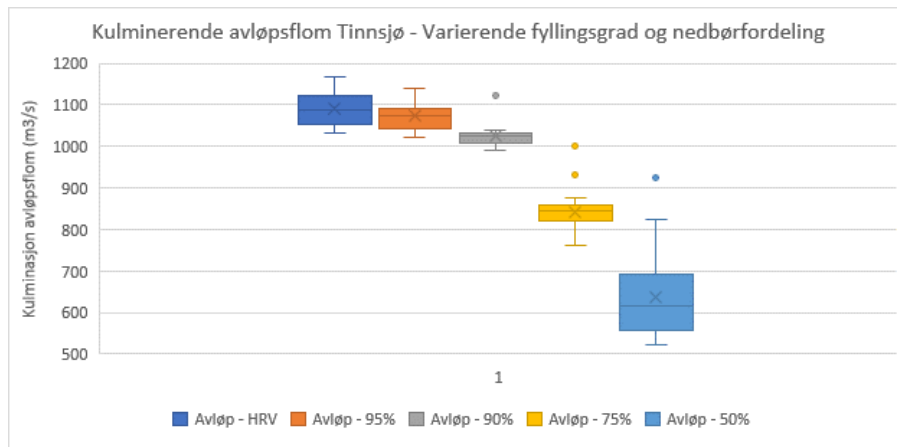


Figur 79. Boksplo av maks simulert tilløpsflom til Tinnsjø med varierende fyllingsgrad som initialtilstand og 30 forskjellige arealfordelinger av vanntilførsel basert på historiske hendelser. I boksploene representerer kryssene gjennomsnittverdier og streken i midten av boksen medianen. Ytterkantene av boksene representerer 25- og 75-persentilen. Sirkler over boksene representerer verdier som er spesielt mye større enn resten (uteliggere).

For simuleringene med 75 % fyllingsgrad som initialtilstand observeres det at den historiske hendelsen med størst vanntilførsel til Tinnsjøs lokalfelt gir større flomtopp i tilløpsflommen til Tinnsjø enn det jevn fordeling av vanntilførsel gir med HRV som initialtilstand. Også avløpsflommen blir nesten like stor (1048 m<sup>3</sup>/s vs 1003 m<sup>3</sup>/s). For Tinnsjø ser vi følgelig at ugunstig arealfordeling av vanntilførsel (størst vanntilførsel i Tinnsjø sitt lokalfelt) nærmest utligner dempningseffekten på avløpsflommen fra Tinnsjø tilsvarende 25 % tilgjengelig magasinivolum som initialtilstand kontra et utgangspunkt med fulle magasiner (HRV) og jevnt fordelt vanntilførsel.



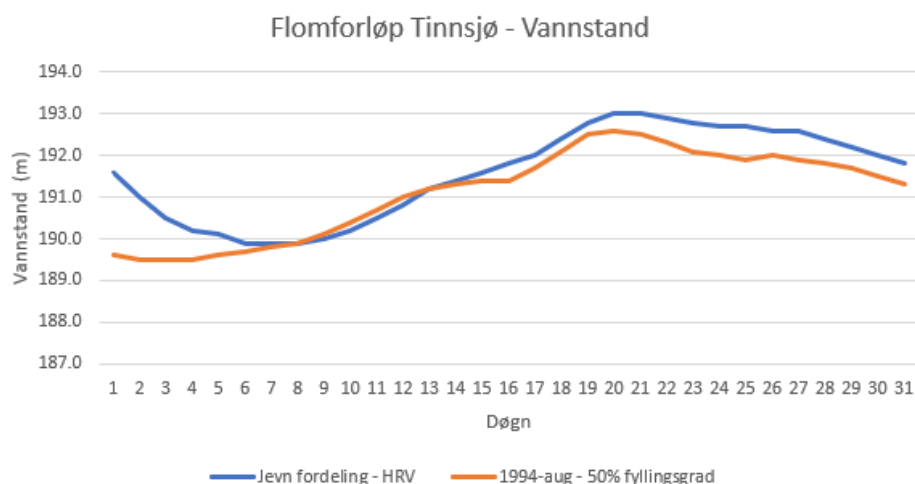
**Figur 80.** Boksplot av maks simulert vannstand i Tinnsjø med varierende fyllingsgrad som initialtilstand og 30 forskjellige arealfordelinger av vanntilførsel basert på historiske hendelser. I boksploottene representerer kryssene gjennomsnittverdier og streken i midten av boksen medianen. Ytterkantene av boksene representerer 25- og 75-persentilen. Sirkler over boksene representerer verdier som er spesielt mye større enn resten (uteliggere).



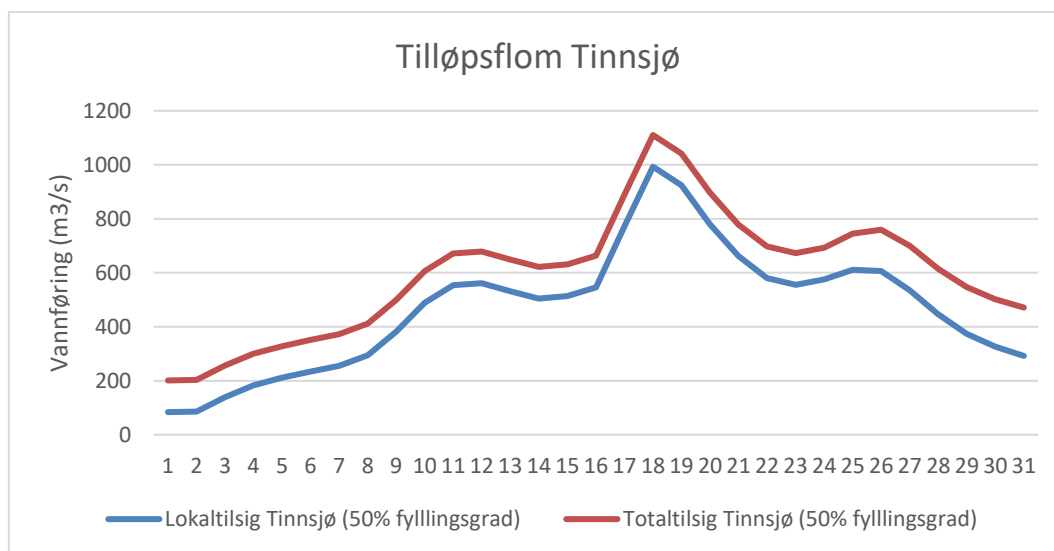
**Figur 81.** Boksplot av maks avløpsflom ut av Tinnsjø simulert med varierende fyllingsgrad som initialtilstand og 30 forskjellige arealfordelinger av vanntilførsel basert på historiske hendelser. I boksploottene representerer kryssene gjennomsnittverdier og streken i midten av boksen medianen. Ytterkantene av boksene representerer 25- og 75-persentilen. Sirkler over boksene representerer verdier som er spesielt mye større enn resten (uteliggere).

I Figur 82 vises resultatene fra vannstandssimuleringen gjennom Tinnsjø med to svært forskjellige utgangspunkt. Blå linje representerer en simulering hvor initialtilstanden er HRV i alle magasiner og vanntilførselen er lik for alle delfelt. Oransje linje representerer en simulering hvor initialstanden er 50 % fyllingsgrad i alle magasiner og den minst gunstige historiske arealfordelingen av vanntilførsel over delfeltene (størst vanntilførsel i lokalfeltet til Tinnsjø). Av figuren kan vi se at vannstanden i Tinnsjø selv med 50 %

yllingsgrad i alle magasiner som initialtilstand kun kulminerer 40 cm lavere enn simuleringen med jevn vanntilførsel og HRV som initialtilstand. Dette på tross av at totaltilsigt da utelukkende består av tilsig fra Tinnsjø sitt lokalfelt pluss driftsvannføring fra Frøystul og Mår kraftverk. I figuren ser en at Tinnsjø tappes ned den første uken av simuleringen med HRV som startvannstand (blå linje) gjennom at modellen kjøres med åpne flomluker ut av Tinnsjø. Flomhydrogrammet for denne simuleringen er vist i Figur 83. Dette illustrerer hvordan selv gjennomregulerte vassdrag som Tinnvassdraget med stor tilgjengelig magasinkapasitet før en periode med kraftig tilsig vil kunne være sårbare for store flommer så lenge det uregulerte lokalfeltet er stort.



Figur 82. Simulert vannstand i Tinnsjø ved to teoretiske 200-årshendelser med forskjellig initialtilstand og arealfordeling av vanntilførsel.



Figur 83. Lokal og total tilløpsflom for Tinnsjø simulert med 50 % fyllingsgrad som initialtilstand i magasinene. Vanntilførselen i simuleringen representerer 200-hendelsen basert på seNorge-data. Inkluderer kjøring av Frøystul (75 m³/s) og Mår kraftverk (27 m³/s).

#### 4.2.2.3 Sammenligning av vanntilførsel verdier fra seNorge med arealreduerte nedbørverdier

Ettersom ekstremver dianalysene på seNorge-data også ga estimater av 1000-årsverdier var det interessant å se hvordan vanntilførselverdier fra seNorge (RoS1000) kommer ut

sammenlignet med ekstremverdianalyser på nedbør (P1000) fra Meteorologisk Institutt (MET) som benyttes i flomberegninger for damsikkerhet. Det er imidlertid viktig å påpeke at det her sammenlignes regn og snøsmelting med rene nedbørekstremer og at det i flomberegninger for damsikkerhet gjerne benyttes sesongekstremer (eksempelvis vår/sommer) i kombinasjon med et snøsmelteforløp når det utføres nedbør-avløpsmodellering. Følgelig var denne sammenligningen kun ment som en grovsjekk på i hvilken grad en ender opp i samme størrelsesorden gjennom de to tilnærmingene.

For Målselvvassdraget er ekstremverdier for nedbør hentet fra siste godkjente flomberegningsrapport for damsikkerhet for Altevatn (Grøndal og Berg, 2016) og Devdisvatn (Weltzien, 2016b). Disse er nærmere beskrevet i kapittel 4.1.1. Resultatene er vist i Tabell 33 og Figur 84.

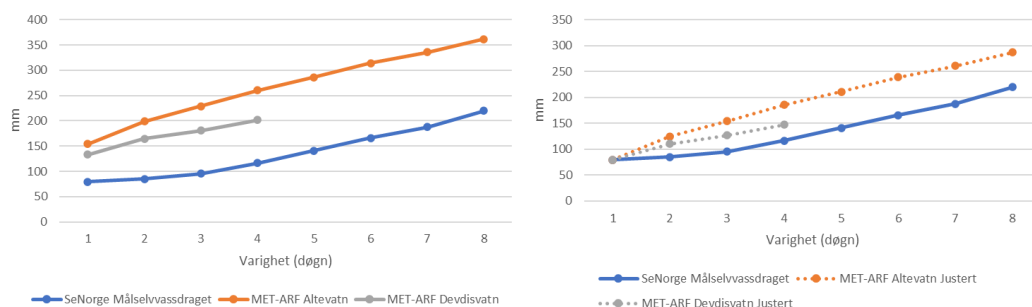
RoS-verdiene for Målselvvassdraget er beregnet for et mye større felt (ca. 5600 km<sup>2</sup>) enn det nedbørverdiene fra MET er (Altevatn har naturlig felt på 1250 km<sup>2</sup> og Devdisvatn ca. 250 km<sup>2</sup>). Det blir med andre ord utfordrende å sammenligne selve verdiene, men det vurderes likevel som interessant å se på hvordan de ulike metodene og varighetene forholder seg til hverandre. Resultatene viser at vanntilførsel verdiene (RoS1000 fra seNorge) er mye lavere sammenlignet P1000-verdiene (arealreduserte verdier fra MET) for både Altevatn og Devdisvatn. Siden feltet som RoS1000-verdiene er utarbeidet for er så mye større sammenlignet med feltet til Altevatn og Devdisvatn, har vi også valgt å justere 1-døgns verdien fra MET slik at den blir lik 1-døgns verdien fra seNorge. Dette gjør det mulig å enklere se hvordan verdiene mellom de ulike varighetene forholder seg til hverandre, se grafen til høyre i Figur 84. Ut fra figuren ser vi at forholdene mellom 1, 2 og 3 døgns varighet varierer mest og at kurvene følger hverandre godt etter 3-døgns varighet (selv om vi for Devdisvatn ikke har data over 4 døgns varighet og følgelig ikke kan si noe om hva som skjer deretter).

**Tabell 33. Resultaterende 1000-årsverdier for Målselvvassdraget fra frekvensanalyser utført på seNorge-data og arealreduserte nedbørverdier basert på punktmålinger utarbeidet av MET (Weltzien, 2016b og Grøndal og Berg, 2016).**

Varighet (døgn)	seNorge RoS1000 Målselv-vassdraget (mm)	MET P1000_ARF Altevatn sommer/år (mm)	MET P1000_ARF Devdisvatn sommer/år (mm)
1	79	154	133
2	85	199	165
3	95	229	181
4	117	260	202
5	141	286	
6	166	314	
7	187	336	

For Tinnvassdraget er ekstremverdier for nedbør hentet fra siste godkjente flomberegningsrapport for damsikkerhet for Tinnsjø (Rinde, 2020). I Tabell 34 og Figur 85 vises RoS1000 sammenlignet P1000 årsverdier (arealredusert) som MET har levert for

gjeldende flomberegning for Tinnsjø. Resultatene viser at det er svært stor forskjell mellom 1-døgns RoS1000 fra seNorge (79 mm) og P1000 arealredusert fra MET (125 mm) for nedbørfeltet til Tinnsjø. Et annet interessant resultat vises i kolonnen lengst til høyre i Tabell 34 som er representert ved den blå linjen i Figur 85.

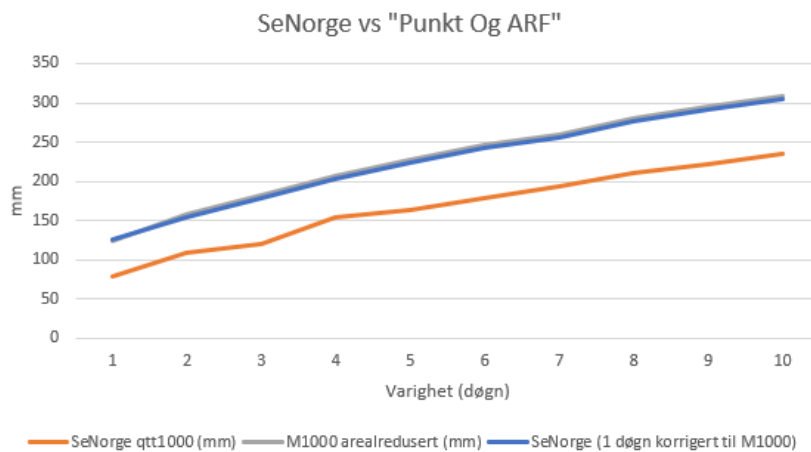


**Figur 84. Resultater fra frekvensanalyser for 1000-årsverdier for Måselvassdraget basert på arealverdier fra seNorge-data og arealnedbør basert på punktnedbør og areal reduksjonsfaktor (ARF). I figuren til høyre er MET verdiene justert slik at 1-døgns varighet er lik med 1-døgn varighet fra seNorge-verdiene.**

Selv om det er meget stor forskjell i 1000 års-verdiene for 1 døgns varighet basert på seNorge (arealdata) og punktverdier som så arealreduseres, så gir de to analysene nærmest identiske akkumulerte verdier for varighetene 2-10 døgn, altså hvor mange mm som skal legges til for hvert ekstra døgn med simulering hvor 1000-års gjentakintervall bevares for alle varigheter. Dette tilsier at dersom en anvender seNorge-data versus tradisjonell tilnærming vil en for Tinnvassdraget ende opp med to forløp som er meget like med unntak av maksimaldøgnet som vil være svært forskjellig. Som nevnt tidligere ville man imidlertid i en flomberegning for damsikkerhet for Tinnvassdraget endt opp med å kombinere sesongekstremer av nedbør (vår/sommer) med snøsmelting.

**Tabell 34. Resulterende 1000-årsverdier for Tinnvassdraget fra frekvensanalyser utført på seNorge-data og arealreduserte nedbørverdier basert på punktmålinger. Siste kolonne viser seNorge-verdiene dersom 1000-årsverdien for 1 døgns varighet settes lik P1000**

Varighet (døgn)	seNorge RoS1000 (mm)	P1000 arealredusert (mm)	seNorge justert P1000 (mm)
1	79	125	<b>125</b>
2	109	158	155
3	120	182	179
4	154	207	203
5	163	228	224
6	178	246	242
7	193	259	256
8	211	281	277
9	222	296	292
10	236	308	304



**Figur 85. Resultater fra frekvensanalyser for 1000-årsverdier for Tinnvassdraget basert på arealverdier fra seNorge-data og arealnedbør basert på punktnedbør og areal reduksjonsfaktor (ARF). Blå linje viser seNorge-verdiene en får om 1 døgnsværdien settes lik M1000.**



# 5 Diskusjon

## 5.1 Tilsigsserier

I et regulert vassdrag kan gode tilsigsserier konstrueres dersom en har gode vannhusholdningsdata fra det regulerte området. Dette inkluderer tidsserier for vannstand og volum for alle magasin i nedbørfeltet, overførte vannmengder inn eller ut av nedbørfeltet og tappedata fra magasinet tilsigserien skal lages for (dvs. driftsvannføringer, flomtap og/eller annen tapping fra magasinet eller en sum av disse).

Enkelte steder er det opprettet en målestasjon i elveløpet nedstrøms et magasin hvor totalavløpet fra magasinet registreres. Et eksempel på dette er stasjonen 16.23 Kirkevoll bru nedstrøms Tinnsjøen i Skiensvassdraget. Usikkerheten knyttet til totalavløpet ved en slik stasjon, vil normalt være mindre enn om en summerer driftsvannføring, overløp/ tapping gjennom flomluker eller annen tapping fra magasinet.

Når tilsigsserier skal benyttes i forbindelse med flomanalyser, er tidsoppløsningen i magasin vannstandene av stor betydning. I enkelte magasin har en daglige avlesninger av vannstand helt tilbake til starten av 1900-tallet, mens i andre magasin har det vært vanlig å registrere magasin vannstand en gang pr. uke helt fram til 2000-tallet. Der magasiner med ukedata inngår i tilsigsunderlaget, vil flomtilsig bli systematisk underestimert. Det er også viktig at forholdet mellom magasin vannstand og magasin volum er korrekt for alle aktuelle vannstander (fra LRV til noe over HRV). I enkelte situasjoner er det verken flomtap eller tapping fra et magasin under stor flom. Da blir tilsiget beregnet som kun en funksjon av volumendringen i magasinet, slik det for eksempel var i Møsvatn under storflommen i 1927. Beregnet maksimalt døgntilsig til Møsvatn under denne flommen er  $660 \text{ m}^3/\text{s}$ . I Møsvatn er beregnet sjøareal ved LRV ca.  $30 \text{ km}^2$  økende til ca.  $76 \text{ km}^2$  ved HRV. Ved de vannstander en hadde da tilsiget kulminerte i 1927 er beregnet areal ca.  $57 \text{ km}^2$ . Hvis korrekt sjøareal ved 1927-vannstanden skulle vært 5 % større/mindre, ville også beregnet tilsig blitt tilsvarende større/mindre (ca.  $\pm 30 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Dette er et godt eksempel på at gode magasinkurver (vannstand mot volum eller sjøareal) er viktig.

Bruk av usentrerte differanser vil gi høyere flomtopper i tilsigsseriene enn ved bruk av sentrerte differanser. Unøyaktighet/støy i magasin data kan forårsake falske flomtopper. Det er derfor viktig å sjekke at de største beregnede flomtilsigene ikke skyldes feil i grunnlagsdataene. Gode magasin data er av avgjørende betydning for å få pålitelige flomtilsig.

Regneeksemplene fra Vangsvatnet (kap. 2.1.1), viser imidlertid at om en har data med fin tidsoppløsning (1 time eller mindre), blir forskjellen i beregnet tilsig ved bruk usentrerte og sentrerte differanser vesentlig redusert. Også forskjellen mellom ulike varianter av usentrerte differanser viskes mer eller mindre ut når tidsoppløsningen på grunnlagsdataene blir mindre.

Ofte er det ingen direkte målinger av overførte vannmengder inn eller ut av et nedbørfelt via bekkeinntak osv. Hvis dette er tilfelle, vil en ofte måtte beregne den overførte vannmengden ved skalering av en representativ uregulert stasjon. Dette har ikke vært nødvendig for de tilsigsseriene som er presentert i denne rapporten, da det her kun har vært interne overføringer innen vassdraget.

## 5.2 Bruk av seNorge data

Nedbørserier ble først benyttet til å kalibrere vassdragsmodellene (HEC-HMS), men det ble fort klart at kun nedbør underestimerer smelte- og kombinasjonsflommene. Det må derfor også etableres snørutiner i modellene for å få nok vann i smelteperiodene. Dette ble vurdert som alt for tidkrevende for dette prosjektet og i tillegg er det store usikkerheter i både snø-data og kalibreringsverdier.

I seNorge finnes det allerede en snømodell (Saloranta, 2016) og et interpolert nedbørgid (Lussana mfl., 2018) som dekker hele Fastlands-Norge, med et 1 km x 1 km grid (<http://www.seNorge.no/>). Datasett fra seNorge kan hentes ut både som griddete tidsserier eller tidsserier midlet over et definert areal. Det ble tatt ut tidsserier som innholdet sum regn og snøsmelting (vanntilførsel/RoS) definert for hvert enkelt delnedbørfelt. For Randsfjorden ble det benyttet tidsserier av griddete data.

Ved å bruke tidsserier med RoS-data fra seNorge, er det ikke behov for å bruke snørutiner i nedbør-avløpsmodulen i HEC-HMS. Dette sparer vesentlig tid i kalibreringen av modellen. I vassdragsmodellene for Målselvvassdraget, Tinnvassdraget og Randsfjorden ga RoS-data (som eneste inngangsdata) tilfredsstillende til gode kalibreringer og tilpasninger til vannføringsserier ved målestasjoner.

Tilpasningen i modellene er i stor grad avhengig av hvor gode tidsseriene av vanntilførsel er. Kvaliteten i tidsseriene vil gjenspeile observasjonsgridene av nedbør og hvor godt snømodellen i seNorge presterer. Det kan nok derfor være regionale og lokale forskjeller i hvor representative gridene med vanntilførsel er.

I kapittel 4.2.2.3 sammenlignes ekstremverdier over ulike varigheter av vanntilførsel (RoS-data) fra seNorge, midlet over hhv. totalfeltet til Målselvvassdraget og Tinnvassdraget, med arealkorrigert ekstremnedbør utarbeidet av MET. Dimensjonerende verdier av vanntilførsel ligger vesentlig lavere sammenlignet med de dimensjonerende nedbørverdiene som ble beregnet for damsikkerhet for Målselvvassdraget og Tinnvassdraget. Dette ser spesielt ut til å gjelde varigheter fra 1 – 3 døgn, mens over lengre varigheter er forskjellene mindre. Dette kan være noe av årsaken til at seriene med vanntilførsel stedvis gir for lite vann i de store flomepisodene. Det kan være flere årsaker til dette avviket. For det første går både regn og snøsmelting inn i beregningen av dimensjonerende vanntilførsel, mens MET sine verdier er kun beregnet for nedbør. Det kan også stilles spørsmål ved om noe av avviket mellom de to tilnærmingene kan forklares med at arealreduksjonsfaktoren som anvendes er for liten. Verdiene for Målselvvassdraget er ikke korrigert for at de er utarbeidet for ulike feltstørrelser og/eller ulike sesonger, dette kan for Målselvvassdraget også være noe av årsaken til det store avviket mellom MET sine verdier og verdier fra RoS-data.

Ved sammenligning med observert volum ved målestasjonene i Målselvvassdraget og volumet fra rådataene til RoS-tidsseriene, ser vi at RoS-data gir mye lavere volum sammenlignet med observert volum (Tabell 8). Grovt sett ser vi at RoS tilsvarer omkring 50-60 % av observert volum. For simulert vannføring i modellen er det totale volumet mer sammenlignbart. Dette er tilpasset gjennom grunnvannstilsiget («baseflow») som kommer som et tillegg (og kan variere avhengig av kalibrering). I gjennomsnitt tilsvarer da simulert volum omkring 80-90% av observert volum. Dette viser at RoS-data fra

seNorge gir for lave verdier. En alternativ løsning kunne vært å korrigere RoS-dataet istedenfor å øke grunnvannstilsiget.

Den statistiske modelleringen av RoS ble utført ved å tilpasse en GEV-fordeling til de årlige maksimalverdiene for ulike varigheter. En utfordring med denne tilnærmingen er at ulike prosesser (regn og snøsmelting) blandes. En alternativ tilnærming kunne vært å tilpasse GEV-fordeling til regnedbør og deretter legge til snøsmelting slik det gjøres i f.eks. i PQRUT. Utfordringen med denne tilnærmingen er å bestemme hvor mye snøsmelting som skal kombineres med den dimensjonerende nedbørhendelsen.

For å beregne romlig fordeling av ekstreme RoS-hendelser, brukte vi de romlige fordelingene til de største 1-døgn hendelsene. Med denne tilnærmingen antar vi at seNorge data beskriver godt den romlige variasjonen i nedbør og snøsmelting. I områder med glissent nettverk av målere eller med store romlige variasjoner i nedbør pga topografi, er det mulig at seNorge undervurderer den romlige variasjonen. 1-døgns RoS ble valgt siden da kan vi få større romlig variasjon sammenlignet med lengre varigheter. Siden vi her først og fremst ønsket å evaluere hvor følsomme beregnede flomtopper er med hensyn til romlig fordeling, er dette en robust tilnærming. En mulighet for videre arbeid er å lete etter den mest sannsynlige romlige fordelingen av nedbør for ekstreme hendelser.

### 5.3 Vassdragsmodeller

I dette prosjektet har vi satt opp vassdragsmodeller for fire ulike vassdrag (nærmere beskrevet i kapittel 3). Alle modellene beskriver relativt store vassdrag, fra Tovdalsvassdraget som er det minste feltet på litt under 1900 km<sup>2</sup> til Målselvvassdraget som er det største på nesten 5600 km<sup>2</sup>. I tillegg har vi Randsfjorden og Tinnvassdraget som begge er på omkring 3700-3800 km<sup>2</sup>. Antall modellerte reguleringsmagasin i modellene er fra 3 (Målselvvassdraget) til 7 (Randsfjorden). Med unntak av Tovdalsvassdraget, er ikke de uregulerte innsjøene modellert spesielt.

Vassdragsmodellene er satt opp på litt ulike måter, dette er både av praktiske hensyn med tanke på bla. tidsbruk, men det var også et ønske om å se på ev. ulikheter i resultater som følge av ulik detaljeringsgrad i modellene. Antall delfelt benyttet i modellene varierer fra 4 til 87, med en gjennomsnittlig delfeltstørrelse fra omkring 20- til 950 km<sup>2</sup>.

Vi kan ut fra studiene i dette prosjektet se at selv enkle modeller, slik som modellene for Tinnvassdraget og Målselvvassdraget, kan gi gode modellresultater av både vannføringer og vannstander. Det er viktig med en god oversikt over manøvreringen i vassdraget, og tilgang til kraftverksdata (magasin vannstander, driftsvannføringer, luketappinger osv.) av god nok kvalitet. Kalibreringen og verifiseringen av modellene er avhengig av dette.

En stor utfordring knyttet til bruk av alle typer modeller, også vassdragsmodeller, er kalibreringen. Dette er igjen avhengig av en rekke faktorer så som hvor gode observasjonsdata det finnes tilgjengelig, hvor representativ inngangsdataene er (tilsigsserier, nedbør, snøsmelting, temperatur osv.) og hvor god kontroll en har over hydrauliske konstruksjoner (overløp, luker osv.) og magasinkurver. Alle de nevnte faktorene bidrar til usikkerheten i modellen, men det er mulig å minimere denne usikkerheten. Eksempelvis kan hydrauliske konstruksjoner og magasinkurver kontrollmåles og/eller måles opp på nytt, kvaliteten på observerte tidsserier kan forbedres og det kan etableres nye målestasjoner.

Ved valg av kalibreringsperiode er flere ting viktig, deriblant gode data i periodene for kalibrering og verifisering. Hvis modellen skal anvendes til å simulere flomvannføringer, er det viktig å velge en periode som inneholder en eller flere store flomhendelser. Lengden på kalibreringsperioden er også av betydning. Ut fra bl.a. erfaringer med kalibrering av Måselvmodellen ser vi at det er viktig at kalibreringsperioden starter før flomhendelsen inntreffer. Dette kan ellers føre til kunstig store vannføringer i lavvannsperiodene (grunnvannstilsig/baseflow) som i sin tur kan føre til overestimert vannføring i andre flomhendelser. Se eksempel på dette beskrevet i kapittel 3.2.1.3 og Figur 21.

I modellene som er benyttet i denne studien, ser det ut til å være lite å hente på økt modellkompleksitet i form av inndeling i mange delfelt. Mange delfelt medfører økt tidsbruk i kalibreringen. Det vil også være mer arbeid ved konstruksjon av tilløpsflommer og nedbør- og/eller snøsmelteforløp. Minimum antall delfelter vil også være avhengig av antall elementer som overføringer, magasiner, kraftverk og ønskede beregningspunkter. Vi ser også at store magasiner generelt har større betydning for flomdemningen i vassdraget sammenlignet med små magasiner. Det kan derfor vurderes om f.eks. små magasiner kan utelates i modellen.

Komplekse modeller er generelt mer uoversiktlige, og det kan være mer utfordrende å oppdage feil i modellen. Det vi bl.a. erfarte er at, ved å velge mange små delfelt kan det bli mer tid- og arbeidskrevende å teste ulike typer analyser. Modellene blir også mer komplekse og dermed mer utfordrende (og tid- og kostnadskrevende) å oppdage ev. feil og/eller feilsøke urimelige resultater. Hvis det imidlertid er et ønske å vurdere sårbare punkter langs et vassdrag, kan det være behov for å modellere mange små delfelt med detaljerte beskrivelser av elvegeometri og innsjøer.

## **5.4 Variasjon av startvannstander i magasin – reguleringsgrad**

Hvordan påvirker reguleringer store flomhendelser og hva er betydningen av ledig magasinivolum før eller under flommen? Dette er et spørsmål som stilles ved mange ulike anledninger og er utfordrende å gi noe godt og entydig svar på. I Engeland og Væringstad (2020) er det gjort en litteraturgjennomgang med bl.a. fokus på hvilken effekt vassdragsreguleringer har på store flommer. Generelt viser studier som sammenligner flomforholdene før og etter vassdragsreguleringer at flomtopper reduseres. Men når reguleringskapasiteten er redusert pga. fulle magasiner, kan reguleringer føre til større flommer enn naturlig (Batalla et al., 2004). Dette er demonstrert for Sollefå i Sverige (Bergström, 1999). Der viser de også til at det er spesielt flommer om våren som blir dempet mest av vassdragsreguleringer og at vassdragsreguleringer gir større variasjon i flomstørrelser.

I dette prosjektet er det sett på hvordan ulike initialtilstander i magasinene påvirker avløpsflommene i våre vassdragsmodeller. Dette er nærmere beskrevet i kapittel 4.1. Resultatene viser forskjeller mellom vassdragene, men noen generelle trekk går igjen. Vi ser at de ekstreme flommene generelt dempes mindre enn de store flommene, men ved stor ledig magasin kapasitet kan vassdragsreguleringene fremdeles ha en dempende effekt, selv på de ekstreme flomhendelsene.

Ved ekstrem flom viser våre eksempler at flomtoppen grovt sett reduseres med 5 – 15 % per 5% økning av reguleringsgraden inntil ca. 20 %. Relativt størst reduksjon er det for Altevatn i Måselvvassdraget med ca. 15 % reduksjon, mens for de større magasinene er reduksjonen minst for Randsfjorden med 5 – 10 %.

Ut fra dette er det rimelig å anta at ledig magasinkapasitet i starten av et flomforløp vil kunne redusere flommene, også for ekstreme flommer. Svært forenklet kan en si at i våre eksempler gir en ledig magasinkapasitet på 5 – 10 % ved flommens start, en reduksjon av avløpsflommene med 10 – 20 %.

Det vil alltid være unntak fra dette, som avhenger av blant annet utformingen på flomløpet for det enkelte magasin, størrelsen på magasinet og oppstrøms magasin, skjevfordeling av nedbør/snøsmelting mellom ulike delfelt i en ekstremisituasjon og varigheten av flommen. For eksempel viser analysene i denne rapporten at med langvarig flomforløp til Dokkfløyvatn, er det ingen flomreduksjon med en aktuell reguleringsgrad på 10 % ved starten av forløpet. Beregningene for Tinnsjøen viser at med den mest ugunstigste skjevfordeling av nedbør/snøsmelting, utlignes virkningen av en ledig magasinkapasitet på 25 %, dvs. tilnærmet samme avløpsflom som ved jevn fordeling og HRV i alle magasin. Andre studier, som for eksempel av 200-årsflom i Orkla (Hansen 2018), gir derimot en flomdempning på ca. 60 % med 10 % ledig reguleringskapasitet ved flommens start.

Som ventet har store magasin med stor reguleringsgrad størst dempningseffekt. I små magasiner som ligger nedstrøms store magasin styres dempningen av to faktorer, egen demping av tilsiget fra lokalfeltet og dempningen i oppstrøms magasin. Ved stor ledig magasinkapasitet i oppstrøms magasin kan hele tilsiget i flomperioden holdes igjen og det er kun lokaltilsiget og flomdempningen i nederste magasin som har betydning. Ved høye fyllingsgrader og/eller ekstreme flommer styres dempningen nesten utelukkende av de store magasinene.

Kapasitet til overløp og ev. tappeorgan og manøvreringen av disse påvirker også hvor stor avløpsflommen blir nedstrøms og hvor mye av flommen som kan holdes igjen i magasinene. Ved brede overløp eller når dammen overtoppes, vil dempningseffekten i magasinet over HRV være liten. En kan dermed oppleve terskeeffekter, hvor avløpsflommen øker raskt etter at magasinet når HRV. Hvordan dempningseffekten er nedover i vassdraget avhenger da av når oppstrøms magasiner er fulle. Om dette inntreffer før kulminasjon av tilløpsflommen, blir dempningen i kulminerende avløpsflom liten. Volumet vil likevel være redusert, og det vil gi en positiv effekt for nedstrøms magasin.

## **5.5 Simuleringer med ulike forløp**

### **5.5.1 Plassering av nedbørtoppen på ulike tidspunkter gjennom forløpet**

I analyser beskrevet i kapittel 4.2.1 er det sett på effekten av ulik plassering av nedbørtoppen i forløpet. Det er sett på både effekten i simuleringer av tilløpsflommen og avløpsflommen etter ruting. Resultatene viser at flomtoppen øker noe når nedbørtoppen plasseres seinere i forløpet. Dette er som ventet, både ut fra litteraturstudien beskrevet nærmere i kapittel 1.1 og ut fra generell erfaring og antakelser benyttet i Norge. Videre

ser vi at plassering av nedbørtoppen har forholdsvis liten effekt på kulminasjonsflommen i små nedbørfelt.

Tilsvarende er det også for små og store magasiner. Felles for nedbørfelt og magasiner er dermed at effekten, av hvor nedbørtoppen plasseres i forløpet, er liten der en har liten (selv)reguleringssevne, mens effekten er relativt sett større der en har stor (selv)reguleringssevne.

### **5.5.2 Romlig fordeling av vanntilførsel (arealfordeling)**

Vassdragsmodellene for Tinnvassdraget og Målselvvassdraget er benyttet til simuleringer av flomforløp basert på ulik romlig fordeling av vanntilførsel (RoS) mellom delfeltene i modellene. Forholdstall, tatt ut fra historiske fordelinger av vanntilførsel, ble benyttet til å fordele forløpet av vanntilførsel mellom delfeltene, på en slik måte at summen (volumet) over hele vassdraget ble bevart mellom de ulike fordelingene. Det var dermed mulig å undersøke hvor stor betydning arealfordeling av vanntilførsel har på variasjonene i flomtoppene i vassdraget (for nærmere beskrivelse se kapittel 4.2.2).

I Målselvvassdraget varierte avløpsflommen med ca. +/- 10 % som følge av forskjellig arealfordeling når initialtilstanden ble satt til HRV i alle magasiner. Videre ser vi at for flommen, hvor vanntilførselen var jevnt fordelt over vassdraget, lå nært gjennomsnittet til de 30 historiske arealfordelingene.

I Tinnvassdraget varierte avløpsflommen med ca. +/- 5% som følge av forskjellig arealfordeling når initialtilstanden ble satt til HRV i alle magasiner. Videre var det tydelig at effekten av arealfordelingen av vanntilførsel var viktigere (ga større utslag) dess lavere vannstanden i magasinene var ved simuleringstart.

I vassdrag med store reguleringsmagasiner høyt oppe i nedbørfeltet, som eksempelvis i Tinnvassdraget eller Barduelv i Målselvvassdraget, vil en med tilgjengelig magasinkapasitet kunne redusere tilsiget fra arealene oppstrøms magasinene betraktelig, og det vil være det uregulerte lokaltilsiget som bestemmer hvor stor flommen blir.

### **5.5.3 Fordelinger av vanntilførsel i tid (tidsfordeling)**

I tillegg til å se på historiske arealfordelinger av vanntilførsel (RoS), ble det også sett på historiske fordelinger i tid. Denne analysen ble kun utført for Målselvvassdraget og det ble kun sett på resultatene ved utløpet i modellen, for nærmere beskrivelse se kapittel 4.2.2.1.

Det ble utført tre ulike analyser:

- analyse 1 og 2 (med vanntilførsel over hele forløpet, 31 dager, og noe ulikt volum mellom hendelsene) ble det brukt to ulike initialtilstander:
  - analyse 1: HRV
  - analyse 2: observert vannstand (under HRV)
- analyse 3 (vanntilførsel over 7 dager, likt volum for alle historiske hendelsene) ble initialtilstand i magasinene satt til HRV.

I analyse 1 (startvannstand på HRV) varierte flomvannføringen med +/- 15-20 %. Analyse 2 (startvannstand under HRV) gav en noe større variasjon på flomvannføringene,

+/- 20-25 %, men i gjennomsnitt omkring 10 % lavere flomtopper. Med andre ord er vassdraget mer følsomt for variasjon av vanntilførsel i tid, ved lavere fyllingsgrad i magasinene sammenlignet med høyere fyllingsgrad.

I analyse 3 varierte kulminasjonsverdien med omkring +/- 20 %, men her ser vi særlig en avvikende verdi (Figur 69), uten den blir variasjonen ca. +/- 10-15 %.

Ut fra disse analysene ser vi at ved å variere forløpet av vanntilførsel i tid, men samtidig beholde det totale volumet, varierer de maksimale flomverdiene med omkring +/- 15-25 %. Variasjonen øker med økende tilgjengelig magasinkapasitet.

### **Sammenligning av IVF-verdier fra vanntilførsel data fra seNorge med IVF-nedbørdata utarbeidet av MET**

I kapittel 4.2.2.3 sammenlignes IVF-verdier beregnet fra tidsserier av vanntilførsel hentet fra seNorge med ekstremnedbør utarbeidet av MET. Verdiene basert på Vanntilførsel ga mye lavere estimater sammenlignet med nedbørverdiene fra MET. Verdiene er ikke direkte sammenlignbare pga. store ulikheter i forutsetningen ved utarbeidelsen av disse dataene (deriblant helt ulik størrelse på nedbørfeltet til Måselvassdraget sammenlignet med tilgjengelige arealreduksjonsfaktorene for ekstremnedbøren). Dette er ikke korrigeret for, så dette bør undersøkes mer for å si noe generelt om forskjellene.

Hvis det korrigeres slik at verdiene for varigheten 1-døgn blir like, så er forholdet fra 1-døgn varighet og til lengre varigheter likevel forholdsvis like i de to ulike metodene. Dette passer noe bedre for Tinnvassdraget enn for Måselvassdraget, der det først etter varigheter fra 3-døgn blir godt samsvar.

## 6 Oppsummering

Det er store forskjeller mellom vassdrag og hvordan vassdragsreguleringene påvirker flommer. Dette skyldes en kombinasjon av mange faktorer. Noen av de viktigste faktorene er:

- Reguleringsgrad og aktuell reguleringsgrad: hvor store og hvor mange reguleringsmagasin det er i vassdraget, samt hva er fyllingsgraden ved starten av en flom.
- Plasseringen av magasiner i vassdraget (høyt oppe, langt nede, serie av magasiner) og hvordan disse demper og forsinker flommer i forhold til hverandre.
- Utformingen av overløp. Hva er reguleringssevnen over HRV og vil det oppstå terskeeffekter når flommene går til overløp eller overtopper dammen.
- Kapasiteten i kraftverk og ev. tappeanordninger og hvordan de manøvreres.
- Feltets naturlige egenskaper, som kan variere mye fra vassdrag til vassdrag, vil også påvirke responsen på de store flommene, også der selve reguleringen ellers er lik mellom vassdragene. Eksempelvis vårflom, høstflom, flomsesong, flomvolum, raskt felt, tregt felt osv.

Grunnet store forskjeller mellom ulike regulerte vassdrag er det ikke mulig å si noe helt konkret (tallfestet) hvor mye vassdragsreguleringene påvirker store flommer. Likevel ser vi, ut fra resultater i dette prosjektet, at ledig magasin kapasitet i starten av flomforløpet vil kunne føre til noe reduserte flommer også for de ekstreme flommene. Svært forenklet ser vi, ut fra våre eksempler, at aktuell reguleringsgrad på 5 – 10 % ved flommens start, gir en reduksjon av avløpsflommene med 10 – 20 %. For å tallfeste denne effekten for et konkret vassdrag vil utarbeidelse av en vassdragsmodell langt på vei svare på dette, men det finnes utallige kombinasjoner av manøvrering og flomforløp som vil gi litt ulike svar.

Ut fra våre undersøkelser der vi varierte vanntilførselen i vassdraget i tid eller rom fant vi et felles trekk – effekten av ulik areal- eller tidsfordeling av vanntilførsel var viktigere (ga større utslag) dess lavere vannstanden i magasinene var ved simuleringsstart.

I Målselvmodellen så vi også at avløpsflommen var mer følsom for endringer av forløpet i tid enn for endringer i den romlige fordelingen (arealfordelingen).

### Tilsigsserier

I et regulert vassdrag kan gode tilsigsserier konstrueres dersom en har gode vannhusholdningsdata. Ved forholdsvis enkle beregninger kan en få god kontroll på hvor mye vann som renner inn i magasinene og dataene kan danne et godt grunnlag for både kalibrering og verifisering av vassdragsmodeller. Gode tilsigsserier og tilsigsserier kan bidra til å redusere usikkerheten i flomberegninger for et magasin eller vassdrag. Flomberegninger som utføres med tanke på damsikkerhet skal klassifiseres med hensyn på datagrunnlaget. Gode tilsiggsdata kan gi grunnlag for en bedre klasse enn om slike data ikke benyttes. Dette kan ha betydning for størrelsen til et evt. sikkerhetspåslag som NVE kan legge på de dimensjonerende flomverdiene.



## **Tidsserier av vanntilførsel fra seNorge**

Erfaringene våre i dette prosjektet er at bruk av vanntilførseldata fra seNorge både er effektivt, fleksibelt og enkelt å bruke. Vanntilførseldata fra seNorge ble brukt til kalibrering av vassdragsmodellene med tilfredsstillende resultater. Vi mener at bruk av vanntilførseldata fra seNorge (eller andre data som eksempelvis nedbør, snøsmelting og temperatur) er godt egnet til eksempelvis kalibrering av vassdragsmodeller, spesielt dersom en ikke har gode observasjoner av nedbør, temperatur og snø i det aktuelle feltet. Selv med observasjoner i vassdraget kan seNorge data være et godt utgangspunkt eller nyttig tilleggsinformasjon. Imidlertid ser vi i denne studien at volum for vanntilførsel data fra seNorge er mindre enn volum for observerte vannføringsserier. En stor ulempe ved bruk av seNorge data er også at det foreløpig ikke går an å laste ned denne typen data selv fra seNorge.

## **Vassdragsmodeller**

Modeller med mange beregningslementer krever mye bearbeiding av data, kalibreringen kan være tidkrevende og det er vanskelig å oppdage feil. Enkle vassdragsmodeller med få delfelt kan gi gode tilpasninger til både vannføringer og vannstander, selv i store nedbørfelt. Men det er viktig med tilgjengelige observasjoner av vannhusholdningsdata med god nok kvalitet for å kalibrere og verifisere modellene. Vi vurderer vassdragsmodeller som et godt verktøy for å se på hvordan reguleringer påvirker flommer i et spesifikt vassdrag. Eksempelvis å vurdere hvordan flommene påvirkes av ulike initialtilstander i magasinene.

## **Forløp**

Ved å endre plasseringen av den mest intensive vanntilførselen eller nedbøren i forløpet, har vi sett på utslaget i flomtoppene. Ikke uventet ser vi at flommen øker når toppen plasseres sent i forløpet. Relativt sett er effekten større for nedbørfelt med stor selvreguleringssevne (store felt) og/eller høy reguleringsgrad (store magasin og/eller innsjøer) enn for små, raske felt.

For Måselvvassdraget ble det også sett på hvordan ulike fordelinger av vanntilførsel gjennom selve forløpet (fordeling i tid) påvirket flomverdiene ved utløpet i modellen. Generelt varierte den maksimale vannføringen med omkring +/- 20 %. Videre kunne vi se at variasjonen i flomverdier økte noe med lavere vannstand i magasinene ved simuleringstart (selv om de maksimale flommene i gjennomsnitt ble noe redusert). Med andre ord er vassdraget mer følsomt for variasjon av vanntilførsel i tid ved lavere fyllingsgrad i magasinene sammenlignet med høyere fyllingsgrad.

## **Romlig fordeling av vanntilførsel**

En nokså vanlig antakelse i en flomberegning og der en utfører ruting, er å fordele nedbør eller tilsiget jevnt over vassdraget. Ved å fordele vanntilførselen ulikt over vassdraget, er det i denne studien sett på hvilken effekt dette har for avløpsflommen.

I Tinnvassdraget ga situasjoner der lokalfeltet til Tinnsjøen fikk mest vanntilførsel større flommer sammenlignet med simuleringer hvor vanntilførselen ble fordelt likt (jevn fordeling) over hele vassdraget. Mer interessant var det at jevn fordeling over feltet ga mindre avløpsflom enn gjennomsnittet av simuleringene med ujevn fordeling. De ulike

simuleringene ga et avvik fra jevn fordeling på omkring +15 til -5 prosent. Det finnes dermed noen kombinasjoner som er mer eller mindre gunstig enn det jevn fordeling vil gi.

I Måselvassdraget kunne vi se at kulminasjonsverdien fra de ulike forløpene varierte med ca. +/- 5 % og at den gjennomsnittlige vannføringen fra de 30 ulike fordelingene og kulminasjonsvannføringen med jevn fordeling av vanntilførsel (uten arealfordeling) var nesten like.

For Tinnvassdraget ble det også utført simuleringer med varierende initialvannstander og historiske arealfordelinger av vanntilførsel for å se på de kombinerte effektene.

Simuleringene viste at arealfordelingen av vanntilførsel var mindre viktig (ga mindre spredning i simulerte flomverdier) når startvannstanden ble satt til HRV sammenlignet med alle andre startvannstander. Dette er en effekt av at en ved startvannstand på HRV har overløp gjennom hele hendelsen og at nær sagt alt vannet uansett renner ned til Tinnsjø. Med startvannstander under HRV vil vann holdes tilbake i de øvre magasinene og bidragene fra oppstrøms magasiner til Tinnsjø vil være mer avhengig av størrelsen på de respektive lokaltilsigene. Simuleringene viste at den mest ugunstige arealfordelingen av vanntilførsel sammen med 75 % fyllingsgrad som initialtilstand ga tilnærmet samme avløpsflom som simuleringen med HRV i alle magasiner og jevn vanntilførsel over hele vassdraget. Simuleringene for Tinnsjø viser altså at arealfordelingen av vanntilførsel (ugunstigste arealfordeling) i seg selv nærmest utligner dempningseffekten av 25 % tilgjengelig magasin kapasitet ved simuleringstart.

# 7 Anbefalinger

## Datagrunnlag

### *Tilsigsserier*

- Vi anbefaler alle dameiere å kvalitetskontrollere sine kraftverksdata (magasin vannstander, driftsvannføringer, overførte vannmengder, tapping gjennom luker osv.) for å kunne konstruere tilsigsserier, og ev. utføre tiltak hvis det ikke er god nok kvalitet på dataene.
- Vi anbefaler at NVE tilrettelegger programvare for å lage tilsigsserier på en brukervennlig måte også for eksterne. Dette kan både senke terskelen for å lage tilsigsserier og gi NVE bedre tilgang til grunnlaget og fremgangsmåten for beregning av tilsigsseriene laget av eksterne.
- Vi anbefaler at tilsigsseriene som ligger i NVEs database tydelig markeres mht. hvilken metode (usentrerte/sentrerte differanser ved beregning av magasinendringer) som ligger til grunn, og om det er perioder (fra år - til år) som ikke egner seg for flomanalyser, for eksempel fordi magasin vannstander kun er registrert en gang pr uke.
- Vi anbefaler at NVE avklarer metodikk for den “mest korrekte” metoden for beregning av tilsigsserier som skal anvendes til flomberegninger (f.eks. bruk av usentrerte differanser med “backward” magasinendringer).

### *seNorge data*

- Vi anbefaler at NVE prioriterer utvikling av en løsning der brukerne selv kan definere og laste ned tidsserier for egendefinerte polygoner fra seNorge (et slikt arbeid planlegger NVE igangsatt i 2022). Dette vil blant annet gi bedre mulighet for å vurdere romlig variabilitet av nedbør og snømagasin i store og komplekse nedbørfelt. Dette kan bidra til mer robuste flomberegninger. Ved å tilrettelegge og bedre tilgangen til seNorge-data, vil det forenkles og kunne øke bruken av dette produktet. Dette vil øke den samfunnsnyttige verdien av disse dataene, samtidig som økt bruk vil kunne føre til nyttige tilbakemeldinger og mulighet til ytterligere forbedringer av datasettet.

## **Arealreduksjonsfaktor (ARF)**

Vi anbefaler at det ses nærmere på dagens anbefalte verdier av arealreduksjonsfaktorer. Denne faktoren er spesielt viktig for å beregne dimensjonerende nedbør i store vassdrag.

Resultatene fra denne studien viste at det var svært stor forskjell på ekstremverdiene beregnet fra seNorge-data (RoS) og de verdier en får fra dagens tilnærming, hvor det tas utgangspunkt i punkt nedbør for så å foreta en reduksjon basert på nedbørfeltstørrelse og varighet.

I det pågående prosjektet ClimDesign (finansiert av Norges forskningsråd), er en viktig oppgave å forbedre beregningen av arealreduksjonsfaktoren basert på å bruke et rikt utvalg av nedbørdata.

## **Vassdragsmodeller**

Vi anbefaler bruk av vassdragsmodeller når det er behov for å vurdere hvordan store flommer påvirkes av vassdragsreguleringen i et spesifikt vassdrag, eksempelvis når det skal vurderes hvor mye startvannstanden i magasinene(et) påvirker flommene nedstrøms. Videre anbefaler vi å forenkle vassdragsmodeller så mye så som mulig i forhold til problemstillingen.

I litteraturstudien var det eksempler på:

- Vassdragsmodeller til konstruksjon av lange regulerte serier basert på simuleringer med standart manøvreringsreglement. Seriene kan egne seg til f.eks. flomfrekvensanalyse.
- Bruk av vassdragsmodeller til kontinuerlig eller semikontinuerlig simuleringer med historiske hendelser og i kombinasjon med værgenerator.

Dette har vi ikke rukket å se på her og anbefales for videre studier.

## **Fordeling av nedbør, vanntilførsel og tilsig**

Vi anbefaler at ulik romlig fordeling av tilsig mellom delfelter og ugunstig plassering av flomtoppen (nedbør/vanntilførsel/tilsig) innenfor forløpet blir vurdert. Resultatene bør presenteres som en del av sensitivitetsanalysen til flomberegningen. Dette kan gjøres ved at det utvikles verktøy der man kan bruke SeNorge data for å hente ut ulike romlige fordelinger av RoS for store hendelser.

## 8 Referanser

Andersen, J. H., Hjukse, T., Roald, L. og Sælthun, N. R. (1982). Hydrologisk modell for flomberegninger, Oslo, Norge.

Ayalew, T. B., Krajewski, W. F. og Mantilla, R. (2013). Exploring the effect of reservoir storage on peak discharge frequency, *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(12), 1697–1708, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000721, 2013.

Batalla, R. J., Gómez, C. M. og Kondolf, G. M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain), *Journal of Hydrology*, 290(1–2), 117–136, doi:10.1016/j.jhydrol.2003.12.002

Bergström, S.: (1999). Höga vattenflöden i reglerade älvar, (SMHI Fakta nr 1-1999).

Blasy – Øverland, 2019. Nedbør- avløpsmodell Tovdalsvassdraget. 30.09.2019. Dr. Blasy – Dr. Øverland Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG

Boughton, W. og Droop, O. (2003) Continuous simulation for design flood estimation – A review, *Environmental Modelling and Software*, 18(4), 309–318, doi:10.1016/S1364-8152(03)00004-5.

Bramselv J. P. (2017). Dambruddsbølgeberegning, Dam Rødhølen, DBBB rapport utarbeidet av Multiconsult på oppdrag for Statkraft, Dokument kode: 129201-RIVass-RAP-003. Devoli, G., Engen, I.K., Hoseth, K.A., Pettersson, L.E. (2013). Flom og skred i Troms juli 2012, Norges vassdrags- og energidirektorat, Rapport nr. 24/2013, Oslo, Norge.

Du, J., Zheng, D., Xu, Y., Hu, S. og Xu, C. (2016). Evaluating functions of reservoirs' storage capacities and locations on daily peak attenuation for Ganjiang River Basin using Xinanjiang model, *Chinese Geographical Science*, 26(6), 789–802, doi:10.1007/s11769-016-0838-6.

Engeland, K., Væringstad, T. (2020). Beregning av dimensjonerende flom i regulerte vassdrag – en litteraturstudie, Norges vassdrags- og energidirektorat, Rapport nr. 14/2020, Oslo, Norge.

Engeset, 2016, Hvordan lages vær- og snødata for seNorge.no og XGEO.no?, Dokumentasjon for seNorge.no, NVE, [https://www.nve.no/Media/4813/weatherandsnowdata\\_v2\\_no.pdf](https://www.nve.no/Media/4813/weatherandsnowdata_v2_no.pdf). Aksessert 7. februar 2021

Førland, E. J. (1992) Manual for beregning av påregnelige ekstreme nedbørsverdier, Oslo, Norge.

Førland, E. J. og Kristoffersen, D. (1989) Estimation of extreme precipitation in Norway, *Nordic Hydrology*, 20(4–5), 257–276, doi:10.2166/nh.1989.0020.

Glover, B., Sælthun N. R., Walløe, K. L. (2018) Verdien av vassdragsreguleringer for reduksjon av flomskader. Metoderapport utarbeidet av Multiconsult på oppdrag for Energi Norge. Dokument kode: 130698-RIVass-RAP-001.

Guo, S., Muhammad, R., Liu, Z., Xiong, F. og Yin, J. (2018) Design flood estimation methods for cascade reservoirs based on copulas, *Water (Switzerland)*, 10(5), doi:10.3390/w10050560, 2018.

Grøndal G. O., Berg, G. (2016) Altevassdammen Flomberegninger. Rapport utarbeidet av COWI i samarbeid med Verkis på oppdrag for Statkraft. Prosjekt nr: 12185001.

- Hallberg, K., German, J., Losjö, K. og Södling, J. (2016) Hög tillrinning i reglerade vattendrag, Energiforsk, Rapport 2016:320.
- Hansen, B. (2018) Flood dampening in hydropower systems, Masteroppgave fra NTNU, Trondheim, Norge.
- HEC-HMS, the Hydrologic Modeling System, US Army Corps of Engineering.  
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- Hydrologic Modeling system HEC-HMS, User's Manual,  
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx>
- Joos, B., Berga, L Micovic, Z., Muller, U., Kashiwa Yanagi, M. (2019) Flood evaluation, hazard determination and risk management, Flood Evaluation and Dam Safety Committee, ICOLD (Int. Comm. On Large Dams).
- Killingtveit, A. og Sælthun, N.-R. (1995) Hydropower development: Hydrology, NTNU, Trondheim, Norge.
- Kjeldsen, T.R. (2007). The Revitalised FSR/FEH Rainfall-Runoff Method. Flood Estimation Handbook Supplementary Report No. 1. Centre for Ecology & Hydrology.
- Lawrence, D. og Skaugen, T. (2018) Nedbør-avløps-modeller, in Nytt rammeverk for flomestimering i Norge: Sluttrapport fra forskningsprosjektet FlomQ, redigert av T. L. Thorarinsdottir, Energi Norge, Oslo, Norge.
- Lawrence, D., Paquet, E., Gailhard, J. og Fleig, A. K. (2014) Stochastic semi-continuous simulation for extreme flood estimation in catchments with combined rainfall–snowmelt flood regimes, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(5), 1283–1298, doi:10.5194/nhess-14-1283-2014.
- Lee, J. E., Heo, J. H., Lee, J. og Kim, N. W. (2017). Assessment of flood frequency alteration by dam construction via SWAT simulation, *Water (Switzerland)*, 9(4), 264, doi:10.3390/w9040264.
- López, J. og Francés, F. (2013) Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8), 3189–3203, doi:10.5194/hess-17-3189-2013.
- Lussana, C., Saloranta, T., Skaugen, T., Magnusson, J., Tveito, O. E., and Andersen, J.: seNorge2 daily precipitation, an observational gridded dataset over Norway from 1957 to the present day, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 235–249, <https://doi.org/10.5194/essd-10-235-2018>, 2018.
- Midttømme, G. H., Pettersson, L. E., Holmqvist, E., Nøtsund, Ø., Hisdal, H. og Sivertsgård, R. (2011). Retningslinjer for flomberegninger, Norges vassdrags- og energidirektorat, Rapport nr. 4/2011, Oslo, Norge.
- NERC (1975) Flood studies Report (five volumes), Natural Environment Research Council, UK.
- Paquet, E., Garavaglia, F., Garçon, R. og Gailhard, J. (2013). The SCHADDEX method: A semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation, *Journal of Hydrology*, 495, 23–37, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.04.045.
- Saloranta, T.M. (2016). Operational snow mapping with simplified data assimilation using the seNorge snow model, *Journal of Hydrology*, 538, 314-325, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.03.061.

de Souza, D. N., Studart, T. M. de C., Neto, I. E. L. og Campos, J. N. B. (2017) Flood damping by reservoirs: proposition of a graphical parametric method, Revista Brasileira de Recursos Hidricos, 22, doi:10.1590/2318-0331.0217170002.

seNorge.no <http://www.seNorge.no/>

Viard, T., Vermeulen, J., Idelon, C., Valley, P., Paquet, E. og Rouillon, N. (2019) Massive hydraulic simulation of extreme hydrological scenarios through dams and flood plains for dam safety analysis, in 11th ICOLD European Club Symposium Chania, Crete, 2-4 October 2019.

Wathne, M. and K. Alfredsen (1998). Effekten av regulering på flomdemping i Gudbrandsdalslågen [The effect of regulation on flood-dampening in Gudbrandsdalslågen]. HYDRA, SINTEF Bygg og miljøteknikk.

Weltzien, I. (2016a) Sammenligning av regulert og uregulert flom i Sira- og Kvinavassdraget, Norconsult, Oslo, Norge

Weltzien I. (2016b) Flomberegning for Devdisjavre, Dividalen kraftverk, rapport utarbeidet av Norconsult på oppdrag for Troms Kraft Produksjon AS, Oppdragsnummer: 5155973.

Xiong, F., Guo, S., Liu, P., Xu, C. Y., Zhong, Y., Yin, J. og He, S. (2019) A general framework of design flood estimation for cascade reservoirs in operation period, Journal of Hydrology, 577, doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124003.



NVE

## Norges vassdrags- og energidirektorat

---

MIDDELTHUNS GATE 29  
POSTBOKS 509 I MAJORSTUEN  
0301 OSLO  
TELEFON: (+47) 22 95 95 95

[www.nve.no](http://www.nve.no)