

Beregning av dimensjonerende flom i regulerte vassdrag – en litteraturstudie

.....

Kolbjørn Engeland, Thomas Væringstad



NVE Rapport nr. 17/2020

Beregning av dimensjonerende flom i regulerte vassdrag – en litteraturstudie

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Forfatter: Kolbjørn Engeland, Thomas Væringstad

Forsidefoto/fotograf: Grethe Holm Midttømme, NVE

ISBN: 978-82-410-2034-6

ISSN: 1501-2832

Sammendrag: Rapporten gir en litteraturoversikt om hvordan vassdragsreguleringer påvirker flomforhold, en oversikt over metoder som brukes for å beregne dimensjonerende flommer og en oversikt over hvilke metoder som anbefales brukt i flere land.

Emneord: Flomfrekvensanalyse, Dimensjonerende flom, Regulert vassdrag

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthuns gate 29

Postboks 5091 Majorstuen

0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95

E-post: nve@nve.no

Internett: www.nve.no

juni, 2020

Innhold

Forord.....	3
Sammendrag.....	4
1 Innledning.....	6
2 Effekt av vassdragsreguleringer på flomstørrelser	7
3 Beregning av dimensjonerende flom i regulerte vassdrag	11
3.1 Statistisk flomfrekvensanalyse på flom-data.....	12
3.2 Statistisk analyse på tilsigsserier og modell for flomdemping	13
3.3 Hendelsesbaserte metoder	16
3.4 Kontinuerlig simulering.....	17
3.5 Semikontinuerlig simulering	17
4 Retningslinjer i ulike land.....	18
5 Oppsummering	21
6 Referanser	22

Forord

I perioden 2019 – 2020 ble prosjektene «Flomberegninger i regulerte vassdrag» (internt NVE FoU prosjekt) gjennomført. Hovedmålet for prosjektet er å anbefale en tilnærming for å beregne dimensjonerende flommer og påregnelig maksimalflom i store regulerte vassdrag med mange reguleringsmagasin.

I denne rapporten gis det en litteraturoversikt om hvordan vassdragsreguleringer påvirker flomforhold, en oversikt over metoder som brukes for å beregne dimensjonerende flommer og en oversikt over hvilke metoder som anbefales brukt i flere land.

Litteraturstudiet vil være et viktig utgangspunkt for videre arbeid i prosjektet.

Oslo, juni 2020



Hege Hisdal
avdelingsdirektør



Elise Trondsen
seksjonssjef

Sammendrag

Ved beregning av dimensjonerende flom i et vassdrag med mange dammer og tilhørende reguleringsmagasin, bør man ta hensyn til hvordan vassdragsreguleringer påvirker flommer. Målet med denne rapporten er å gi en litteraturgjennomgang der vi fokuserer på hvilken effekt vassdragsreguleringer har på flommer og hvilke tilnærminger som brukes til å beregne dimensjonerende flommer i regulerte vassdrag, enten spesifisert ved et gjentakintervall eller som Q_{pmf} . Vi ønsker å oppsummere metoder som er presentert både i tekniske rapporter og i vitenskapelige artikler og gi en oversikt over anbefalinger fra flere land.

Litteraturgjennomgangen viser at effekten av vassdragsreguleringer på flom er sammensatt av flere faktorer, her er noen av de viktigste:

- Selve flomforløpet. Kortvarige flommer med en flomtopp dempes mest. For langvarige flommer, dempes flommen mest hvis den høyeste toppen kommer først. For de aller største flomhendelsene er dempingen pga vassdragsreguleringer minst.
- Andel av tilsiget som går gjennom vannkraftmagasinene. Flomdempingen øker med økende andel av tilsig som går gjennom vannkraftmagasin.
- Kapasiteten / reguleringsgraden til reguleringsmagasinene.
- Kapasiteten til tappeorganene, manøvreringen av reguleringsmagasinene, tappeorganer og overføringer under en flomhendelse.
- For enkelte flomhendelser fra Sverige er det vist at vassdragsreguleringer kan øke flomtoppen for langvarige flommer når reguleringsmagasinene blir fulle.

Følgende tilnærminger brukes for å beregne effekten av vassdragsreguleringer på flom.

- Rene statistiske metoder der det utføres flomfrekvensanalyse direkte på data fra periode med vassdragsreguleringer.
- Utføre flomfrekvensanalyse på uregulerte data, og bruke en modell for å beregne dimensjonerende flom for forhold under vassdragsreguleringer.
- Bruke en kombinasjon av hydrologiske modeller og vassdragsmodeller for kontinuerlig eller hendelses-basert simulering

Viktige typer modeller som tas i bruk er

- Statistiske modeller for ekstremverdianalyse og modeller for å beskrive samvariasjon i ekstremnedbør eller flom over et vassdrag.
- Nedbørssimulator for kontinuerlig eller hendelsesbasert simulering.
- Nedbør-avrennings-modell for kontinuerlig eller hendelsesbasert simulering.
- Hydraulisk modell for å beregne transport av vann i elver, innsjøer og reguleringsmagasin kombinert med modell / regler for manøvrering av reguleringsmagasin under en flomhendelse.

I Norske vassdrag har man ofte komplekse vannkraftsystem med mange reguleringsmagasin og overføringer. I mange vassdrag endrer reguleringer betydelig

flomregimet slik at det blir færre store vårflommer og flere høstflommer. Skal man oppnå mer kunnskap om hvordan vannkraftreguleringer påvirker flomforhold, må man ta i bruk vassdragsmodeller som inkludere hydrauliske modeller og moduler som beskriver manøvrering.

1 Innledning

Det er en velkjent hydrologisk kunnskap at et reguleringsmagasin demper flomtopper (Ayalew et al., 2013). En stor flom i et regulert vassdrag er et resultat av et komplekst samspill mellom hvordan ekstrem nedbør fordeler seg mellom ulike delfelt, og hvordan flomvannføringer transporteres nedover i vassdraget og gjennom de ulike reguleringsmagasinene, og hvordan reguleringsmagasinene manøvreres i forkant av og under en flomhendelse (Ayalew et al., 2013). Ved beregning av dimensjonerende flommer i regulerte vassdrag, bør man derfor ta hensyn til hvordan hele vassdragssystemet, spesielt reguleringsmagasinene, bidrar til å dempe, eller i noen tilfeller øke, flomvannføringen. For å beregne dimensjonerende flommer i regulerte vassdrag brukes det i dag to tilnærminger i Norge. Skal man gjøre flomberegninger for flomsonekart, deles, hvis mulig, vannføringsserier opp i perioder før og etter regulering. For høye gjentakintervall (gjærne større enn 200 år) antas det at flomstørrelsen i et regulert vassdrag er lik flomstørrelsen i et uregulert vassdrag eller nærmer seg denne (Kleivane, 2013). Dette betyr at man benytter resultatene fra en flomfrekvensanalyse i uregulert periode for å beregne flomstørrelser som har et gjentakintervall større enn 200-år. For lavere gjentakintervall brukes flomfrekvensanalyse på periode med regulerte data. For damsikkerhet (Midttømme et al., 2011) og dammer med store konsekvenser ved et dambrudd, må 1000-års flom (Q_{1000}) og påregnelig maksimalflom (Q_{pmf}) beregnes. For å estimere Q_{1000} anbefales det å utføre både en statistisk analyse på tilsigsserier eller uregulerte vannføringsserier og å bruke en nedbør- avløps modell. Et flomforløp konstrueres med en nødvendig varighet og slik at flomvolumet er ivaretatt. For Q_{pmf} , anbefales det å bruke nedbør- avløpsmodell og påregnelig maksimalnedbør, i kombinasjon med snøsmelting. Tilløpsflommen routes gjennom vassdraget der man setter initialtilstanden i alle reguleringsmagasiner på HRV. De to metodene som er skissert over kan gi ulike dimensjonerende flommer i samme vassdrag avhengig om beregningen skal brukes for flomsonekart eller damsikkerhet. Det er problematisk å kommunisere ut til kommuner og andre interessenter. Generelt er reglementet strengere for damsikkerhet og bør gi samme eller større flommer enn flomsonekart. Det er et ønske om at dimensjonerende flommer med samme gjentakintervall bør være den samme uavhengig av formål.

Utfordringen med å beregne dimensjonerende flom i regulerte vassdrag kan løses på flere måter, og hvilken tilnærming som anbefales varierer mellom land. Målet med denne rapporten er å lage en oversikt over hvilken effekt vassdragsreguleringer har på flommer og hvilke tilnærminger som brukes til å beregne dimensjonerende flommer i regulerte vassdrag, enten spesifisert ved et gjentakintervall eller som Q_{pmf} . Vi ønsker å oppsummere metoder som er presentert både i tekniske rapporter og i vitenskapelige artikler og gi en oversikt over anbefalinger fra flere land.

For å finne fram til faglitteratur på temaet har vi brukt og søkt både i Scopus og 'Google Scholar' I tillegg til å ta direkte kontakt med fagpersoner som jobber med dette temaet.

Siden dette temaet ofte er rapportert i tekniske rapporter eller 'grå litteratur' er det utfordrende å få tak i alt som er publisert, siden tekniske rapporter ikke alltid er referert i publikasjonsdatabaser (Scopus, Google Scholar), ikke tilgjengelige på nettsider, eller må kjøpes.

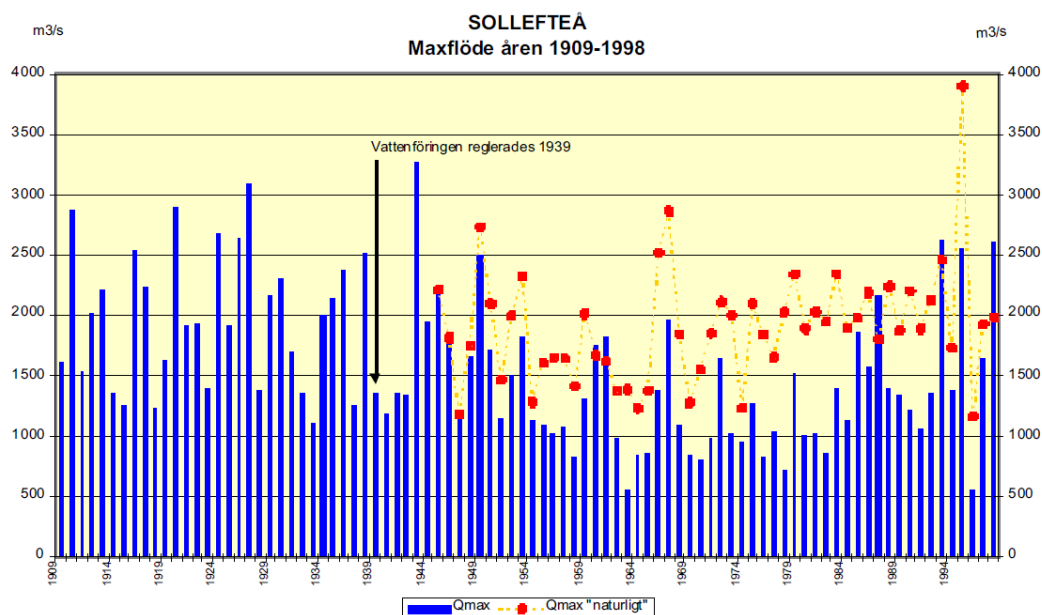
Vi har fått informasjon fra Sverige, Finland, Storbritannia, Frankrike, Østerrike, Australia, USA og Kina. Vi har vært avhengige av at retningslinjer er åpent tilgjengelige eller at vi har fått informasjon via e-post utveksling med fagpersoner i de respektive landene.

2 Effekt av vassdragsreguleringer på flomstørrelser

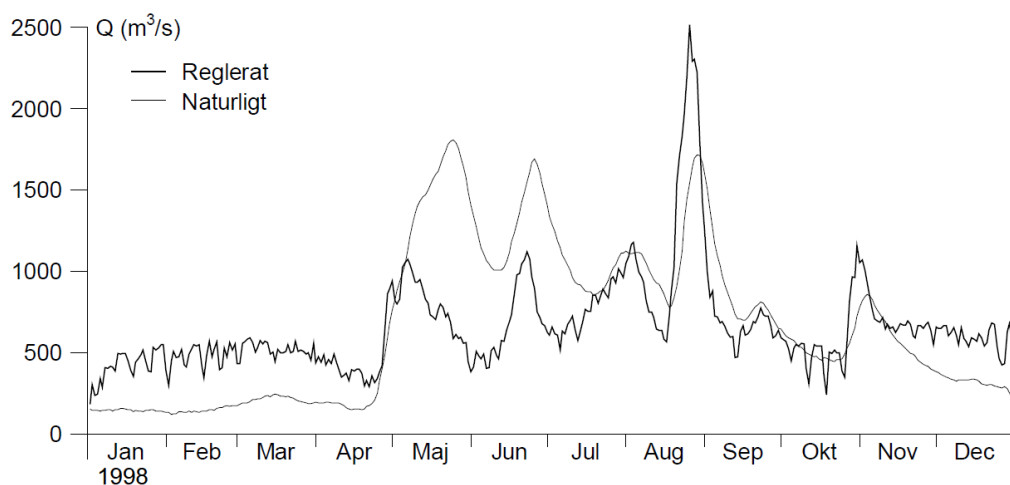
I flere studier analyseres effekten av vassdragsreguleringer på flomstørrelser, uten at det knyttes opp til å beregne et gjentakintervall for flommer. Generelt viser studier som sammenligner flomforholdene før og etter vassdragsreguleringer at flomtopper reduseres (Batalla et al., 2004).

I etterkant av ekstraordinære flomhendelser, er det flere studier som analyserer hvordan vassdragsreguleringer bidro til flomdempingen. Et eksempel er storflommen på Østlandet i 1995 der vassdragsreguleringer i Glomma og Lågen-vassdraget reduserte flomtopper (målt i m^3/s) med opp til 11% (Wathne and Alfredsen, 1998). De brukte en egenutviklet vassdragsmodell som simulerer transporten av vann i et regulert vassdrag som består av elver, tunneler, kraftverk og reguleringsmagasin. Et annet eksempel er uværet Synne i 2015 da det ble observert 2- og 3-døgnsnedbør med et gjentakintervall på over 100 år enkelte steder (Thyness et al., 2015). I Weltzien (2016) er det anslått at reguleringene i Sira-Kvina vassdragene enkelte steder reduserte flommen (målt i m^3/s) med over 50 prosent, og vannstanden i Sirdalsvatn og Lundevatn ble redusert med mellom 1,5 m og 2,5 m. HEC-RAS / HEC-HMS ble benyttet for beregningene i studiet.

I Bergström (1999) analyseres effekten av vassdragsreguleringer i etterkant av store flommer i Norrland, Sverige sensommeren 1998. Bakgrunnen var at man mistenkte at vassdragsreguleringene bidro til å øke flomtoppen. Resultatene viser at for de fleste flomhendelsene fører vassdragsreguleringer til lavere flomtopp (Figur 1). Men for enkelte flomhendelser, inkludert den i 1998, der reguleringsmagasinene ble fulle og dermed ikke hadde noe reguleringskapasitet igjen, førte reguleringene til større flommer (Figur 1 og 2). I Figur 2 vises forløpet for flommen i 1998, og vi ser at flommen i august-september 1998 ble forsterket av vassdragsreguleringene, mens flommene tidligere på året ble dempet av vassdragsreguleringene. Bergström (1999) viser også at det er spesielt vårflommer som blir dempet av vassdragsreguleringer og at reguleringer fører til større variasjon i flomstørrelser. Dette fører til at flere av årets største flommer blir forskjøvet til høsten og at store flommer kommer mer overraskende på befolkningen.



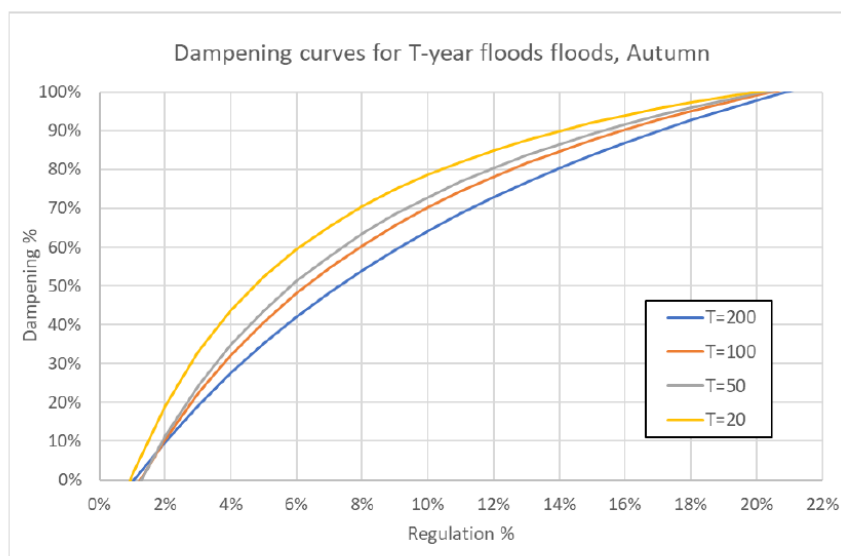
Figur 1 Årlig maksimalvannføring ved Ångermanelvns utløp i Sollefteå 1909-1998. For perioden etter at vassdragsreguleringer er i drift vises også verdier basert på tilsigsberegninger (Bergström, 1999).



Figur 2 Tidsserie for vannføring i Sollefteå sommeren 1998 under regulerede og uregulerede forhold (Bergström, 1999) .

I flere studier analyseres det hvilke faktorer som påvirker hvor mye flommer dempes på grunn av vassdragsreguleringer. I Hansen (2018) utvikles generelle sammenhenger mellom flomdemping og reguleringskapasitet for flommer med ulike gjentakintervall for Orkla. For dette feltet er reguleringsmagasinene store nok til å holde tilbake alt tilsiget og flomdempningen er bestemt av hvor stor andelen av flomtilsiget som dannes i den regulerede delen av feltet. Figur 3 viser flomdemping som funksjon av

reguleringskapasitet, og vi ser at selv med en reguleringskapasitet på 10%, kan 200-års flommer dempes med ca. 60% i snitt. Effekten av flomdemping er avhengig av topologien og hydrologien i vassdraget, og det er utfordrende å etablere generelle sammenhenger. Det er store usikkerheter hvis man kun tar hensyn til reguleringskapasiteten siden det er viktig å også ta hensyn til magasinfyllingen i forkant av flommer. Hansen (2018) foreslår derfor å isteden bruke flomreguleringskapasitet som grunnlag for å beregne flomdemping. Flomreguleringskapasitet er definert som ledig magasinkapasitet ved starten av flommer delt på årlig middeltilslig. Spesielt vises det at plasseringen av reguleringsmagasin samt slukeevnen til overføringer i feltet begrenset hvor mye av tilslaget som kan bli dempet. Dersom reguleringsmagasinene ikke har tilstrekkelig kapasitet til å ta imot hele flomvolumet, bestemmer tappekapasiteten hvor effektivt flomtopper kan dempes. Også selve flomforløpet kan avgjøre hvor mye en flom kan dempes.



Figur 3 Flomdemping som funksjon av reguleringsgrad for flommer med ulike gjentaksintervall (Hansen, 2018).

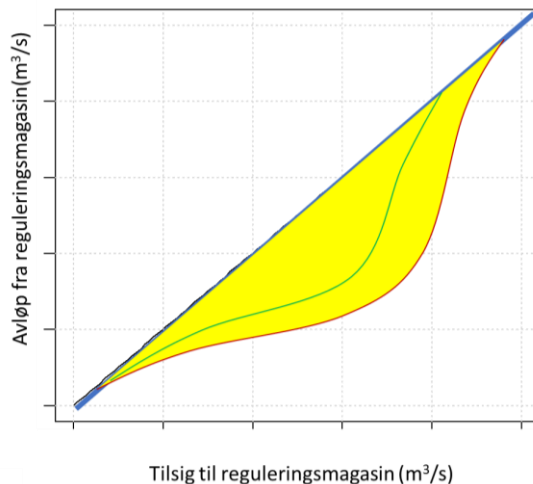
De Souza (2017) utvikler en generell flomdempingsindeks som beskriver hvor mye en 1000-års flom kan dempes. Denne indeksen er avhengig av volumkurven for reguleringsmagasinet, kurvenummer fra SCS-modellen (dvs. effektiv avrenning), konsentrasjonstid, feltareal og formen på overløp. Du et al. (2016) undersøker hvordan flere faktorer påvirker flomdemping, inkludert hvor man plasserer reguleringsmagasin i vassdraget. Resultatene viser også her at det først og fremst er de små flommene som kan dempes mye. Det samme gjelder flommene med en flomtopp. For mer langvarige flommer med flere flomtopper, dempes flomtoppen mest hvis den høyeste toppen kommer i starten av flomhendelsen.

I Batalla et al. (2004) undersøkes flom ved 38 vannføringsstasjoner i Ebro-vassdraget i Spania. De viser at reguleringskapasitet er viktig for å forklare hvor mye flommer dempes pga reguleringer, men at sammenhengen mellom reguleringskapasitet og flomdemping er avhengig av klima. Delfelt i fuktig atlantisk klima hadde lavest flomdemping. I Assani et

al., (2006) undersøkes hvordan vassdragsreguleringer endrer flomstatistikk (middelverdi, variasjonskoeffisient og skjevhet) samt sesongfordeling for flommer på et regionalt nivå. De viser at vassdrag med en betydelig reguleringskapasitet fører til lavere middelflommer, men større variasjonskoeffisient og skjevhet, samt større variasjon i tidspunkt på året flommer forekommer. Dette samsvarer med resultater bl.a. i Bergström (1999).

Det finnes mange flere studier som ser på effekten av flomdemping i reguleringsmagasin, 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.
- Selve flomforløpet. Kortvarige flommer med en flomtopp dempes mest. For de aller største flomhendelsene er dempingen pga. vassdragsreguleringer minst. En hypotetisk flomdempingskurve fra Ayalew et al., (2013) illustrerer dette (se Figur 4).
- For langvarige flommer, dempes flommen mest hvis den høyeste toppen kommer først.
- Andel av tilsiget som går gjennom reguleringsmagasinene.
- 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 enkelte flomtopper. Dette skjer spesielt for langvarige flommer når reguleringsmagasinene er fulle.



Figur 4 Hypotetisk sammenheng mellom flomtopp for tilsig og avløp fra et reguleringsmagasin (basert på Ayalew et al., 2013). Den røde linja representerer en omslutningskurve for den største mulige flomdempingen, dvs. reguleringsmagasinet er på laveste vannstand år en flom starter, mens det gule området viser mulige flomdempinger

3 Beregning av dimensjonerende flom i regulerte vassdrag

Tradisjonell flomfrekvensanalyse baserer seg på statistikk for observerte flommer i naturlige vassdrag. En flomhendelse er et resultat av flere prosesser der de viktigste er nedbør, snøsmelting og avrenning på og under bakken samt transport i elver, innsjøer og reguleringsmagasin. For å forstå hvordan flommer dannes i et regulert vassdrag er det viktig å kunne modellere alle disse komponentene (Botter et al., 2009).

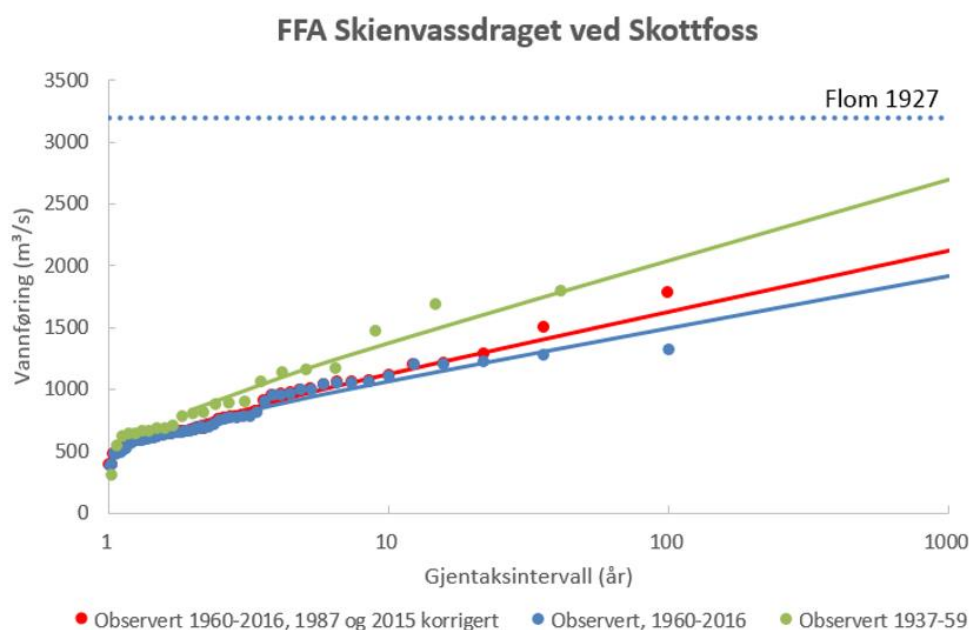
Mange av metodene der man beregner effekten av vassdragsreguleringer på dimensjonerende flommer benytter seg av en vassdragsmodell som typisk inneholder

- En hydrologisk modell som beregner responsen fra et nedbørfelt på nedbør og temperatur, f.eks. HBV-modellen (Bergström, 1995; Lindström et al., 1997; Sælthun, 1997), Mordor (Garçon, 1996), DDD (Skaugen and Onof, 2014).
- En hydraulisk modell som beregner forplantningen av en flombølge langs en elv og gjennom et reguleringsmagasin, f.eks. WEAP (SEI, 2020), HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, 2020) sammen med et sett med regler som beskriver hvordan reguleringsmagasinene manøvreres.

I de påfølgende delkapitlene beskrives ulike tilnærminger for å beregne flomfrekvensfordeling i et regulert vassdrag. Vi starter med tilnærminger der man gjør statistisk flomfrekvensanalyse direkte på flomdata fra et regulert vassdrag. Vi fortsetter så med tilnærminger der man utfører flomfrekvensanalyse på uregulerte data og transformerer dimensjonerende verdier til regulerte flommer. Deretter vises eksempler der man bruker kontinuerlig eller hendelsesbaserte metoder.

3.1 Statistisk flomfrekvensanalyse på flom-data

For steder med lange tidsserier etter at vassdragsreguleringer er idriftsatt 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 kunne analysere hvor mye vassdragsreguleringer har endret flomstørrelser og flomrisiko (se Figur 5). 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 kan ha endret seg, og at man i mange tilfeller ikke har lange nok tidsserier fra både uregulert og regulert periode.



Figur 5 Flomfrekvensanalyse for Skiensvassdraget ved Skottfoss før og etter regulering (Glover et al., 2018). Copyright: Multiconsult

López & Francés (2013) bruker en ikke-stasjonær modell for å modellere effekten av vassdragsreguleringer der reguleringsgrad brukes som kovariat sammen med klima-indeksjer. De viser at reguleringsgrad er viktig for å forklare endringer i flomstørrelser

Hallberg et al., (2016) tar for seg beregning av 100-års tilløpsflom i regulerte vassdrag. Ulike metoder er sammenlignet ved beregning av 100-årsflom. De benytter standard metoder basert på frekvensanalyse, ikke-parametrisk frekvensfordeling og en to-komponent Gumbelfordeling, samt konstruksjon av regulerte serier med standard betingelser for manøvreringen i vassdraget. Rapporten påpeker at i mange regulerte vassdrag er naturlige flommer kraftig dempet og kamuflert. Prosessene som skaper flommer er varierende og forskjellige fra et uregulert vassdrag, og i noen tilfeller kan flommen også skyldes reguleringen. Terskeffekter er ofte til stede. I vårflom-dominerte vassdrag, kan flomsesongen flyttes til høsten og dermed vil de fleste flommene bli skapt av regnhendelser istedenfor snøsmelting. Dette bryter med premisene for standard frekvensanalyser. Metoder for beregning av 100-årsflom bør kunne representere de prosessene som er framtrepende og drivende for store flommer i et regulert vassdrag.

Hallberg et al., (2016) anbefaler å bruke miksedde frekvensfordelinger, f.eks. en blanding av to Gumbel-fordelinger. Videre fremheves det at hydrologisk modellering med standardiserte manøvreringsrutiner er et verktøy som har et potensial og som bør utredes for flere vassdrag. Metoder som er undersøkt i Hallberg et al., (2016) men ikke anbefalt er ikke-parametrisk frekvensanalyse (KDE) og en modifisert versjon av metodikken for damsikkerhet (klasse I metodikk, se Svensk Energi et al., (2015)).

3.2 Statistisk analyse på tilsigsserier og modell for flomdemping

I denne tilnærmingen utføres flomfrekvensanalyse på tidsserier med naturlig vannføring og/eller tilsig og en empirisk ligning brukes for å regne naturlige flomtopper om til flomtopper etter vassdragsreguleringer. Sanders Jr. et al. (1990) presenterer en slik metode under navnet 'Total probability approach'. Tilnærmingen bruker flest mulig flomdata i regulerte vassdrag. Det brukes to tidsserier med årlige maksimalflommer. For den ene er effekten av reguleringen tatt med og den andre representerer naturlige flommer. Disse to tidsseriene må dekke samme periode. Tidsserien for naturlige flommer henter data fra uregulert periode. For regulert periode må en vassdragsmodell brukes for å tilbakeregne flomtopper som om feltet var uregulert. Tidsserien for regulerte flommer henter data fra regulert periode. For uregulert periode må en vassdragsmodell brukes for å beregne flomtopper som om feltet var regulert. Tidsserien med naturlige flommer brukes i en standard flomfrekvensanalyse for å beregne dimensjonerende flommer. Begge flomseriene brukes for å etablere en sammenheng mellom regulerte og uregulerte flomtopper vha. lineær regresjon på log-skala. Denne sammenhengen kan brukes for å beregne størrelsen på regulerte flommer (Figur 6). I metoden kan man også ta hensyn til usikkerheten i regresjonsligningen mellom uregulerte og regulerte flommer slik at man får justert sannsynlighet, og dermed gjentakintervall for flommer (Figur 7).

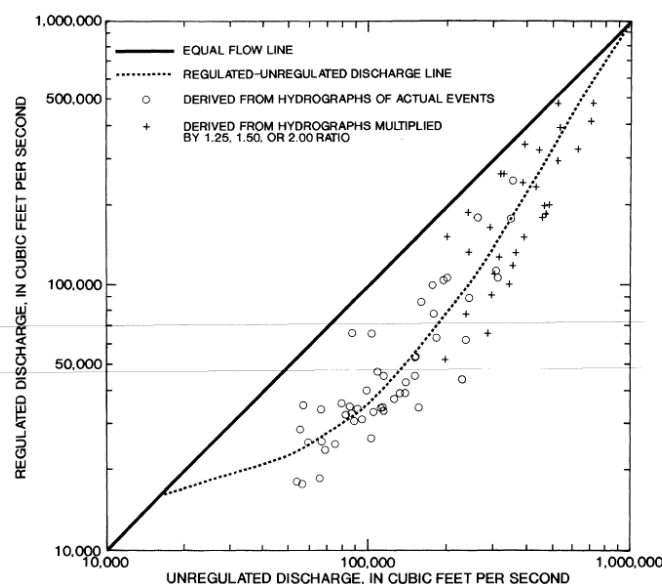
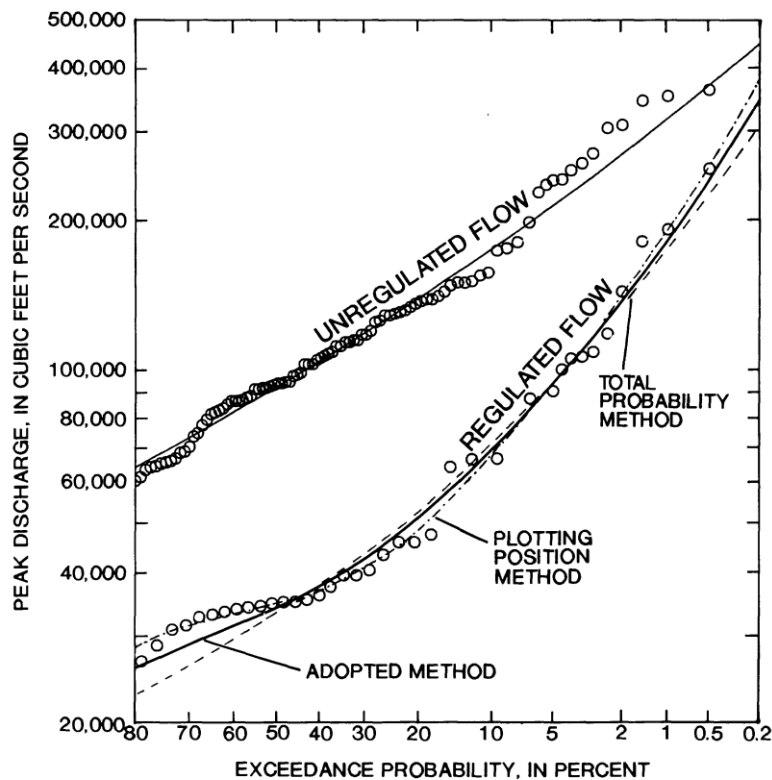


Figure 33.—Relation between regulated peak discharges and unregulated peak discharges for the Savannah River at Augusta, Ga. (02197000).

Figur 6 Sammenheng mellom flomtopper for regulert- og uregulerte vannføringer for Savannah ved Augusta (Sanders, Jr. et al., 1990). Reprodusert med tillatelse fra U.S. Geological Survey

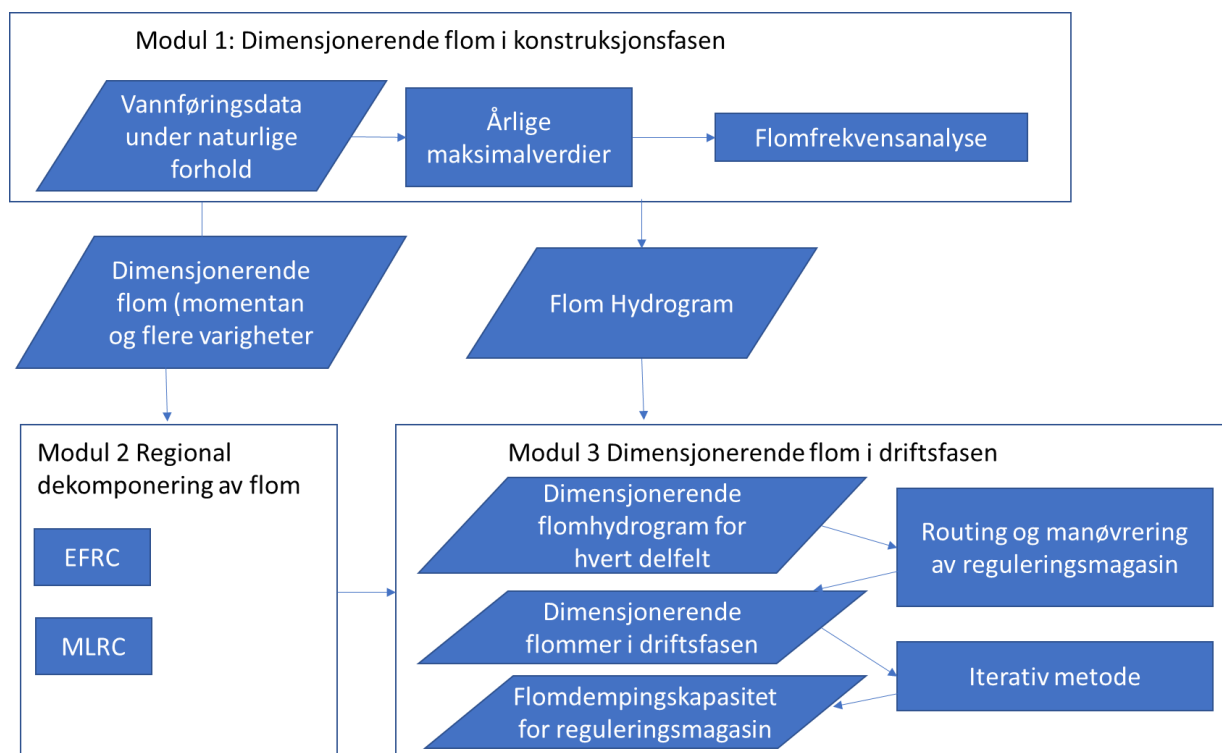


Figur 7 Flomfrekvensfordeling for naturlige og reguleerte flomtopper i Savannah (Sanders, Jr. et al., 1990). Reprodusert med tillatelse fra U.S. Geological Survey

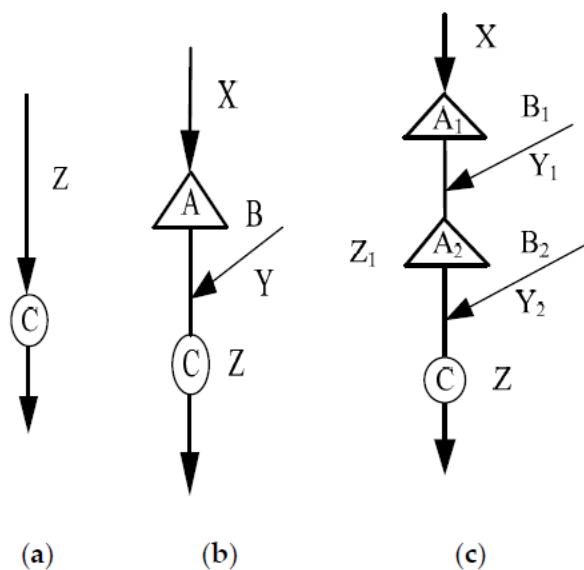
En lignende tilnærming blir brukt av U.S. Army Corps of Engineers (2010). Der utføres flomfrekvensanalyse for tilløpsflommen for en kritisk varighet. Den kritiske varigheten er avhengig av kapasiteten til reguleringsmagasinet og skal være så stor at man får skadeflom nedstrøms dammen. Samtidige observasjoner eller modellerte verdier av tilløpsflom-volum og flomstørrelsene nedstrøms dammen, brukes for å utvikle en regresjonsbasert modell som beskriver sammenhengen. Gao et al. (2019) foreslår en lignende metode. I stedet for å etablere en regresjonssammenheng mellom tilløpsflom og nedstrøms flom testes både lineære og ikke-lineære reguleringsmagasinmodeller.

Tilnærmingene beskrevet ovenfor passer for vassdrag med ett reguleringsmagasin. Har man flere reguleringsmagasin bør man kunne beregne dimensjonerende flom for alle dammer nedover vassdraget, der man tar hensyn til reguleringene oppstrøms. I Guo et al. (2018) og Xiong et al., (2019) videreutvikles en metode spesifisert i retningslinjer fra vannressursministeriet i Kina. Metoden tar hensyn til flere reguleringsmagasin. Figur 8 viser prinsippene for metoden som inneholder tre hovedmoduler: (i) Dimensjonerende flom i konstruksjonsfasen (ii) regional dekomponering av flom og (iii) dimensjonerende flom i driftsfasen. Dimensjonerende flom i konstruksjonsfasen baserer seg på flomfrekvensanalyse for hvert delfelt med målinger, gjerne for flere varigheter. 1 – 60 døgn er brukt i Xiong et al., (2019). Resultatene fra denne modulen er estimat av dimensjonerende flom samt typiske flomhydrogram. Ved å skalere hydrogrammet med den dimensjonerende flommen, får man et flomhydrogram som kan routes gjennom

reguleringsmagasinet. Regional dekomponering av flom har som mål å analysere sammenhenger mellom flomstørrelser for ulike delfelt slik at man kan ta hensyn til sannsynligheten for samtidighet i flom. «Equivalent frequency regional composition» (EFRC)-metoden antar man at gjentakintervallet for en flomhendelse er den samme for delfelt og for hele feltet. «Most likely regional composition» (MLRC) metoden tar hensyn til korrelasjonen mellom flommer og beregner den mest sannsynlige sammensetningen av flomer i delfelt. Resultatene fra modul 1 og 2 brukes i Modul 3 for å beregne dimensjonerende flom i reguleringsperioden. I denne modulen routes flomhydrogrammene nedover vassdraget, reguleringsmagasin for reguleringsmagasin. Beregningene kan gjøres for flommer av ulike varigheter, Figur 9 viser et eksempel på et vassdrag fra Guo et al., (2018) der dimensjonerende flom skal beregnes lengst nedstrøms. Motivasjonen med denne tilnærmingen er å ta hensyn til flomdemping i oppstrøms reguleringsmagasin når behovet for flomdempingskapasitet i nedstrøms magasin skal beregnes. Kan flomdempingskapasiteten reduseres, får regulanten større fleksibilitet til å manøvrere reguleringsmagasinene etter andre behov enn flomdemping (f.eks. strømproduksjon).



Figur 8. Rammeverk for å beregne dimensjonerende flom for et vassdrag med flere reguleringsmagasin (Basert på Xiong et al., 2019).



Figur 9. Eksempel på beregning av dimensjonerende flom ved punktet C i (a) et naturlig vassdrag, (b) et vassdrag med et reguleringsmagasin A og et restfelt B, og (c) et vassdrag med to reguleringsmagasin (A_1 og A_2) og to restfelt (B_1 og B_2). X er tilsig inn i reguleringsmagasinet lengts oppstrøms, Y, Y_1 og Y_2 er tilsig fra restfelt mens Z er totalt avløp. reguleringsmagasinreguleringsmagasin. (Guo et al., 2018).

Hallberg et al. (2016) anbefaler ikke denne type tilnærming for skandinaviske forhold der man kan ha to flomsesonger, snøsmelteflom om våren og regnflom om høsten. Vassdragsreguleringer endrer hvilke flommer som blir årets største. Alternativet er da å bruke kontinuerlig eller semikontinuerlig simulering.

3.3 Hendelsesbaserte metoder

For hendelsesbaserte metoder lages en dimensjonerende nedbørssekvens som kjøres gjennom en nedbør-avløpsmodell for å beregne tilsig og deretter en vassdragsmodell for å beregne avløpsflommer. Denne tilnærmingen komplementerer bruken av flomfrekvensanalyse. I Norge brukes denne tilnærmingen med den hydrologiske modellen PQRUT sammen med estimater av ekstrem nedbør (f.eks. 500 år, 1000 år og påregnelig maksimalnedbør (PMP)) for et nedbørfelt (Andersen et al., 1982). Estimater av ekstremnedbør og varighet for hver returperiode og sesong er gitt av Meteorologisk institutt etter metoden beskrevet i (Førland, 1992; Førland and 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 denne at denne tilnærmingen anbefales er at (i) tidsserier for nedbør ofte er lengre enn vannføringsserier, (ii) klimastasjonsnett er tettere enn målestasjonsnett for vannføring og (iii) nedbør viser sterkere regional konsistens enn avrenning (Killingtveit and Sælthun, 1995). I tillegg kan ikke estimering av den sannsynlige maksimale flommen (PMF), som brukes for dammer i Norge for å vurdere sikkerhet mot dambrudd, gjøres uten å gå via PMP og en nedbør-avløpsmodell. For flomberegninger i regulerte vassdrag vil denne tilnærmingen være spesielt nyttig siden den direkte kan ta hensyn til vassdragsreguleringer.

3.4 Kontinuerlig simulering

For kontinuerlig simulering av vannføring i regulerte vassdrag brukes kontinuerlige tidsserier med tilsig til reguleringsmagasin, kombinert med 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 gjentakintervall. 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 tilsig, 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). Fordelen med kontinuerlig simulering via en nedbør-avløpsmodell er at det tas hensyn til at starttilstanden (snømagasin, jordfuktighet og grunnvann) i et nedbørfelt kan variere mellom flomhendelser, i motsetning til hendelsesbaserte metoder der man må anta noe om starttilstanden. Bruker man syntetiske tidsserier for nedbør og temperatur til å drive de hydrologiske modellene, er det en stor utfordring å parametrisere en stokastisk nedbørgenerator. En litteraturgjennomgang er gitt i Sharma and Mehrotra (2013) og Wheather (2005). En nedbørgenerator bør fange opp hvordan nedbør varierer i rom og tid avhengig av både sesong og region. Dette er en utfordrende oppgave. Kontinuerlige simuleringer av tilsig kan alternativt lages ved å generere syntetiske tilsigsserier. I Lu et al. (2012) lages en statistisk modell for å simulere tilsiget til tre reguleringsmagasin i et vannkraftsystem der det tas hensyn til avhengigheten i tilsig mellom stasjonene. Denne modellen brukes så til å generere 50 000 år med syntetiske tilsigsserier.

I Ayalew et al., (2013) brukes kontinuerlig simulering med en stokastisk nedbørgenerator for å analysere hvordan ulike faktorer påvirker den statistiske fordelingen for flommer. De viser at uregulerte og regulerte flomtopper konvergerer for lange gjentakintervall og påpeker at det ikke er enkelt å finne en entydig empirisk sammenheng mellom uregulerte og regulerte flomtopper siden effekten av reguleringer varierer mellom hver flomhendelse.

3.5 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 avrenning for å kalibrere en hydrologisk modell til et nedbørfelt. Videre etableres det en statistisk modell for ekstreme nedbørshendelser 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 nedbørsverdier som blir tilordnet sannsynligheter fra den statistiske modellen slik at 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.

SCHADEx-metoden er utviklet for å modellere tilsigsflommer og tar ikke hensyn til demping i oppstrøms reguleringsmagasin (Viard et al., 2019). Dette blir gjort ved å

utvikle en semi-fordelt SCHADEX-tilnærming (SHADEX-SD). I denne tilnærmingen simuleres det nedbørshendelser 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 tilsig som deretter routes gjennom reguleringsmagasinene.

4 Retningslinjer i ulike land

Australia

Australian Rainfall Runoff (Ball et al., 2019) som gis ut av 'the National Committee on Water Engineering of Engineers Australia' og gir detaljerte beskrivelser av anbefalte metoder for flomberegninger. Beregning av flom i regulerte vassdrag beskrives kort i Bok 5 'Flood hydrograph estimation' (Ball and Babister, 2019). Det står to anbefalinger i boka:

- i) Bruk av standard regional flomfrekvensanalyse for å beregne flomstørrelser som om vi har et naturlig felt. Deretter kan effekten av dammen bli inkludert ved å bruke en routing modell. Ingen detaljer om hvordan dette bør bli gjort er inkludert. Dette ligner på metoder beskrevet i (Gao et al., 2019; Sanders, Jr. et al., 1990; U.S. Army Corps of Engineers, 2010)
- ii) Bruk av en hendelsesbasert tilnærming med en nedbør-avløpsmodell der reguleringsmagasin legges inn som et element i en modell for routing av flomforløp i et vassdrag. En trenger da en statistisk modell for dimensjonerende nedbør, en nedbør-avløpsmodell og en modell for routing av vannføringen gjennom vassdraget. Eventuelle dammer kan legges inn som egne element i denne routingmodellen. Dette ligner på metodene beskrevet i (Andersen et al., 1982; Kjeldsen, 2007b; NERC, 1975)

Bruk av metode II inkluderer mange valg som er diskutert: (i) bidraget fra grunnvannsavrenning (ii) hvor mye av nedbøren bidrar til flomhendelsen (effektiv nedbør) (iii) estimering av dimensjonerende nedbør (iii) nedbørsforløp (i) fordelt nedbør over et areal.

Sverige

Retningslinjene for flomberegninger knyttet til damsikkerhet i Sverige er beskrevet i Svensk Energi et al. (2015) basert på Bergström et al., (1992, 2008). Beregninger i Sverige skiller mellom konsekvensklasser for dammer. Klasse I dammer, som er den strengeste klassen, baserer beregningen seg på simuleringer med hydrologisk modell, mens klasse II dammer baserer seg på statistiske metoder og vannføringsdata.

Klasse I dammer

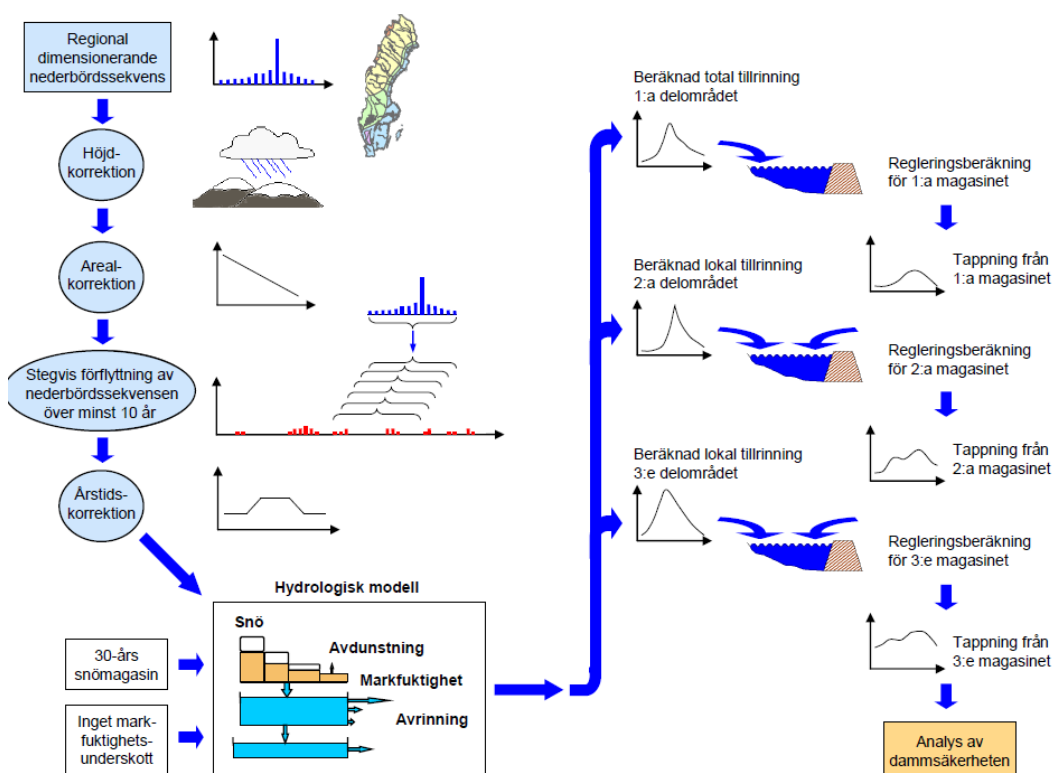
Det benyttes en nedbørsekvens som er bestemt ut fra en analyse av observert ekstrem arealnedbør. Forløpet er fast bestemt med et forløp over 14 dager, men korrigeres etter bl.a. høyde, regiontilhørighet og sesong.

Snømagasinet skal ha et vanninnhold som tilsvarer et gjentaksintervall på 30 år og beregnes ved frekvensanalyse av årlige maksimalverdier fra modellsimuleringer.

Den hydrologiske modellen inndeles i delfelt for hvert reguleringsmagasin, og evt. store innsjøer eller elvestrekninger. Modellen kalibreres mot tilsigsserier med vekt på store flommer.

Initialtilstanden forutsetter lavt markvannsunderskudd og rimelige magasinvannstander. Reguleringsmagasinet følger en gitt reguleringsstrategi, flomavledning og evt. tilstopping.

Ekstreme flommer simuleres i modellen i en valgt tidsperiode der nedbøren byttes ut med den dimensjonerende nedbøren i en 14-dagers periode. Temperatur og tilgrensende nedbør kan korrigeres etter gitte kriterier.



Figur 10 Tilnærming for beregning av dimensjonerende flom for klasse I dammer (Svensk Energi et al., 2015)

Klasse I og II dammer skal kunne avlede en flom med minimum 100 års gjentaksintervall. Flommen beregnes ved frekvensanalyse fra en tidsserie av tilsigsdata til reguleringsmagasinet

Finland

Retningslinjene for flomberegninger for dammer er beskrevet i (Isomäki et al., 2012). Flomberegningene er kort beskrevet og bygger i hovedsak på flomfrekvensanalyser med Gumbelfordelingen der det foreligger mer enn 20 år med vannføringsdata. Det er også utarbeidet en tabell med skaleringsfaktorer mellom Q100, Q5000 og Q10000. I svært

kompliserte vassdrag og vassdrag uten målinger åpner retningslinjene opp for å bruke hydrologiske modeller. Modellberegningene ligner svært mye på den som brukes i Sverige. Eksempel på bruk av hydrologiske modeller i Finland er gitt i (Veijalainen and Vehviläinen (2008).

Storbritannia

Tilnærminger brukt i Storbritannia bygger på 'Flood Studies Report (NERC, 1975) og 'Flood Estimation Handbook (Robson and Reed, 1999), samt oppdateringer presentert i Kjeldsen (2007b) der det tar mer hensyn til sesongvariasjoner i ekstremnedbør (mengde og profil), jordfuktighet og grunnvannsavrenning.

USA

Det er ingen nasjonale retningslinjer for flomberegninger i regulerte vassdrag (USGS, Bulletin 17C), men de peker på tilnærminger som har blitt brukt. Dette inkluderer:

- Utføre flomfrekvensanalyse på tilsigsserier som om vassdraget ikke er regulert.
- Statistisk analyse på tilsigsserier og modell for flomdemping, presentert som total sannsynlighets tilnærming (Sanders, Jr. et al., 1990).
- 'Volume-duration-frequency' (VDF)-tilnærming (U.S. Army Corps of Engineers, 2010) brukes av U.S. Army Corps of Engineers. Det første skrittet er å beregne frekvensfordeling for ulike varigheter for tilsigsdata. Deretter beregnes kritiske varigheten for tilsiget som vil skape de største flomtoppene nedstrøms reguleringsmagasinet. Det etableres så en empirisk sammenheng mellom kulminasjonsflom nedstrøms reguleringsmagasinet og tilsigsvolum for den kritiske varigheten. Denne sammenhengen blir så brukt for å beregne regulerte dimensjonerende flommer basert på den estimerte flomfrekvensfordelingen for tilsigsvolum.

Frankrike

Oppsummeringen for Frankrike er basert på e-post korrespondanse med Emmanuel Paquet ved EDF. I Frankrike skal flomberegninger gjøres for naturlig vannføring, og i regulerte vassdrag bør tilsigsserier brukes. Hvis det ikke er mulig å beregne en tilsigsserie, anbefales å bruke en representativ stasjon i nærheten. Dette er ofte nødvendig i små vassdrag der nødvendige data for å beregne tilsig ikke er tilgjengelige.

Hvordan man skal ta hensyn til vassdragsreguleringer er ikke spesifisert i detalj i forskrifter for flomberegninger. Reguleringsmyndighetene er fleksible med metoder som kan brukes, gitt at de er grundig dokumentert og beskrevet. Metodene trenger ikke å være eksplisitt beskrevet i reguleringsstekstene for å være i samsvar med loven. En praksis som er godkjent av de franske myndighetene er å ta hensyn til flomdemping i reguleringsmagasin med stor kapasitet, men da må man sette som betingelse at reguleringsmagasinet er på sitt maksimale driftsnivå. Viard et al. (2019) presenterer en tilnærming der effekten av vassdragsreguleringer tas hensyn til innenfor SHADEX-rammeverket. Metoden er beskrevet i et tidligere kapittel.

Kina

I kinesisk vannressursforvaltning kreves det at man setter av en egen del av reguleringskapasiteten til flomdemping. Regularanter vil gjerne ta hensyn til effekten av vassdragsreguleringer siden man da, i de fleste tilfeller vil kunne redusere andelen av reguleringsmagasinet som må brukes for flomdemping og øke friheten i produksjon av elektrisitet. Beskrivelsen av metoden som anbefales i Kina er gitt ovenfor i delkapittel 3.2 - Statistisk analyse på tilsigsserier og modell for flomdemping.

5 Oppsummering

Denne litteraturgjennomgangen viser at effekten av vassdragsreguleringer på flom er sammensatt av flere faktorer, her er noen av de viktigste:

- Selve flomforløpet. Kortvarige flommer med en flomtopp dempes mest. For langvarige flommer, dempes flommen mest hvis den høyeste toppen kommer først. For de aller største flomhendelsene er dempingen pga. vassdragsreguleringer minst
- Flomdempingen øker med økende andel av tilsig som går gjennom reguleringsmagasin.
- 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 enkelte flomtopper. Dette skjer spesielt for langvarige flommer når reguleringsmagasinene er fulle.

Det brukes flere tilnærminger for å beregne effekten av vassdragsreguleringer på flomforhold.

- Rene statistiske metoder der det utføres flomfrekvensanalyse direkte på data fra periode med vassdragsreguleringer.
- Utføre flomfrekvensanalyse på uregulerte data, og bruke en modell for å beregne dimensjonerende flom for forhold under vassdragsreguleringer.
- Bruke en kombinasjon av hydrologiske modeller og vassdragsmodeller for kontinuerlig eller hendelsesbasert simulering.

Viktige typer modeller som tas i bruk er:

- Statistiske modeller for ekstremver dianalyse og for å beskrive samvariasjon i ekstremnedbør eller flom over et vassdrag.
- Nedbørssimulator for kontinuerlig eller hendelsesbasert simulering.

- Nedbør-avløpsmodell for kontinuerlig eller hendelsesbasert simulering.
- Hydraulisk modell for å beregne transport av vann i elver, innsjøer og reguleringsmagasin kombinert med modell / regler for manøvrering av reguleringsmagasin under en flomhendelse. En slik modell kan brukes i alle tilnærmingene for å beregne dimensjonerende flom i regulerte vassdrag.

I Norske vassdrag har man ofte komplekse vannkraftsystem med mange reguleringsmagasin og overføringer. Skal man oppnå mer kunnskap om hvordan vannkraftreguleringer påvirker flomforhold, må man ta i bruk vassdragsmodeller som inkludere hydrauliske modeller og moduler som beskriver manøvrering. Det er også mye som tyder på at vi ikke bør bruke metodene der flomfrekvensanalyse brukes på naturlige flommer som deretter dempes. Grunnen er at i mange vassdrag endrer vannkraftreguleringer betydelig flomregimet slik at det blir færre store vårflommer og flere høstflommer.

6 Referanser

- Andersen, J. H., Hjukse, T., Roald, L. og Sælthun, N. R. (1982) Hydrologisk modell for flomberegninger, Oslo, Norge
- Assani, A. A., Stichelbout, É., Roy, A. G. og Petit, F. (2006) Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Québec (Canada), *Hydrological Processes*, 20(16), 3485–3501, doi:10.1002/hyp.6150
- 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.
- Ball, J. and Babister, M., Red. (2019) Flood hydrograph estimation, Book 5 in Australian Rainfall and Runoff - A Guide to Flood Estimation, Commonwealth of Australia, Commonwealth of Australia. Tilgjengelig fra: http://www.arr-software.org/pdfs/ARR_190514_Book5.pdf.
- Ball, J., Babister, M., Nathan, R., Weeks, W., Weinmann, E., M, R. og Testoni, I., Red. (2019) Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation, Commonwealth of Australia (Geoscience Australia).
- 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. (1995) The HBV Model, in *Computer Models of Watershed Hydrology*, edited by V. P. Singh, pp. 443–476, Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO.
- Bergström, S.: (1999) Höga vattenflöden i reglerade älvar, , (SMHI Fakta nr 1-1999)
- Bergström, S., Harlin, J. and Lindström, G. (1992) Spillway design floods in Sweden: New guidelines, *Hydrological Sciences Journal*, 37(5), 505–519, doi:10.1080/02626669209492615

- Bergström, S., Hellström, S.-S., Lindström, G. og Wern, L. (2008) Follow-Up of the Swedish Guidelines for Design Flood Determination for Dams..
- Botter, G., Porporato, A., Rodriguez-Iturbe, I. og Rinaldo, A. (2009) Nonlinear storage-discharge relations and catchment streamflow regimes, *Water Resources Research*, 45(10), doi:10.1029/2008WR007658.
- 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.
- 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.
- 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.
- Gao, S., Liu, P., Pan, Z., Ming, B., Guo, S., Cheng, L. og Wang, J. (2019) Incorporating reservoir impacts into flood frequency distribution functions, *Journal of Hydrology*, 568, 234–246, doi:10.1016/j.jhydrol.2018.10.061.
- Garçon, R. (1996) Prévision opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR. Bilan de l'année 1994-1995 | *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, La Houille Blanche, 5, 71–76, doi:10.1051/lhb/1996056.
- Glover, B., Sælthun, N. R. og Walløe, K. L. (2018) Verdien av vassdragsreguleringer for reduksjon av flomskader, *EnergiNorge*, Oslo, Norge.
- 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.
- 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.
- Isomäki, E., Maijala, T., Sulkakoski, M. og Torkkel, M. (2012) Dam safety guide. Tilgjengelig fra: <http://www.doria.fi/handle/10024/98859>.
- 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.
- Kleivane, I. (2012) Flomberegning for Fagernes, Norges vassdrags- og eneridirektorat, Rapport 27:2012, Oslo, Norge.

- 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.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. og Bergström, S. (1997) Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model, *Journal of Hydrology*, 201(1–4), 272–288, doi:10.1016/S0022-1694(97)00041-3.
- 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.
- Lu, B., Gu, H., Xie, Z., Liu, J., Ma, L. og Lu, W. (2012) Stochastic simulation for determining the design flood of cascade reservoir systems, *Hydrology Research*, 43(1–2), 54–63, doi:10.2166/nh.2011.002.
- Middtømme, G. H., Pettersson, L. E., Holmqvist, E., Nøtsund, Ø., Hisdal, H. og Sivertsgård, R. (2011) Retningslinjer for flomberegninger, Norges vassdrags- og energidirektorat, Retningslinjer 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 SCHADEX 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.
- Robson, A. og Reed, D. (1999) Statistical procedures for flood frequency estimation, Vol 3 in *Flood Estimation Handbook*, Centre for Ecology & Hydrology, Lancaster, UK
- Sælthun, N.-R.: Regional Flomfrekvensanalyse for Norske Vassdrag, Norges vassdrags- og energidirektorat 14-1997, Oslo, Norge.
- Sanders, Jr., C. L., Kubik, H. E., Hoke, Jr., J. T. og Kirby, W. H. (1990) Flood frequency of the Savannah River at Augusta, Georgia, US.
- SEI (2020) WEAP, Tilgjengelig fra: <http://www.weap21.org/index.asp> (Accessed 4 April 2020), 2020.
- Sharma, A. og Mehrotra, R. (2013) Rainfall Generation, in *Rainfall: State of the Science*, pp. 215–246, Wiley Blackwell.
- Skaugen, T. og Onof, C. (2014) A rainfall-runoff model parameterized from GIS and runoff data, *Hydrological Processes*, 28(15), 4529–4542, doi:10.1002/hyp.9968.

- 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.
- Svensk Energi, Svenska Kraftnät and SveMin (2015) Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. Tilgjengelig fra: <http://www.svenskenergi.se/Vi-erbjuder/Webbshop/Gratis-publikationer/Rapporter/Riktlinjer-for-bestamning-av-dimesionerade-floden/>.
- Thyness, V., Gagerlid, G. O. og Mamen, J. (2015) Ekstremværrapport. Hendelse: Synne., Meteorologisk institutt. METinfo Nr. 26/2015, Oslo, Norge.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2010). "Des Moines River regulated flow frequency study." Rock Island, IL. US
- US Army Corps of Engineers (2020) HEC-HMS, Tilgjengelig fra: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/> (Accessed 4 April 2020).
- Veijalainen, N. og Vehviläinen, B. (2008) The effect of climate change on design floods of high hazard dams in Finland, *Hydrology Research*, 39(5–6), 465–477, doi:10.2166/nh.2008.202, 2008.
- 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. (2016) Sammenligning av regulert og uregulert flom i Sira- og Kvinavassdraget, Norconsult, Oslo, Norge
- Wheater, H. S., Chandler, R. E., Onof, C. J., Isham, V. S., Bellone, E., Yang, C., Lekkas, D., Lourmas, G. og Segond, M. L. (2005) Spatial-temporal rainfall modelling for flood risk estimation, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6), 403–416, doi:10.1007/s00477-005-0011-8.
- 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

.....

MIDDELTHUNSGATE 29
POSTBOKS 5091 MAJORSTUEN
0301 OSLO
TELEFON: (+47) 22 95 95 95

www.nve.no