

Aktiv flomdemping: Casestudie av Ilavassdraget i Trondheim Kommune

Av Ganesh H.R. Ravindra, Ånund Killingtveit, Christine R. Hung, Eli Sandberg, Odd A. Tveit, Edvard Sivertsen og Eivind Lekve Bjelle

Ganesh H.R. Ravindra (Ph.D) er dam- og sivilingeniør hos Statkraft Energi AS, Oslo.

Ånund Killingtveit (Ph.D) er professor emeritus ved Instituttet for Bygg- og miljøteknikk, NTNU, Trondheim.

Christine R. Hung (M.Sc) er forsker ved SINTEF, Trondheim.

Eli Sandberg (Ph.D) er forsker ved SINTEF, Oslo.

Odd A. Tveit (M.Sc) er avdelingsleder ved Vann og avløp, Trondheim Kommune.

Edvard Sivertsen (Ph.D) er seniorforsker ved SINTEF, Trondheim.

Eivind Lekve Bjelle (Ph.D) er forsker ved SINTEF, Trondheim.

Summary

Active regulation of reservoirs for flood mitigation; case study of the Ila river in Trondheim municipality. Flood simulations have been carried out for passive regulation and three different strategies for active regulation of the three reservoirs in the Ila watercourse in Trondheim municipality in Norway. This was done to document the potential for active flood mitigation for seven different recurrence intervals. The results show that it is possible to achieve a reduction in damaging floods in the entire watercourse of up to 53 per cent, depending on the regulation strategy employed. In the event of a 1,000-year flood with passive regulation of the reservoir furthest down the watercourse, a kindergarden, roads, residential buildings, commercial buildings (with 73 affiliated companies), and buildings with cultural heritage value will be affected. To illustrate the direct damage costs, the hydraulic model is linked to cost estimates from The Norwegian Water Resources and Energy Directorate's benefit/cost analysis model. We describe the way forward towards calculating the socio-economic costs of a flood, or the other

way around - socio-economic savings from flood mitigation strategies, which also include indirect damage and ripple effects in the economy because of floods. This methodology will contribute to better decision making with regards to flood mitigation strategies in municipalities in Norway and around the globe.

Sammendrag

Det er gjennomført flomsimuleringer av passiv regulering og tre ulike strategier for aktiv regulering av de tre magasinene i Ilavassdraget i Trondheim med tanke på flomdemping av ulike flomstørrelser. Resultatene viser at det er mulig å oppnå en reduksjon i skadeflommer i hele vassdraget, helt opp mot over 50 prosent, avhengig av strategi. Ved en 1000-årsflom med passiv regulering av den nederste dammen, blir en barnehage, veier, boligbygg, forretningsbygg (med 73 tilhørende bedrifter og bygninger) og bygninger med kulturminneverdi, rammet. For å illustrere direkte skadestrukturer, er det på den hydrauliske modellen koblet kostnader fra NVEs nytte-/kostnadsanalysemodell NKA. Vi beskriver også

veien videre mot beregning av samfunnsøkonomiske kostnader av en flom, eventuelt samfunnsøkonomiske besparelser av flomdempingsstrategier, som også inkluderer indirekte skader og ringvirkninger i økonomien som følge av flom. Denne metodikken skal bidra til bedre beslutninger om flomdempingsstrategier i kommuner.

Innledning

Norge har en stor portefølje av dammer med flere tusen registrerte damanlegg. Disse dammene er nøkkelinfrastruktur og uunnværlige komponenter for vannkraftproduksjon og vannforsyning. For å hindre dambrudd, må dammene sikres så de tåler flommene som kan oppstå. Om nødvendig må det treffes tiltak for å forsterke dammene eller øke flomavledningskapasiteten inntil et rimelig sikkerhetsnivå er oppnådd (OED, 2009). Sikkerhetsnivået er avhengig av hvilke skader som kan inntreffe, og sannsynlighet for tap av liv vektlegges mest.

Selv om dammene tåler flommene som kan oppstå, kan det oppstå skader i vassdraget ved større flommer, med erosjon og/eller oversvømmelse og skader på bygninger, infrastruktur og annen arealbruk nedstrøms langs vassdraget. Vi observerer i dag klare tegn på at klimaet endrer seg, og at flommene øker i vannmengde og forekommer hyppigere. Dette gir negative konsekvenser over store deler av landet (NVE, 2016).

Samtidig har overvannshåndtering i byer og tettsteder fått økende oppmerksomhet de siste årene (NOU, 2015). Tradisjonell overvannshåndtering med bortledning i rør har begrenset kapasitet. Dette er ikke egnet for å håndtere økende overvannsmengder som følge av endret klima, der særlig kortere og mer intense nedbørshendelser skaper utfordringer. En mer fremtidsrettet håndtering av overvann, er å håndtere mest mulig av det dagligdagse regnet lokalt og på overflaten, mens de store, flomskapende nedbørshendelsene må ledes trygt til nærmeste resipient. Dette betyr at urbane vassdrag må håndtere både egen vannføring og ekstra tilført mengde overvann (NOU, 2015a).

Det er derfor nødvendig å vurdere hvordan man kan forsinke flomtappen i vassdraget ellers,

slik at nedstrøms elveløp har kapasitet til å håndtere overvannsavrenning. En strategi kan være å bruke reguleringsmagasiner til å utjevne og dempe elveflommene. Dette kan skje ved å sørge for å ha reservekapasitet i magasinet og samle opp flomvannet når en stor flomtopp er på veg. Vannet lagres inntil flomtappen har passert, og deretter slippes flomvannet ut igjen, slik at magasinet er klart til å håndtere neste flom. På denne måten kan de høyeste flomtappene senkes, og skadepotensialet reduseres betydelig. Denne effekten er dokumentert i flere studier, for eksempel i forbindelse med «Lille-Ofsen» på Østlandet i juni 1995 (NVE, 2000) og i forbindelse med et nytt varslingssystem for flomdempning i Øst-Telemarksvassdraget (Glover et al., 2018), (Killingtveit & al, 2021).

Siden selve flomdempingen skjer ved at deler av tilløpsflommen midlertidig samles opp i et magasin, (og da fortrinnsvis flomtoppen), vil det være mulig å øke flomdempingen gjennom «aktiv regulering». Dette kan gjøres ved å styre tapping og oppfylling av et magasin, og krever derfor at en har luker eller tappeorgan som kan opereres etter behov. En annen strategi er å senke høyeste reguleringsgrense (HRV). Her er det viktig å notere at en senkning av HRV krever konsesjon. Senking av vannstanden midlertidig krever ingen konsesjonsendring og er derfor enklere. Det demper flommen, men reduserer også nytteverdien av magasinet, fordi det fører til unødvendig nedtapping de fleste år. En tredje strategi kan være tapping av tilsiget idet flommen starter. Det gir reservekapasitet når flomtappen kommer, men reservekapasiteten er lav når en ikke tapper under HRV. Ved å tillate en forhåndstapping som senker magasinet under HRV, kan reservekapasiteten økes betydelig, og dermed samle opp en større del av flomtoppen. En stor fordel med denne strategien, er at nedtapping bare skjer når det virkelig er behov for det, og i en kort periode. En forutsetning for å lykkes med ulike ”aktiv regulering”-strategier, er at reservekapasiteten er tilstrekkelig stor, og at en kan prognosere flomforløpet nøyaktig, slik at en regulerer best mulig. Slike metoder er i bruk for regulering av kraftverk og magasiner (inklu-

dert flomdempning) i større vassdrag (Rinde & al, 2023), men har foreløpig vært mindre aktuelt for mindre anlegg.

Aktiv regulering og redusert flompotensial fører med seg samfunnsnyten i form av: a) bedre sikkerhet for bygninger, infrastruktur og økosystemer langs vassdrag, b) høyere sikkerhetsnivå for damanlegg, da stabiliteten til dammen er direkte tilknyttet vannstand i magasinet. Det er viktig å notere her at dammene i utgangspunktet er dimensjonert for håndtering av ekstreme flomhendelser men videre demping av flommer under en dimensjonerende hendelse gir økt damsikkerhet, c) bedre utnyttelse av bynære, små dammer forvaltet av kommuner, da slike dammer vanligvis kun brukes til friluftsføremål, og d) aktiv flomdemping er et nullutslippstiltak, da det er eksisterende infrastruktur som benyttes.

Trondheim kommune har forvaltningsansvar for 19 damanlegg klassifiserte hos damsikkerhetsmyndigheten (NVE). Ni av disse dammene er klassifiserte i konsekvensklasse 3 og 4, noe som betyr at brudd innebærer at flere titalls boenheter blir berørt nedstrøms langs vassdraget. I 2020 satte Trondheim kommune i gang et forskningsprosjekt for å undersøke om det er mulighet for å bruke dammer i bynære vassdrag for å oppnå flomdemping. Kommunen investerer flere millioner kroner hvert år for damsikkerhetsformål, selv om de fleste dammene kun brukes til friluftaktiviteter. Det var viktig for kommunen å vurdere og dokumentere om det er potensiale for å bruke disse dammene for å oppnå andre samfunnsnytter, for eksempel flomdemping. Trondheim kommune har derfor, i samarbeid med NTNU og Hydroinformatikk AS, vurdert hydrologisk og hydraulisk potensial for aktiv flomdemping ved bruk av tre dammer i Ilavassdraget i Trondheim (Killingtveit, 2021). Beregninger av hva flommer koster samfunnet, både i form av direkte skader og indirekte virkninger, bidrar til å synliggjøre behovet for flomdemping. Det kan for eksempel brukes som argument for politikerne i kommunene når det er behov for investeringer i tappeorganer.

Ilavassdraget i Trondheim kommune

Ilavassdraget i Trondheim kommune har tre dammer: Kobberdammen, Baklidammen og Theisendammen (Figur 1). Kobberdammen er den øverste dammen i vassdraget. Avløp fra Kobberdammen renner videre mot Baklidammen. Baklidammen ble nylig rehabilitert (i perioden 2020-2021). Avløp fra Baklidammen renner mot Theisendammen, som er den nederste dammen i vassdraget. Bekkeløpet nedstrøms Theisendammen går gjennom et tettbygd strøk i Ila-området og har utløp i Trondheimsfjorden. Alle dammer i Ilavassdraget har faste overløp for flomavledning. Nøkkeldata for dammer/magasiner i Ilavassdraget er beskrevet i Tabell 1.

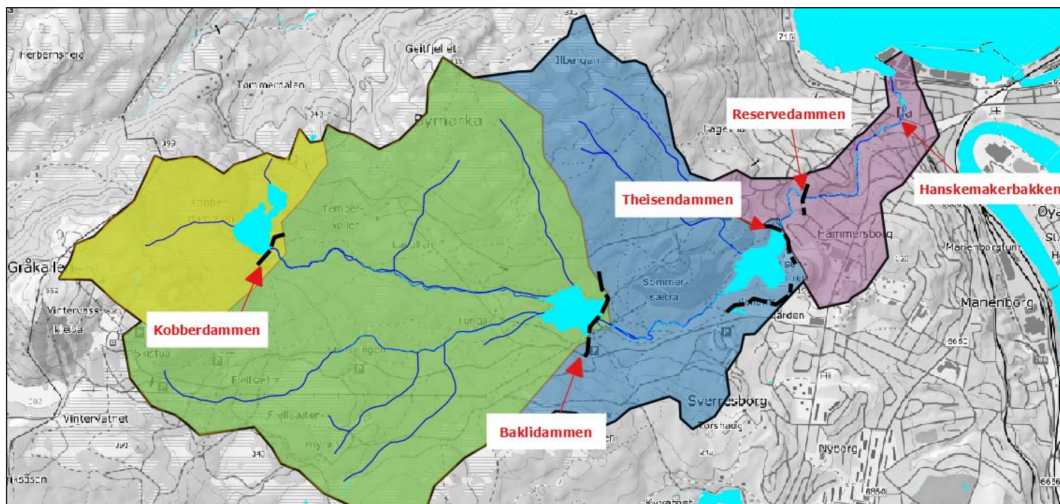
Metode

Hydrologisk og hydraulisk modellering

Det er gjort beregninger av ekstremnedbør over vassdraget for gjentaksintervallene 10, 25, 50, 100, 200, 500 og 1000 år. I hvert nedbørstilfelle er flomforløpet beregnet for hver av de fire nedbørsfeltene illustrert i Figur 1. PQFLOM-modellen er brukt til beregningene av nedbør til avløp. Flomberegninger og dambruddsbølgeberegninger utarbeidet av Multiconsult er det tekniske grunnlaget for dette arbeidet (Multiconsult, 2016, 2018).

Det er utviklet en integrert hydrologisk-hydraulisk modell for å simulere vannføring i vassdraget, både med passiv regulering og med ulike tiltak for aktiv regulering. Modellen beregner tilsig for lokalfeltene, tapping og overløp fra dammene, som en funksjon av flomvannføring, tapping, reservekapasitet i magasinet og avløp fra overløp. Modellen er grunnlaget for beregninger for hvordan de ulike flommene forplanter seg nedover i vassdraget og gjennom magasinene. Beregningene er gjort for et scenario kalt "passiv regulering", som betyr uten forhåndstapping av magasinene, og for ulike "aktive reguleringsstrategier" for flomdemping (Killingtveit, 2021).

Tre forskjellige «strategier» for aktiv regulering er vurdert:



Figur 1. Oversikt over nedbørsfelt, dammer og magasiner i Ilvassdraget (over) og overløp Theisendammen (under)

- I. Tapping under en flomhendelse - Styling av tappeorganer under en flomhendelse for tapping av flomvannet.
- II. Forhåndstapping - Senkning av magasin-vannstanden i forkant av en flomhendelse for å skape en buffer i magasinet.

III. Kombinasjon av strategie I og II for å oppnå maksimal effekt.

Hovedresultatene fra simuleringene er vannføring på fire kritiske steder i vassdraget og vannstandstigning i de tre magasinene. Flom-

Tabell 1. Nøkkeldata for dammene i Ilvassdraget

No	Dam	Damtype	Dam høyde	Magasin volum (m ³)	Overløp lengde (m)	Tappeorgan	HRV (moh.)
1	Theisendammen	Murdam med frontal betongplate	12 m	Ca. 300 000	10 m	1 stk 450 mm tapperør/ventil	+153,04
2	Baklidammen	Murdam med frontal betongplate	17 m	Ca. 350 000	14 m	2 stk 450 mm tapperør/ventil	+195,70
3	Kobberdammen	Murdam med sentral torvtetting	5 m	Ca. 250 000	Ca. 4,5 m	1 stk 300 mm tapperør/luke	+288,00

størrelsene ved de ulike flomdempingsscenariene er sammenliknet med flomstørrelsen ved passiv regulering.

Gjennomføring av aktiv flomdemping krever instrumentering av dammen/vassdraget for innsamling av viktig informasjon før og under ekstreme flomhendelser. For bestemmelse av optimal strategi for flomdemping krever data angående magasin vannstander som en sentral parameter. For effektiv regulering av tappeluker er det nødvendig å instrumentere dammer med kontinuerlig vannstandsmåling. Damsikkerhetsforskriften krever kontinuerlig vannstandsovervåking av alle klasse 2, 3 og 4 dammer.

Samfunnsøkonomisk modellering

SINTEF har samlet data og utviklet et verktøy som beregner og visualiserer direkte kostnader for ulike scenario for naturskadehendelser på bygninger og infrastruktur for alle kommuner i Norge. Verktøyet har et brukergrensesnitt med valg av kommune, type naturskade, gjentakintervall og infrastruktur, mens selve modellen er statisk og forutsetter per i dag at ingen klimatilpasningstiltak igangsettes. Dette illustrerer konsekvensene av å ikke tilpasse seg en naturhendelse, og skal bidra til kost-/nytteanalyser som skal styrke beslutningsgrunnlaget for klimatilpasningstiltak i kommuner.

NVEs nytte-/kostanalyseverktøy (NKA) gir kostnadsestimater for ulike typer skadeobjekter og gjentakintervall. Kostnadsestimatene bygger i stor grad på byggekostnader hentet fra Statistisk sentralbyrå. Innbokkostnaden er gitt som en andel av byggekostnaden. Verktøyet benytter en sannsynlighetsfaktor for fasadetyper og om en bygningstype har kjeller. Skadeverdiene baseres

på hvor høyt flomvannet står på bygningen. NKA estimerer i hovedsak direkte kostnader, men inkluderer også noen indirekte kostnader, som opprydningskostnader, akutt beredskap, omkjøringskostnader ved stengt vei og leiekostnader for midlertidig bopel. Modellen legger opp til at ikke-prissatte virkninger skal vurderes kvalitativt (NVE, 2016a). Indirekte tap er forårsaket av sekundære effekter. I indirekte kostnader inngår avbrudd i produksjon av varer og tjenester og ringvirkninger av dette (Thieken et al., 2009).

I Norge har vi detaljerte data på bygningstyper i matrikkelen. Det finnes tilsvarende data, som for bygninger for infrastruktur som veier, bruer og tunneller i Nasjonal Vegdatabank (Statens vegvesen). Jernbaneinfrastruktur hentes fra databasen til Georange (Georange, 2022). Ved geografisk kobling av disse dataene til identifiserte flomsone, kan vi finne hvilke bygninger og infrastruktur som ligger i flomsone. Høyden på flomvannet på et objekt finner vi ved å koble flomsone til høydedata (høydedata.no eller <https://www.kartverket.no/api-og-data/terrengdata>). Deretter kobles de identifiserte objektene til kostnadsestimatene for objekttypen i NKA.

Det er en vanlig prosedyre å benytte en skadefunksjon av flomdybde, hvor skadekostnaden blir estimert etter hvor høyt flomvannet står på bygningen (Komolafe et al., 2018). De totale kostnadene av en hendelse beregnes ved å gange opp berørte bygningers areal med enhetskostnadene per bygningstype. Siden matrikkelen ikke gir arealet til bygningene, kobler vi bygningene i matrikkelen til bygninger i Open Street Map, som i stor grad har kartlagt grunn-

flatearealet til bygningene. Infrastrukturkostnadene beregnes ved å multiplisere lengden og bredden på veien eller jernbanestrekningen innenfor faresonen med kostnaden per enhet areal for den gitte infrastrukturtypen i NKA. For å indikere mulige økonomiske ringvirkninger av en 1000-årsflom i Theisendammen, har vi hentet data for omsetning og antall ansatte hos de berørte bedriftene fra Brønnøysundregisteret.

Resultater

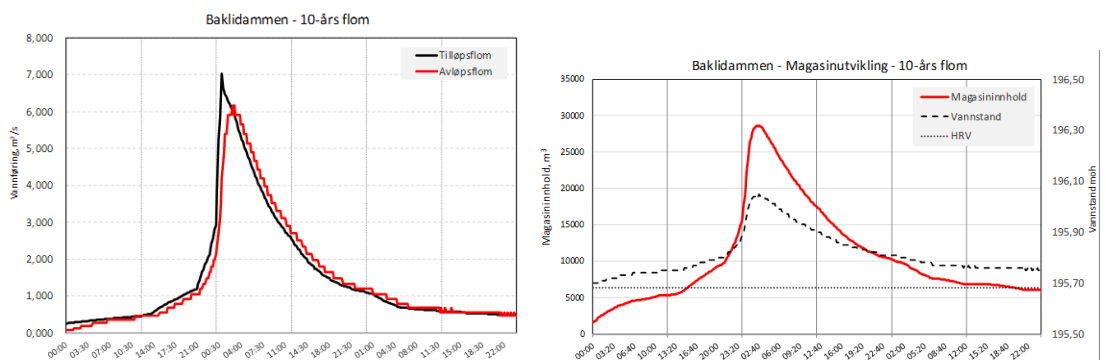
Passiv regulering

Naturlige sjøer eller kunstige magasiner i vassdrag vil ofte ha en stor innvirkning på flomforhold, ved at sjøer/magasiner demper flomtopper og jevner ut flomforløpet. Passiv regulering er identisk med dagens praksis, der magasinene fungerer omtrent som naturlige sjøer og gir en viss flomdemping, ved at deler av flomtoppene lagres midlertidig mens tilløpet stiger. Så tappes det ut igjen som en funksjon av vannstand og overløpets utforming. Ved «passiv regulering» reguleres magasinering og utløp bare gjennom de faste konstruksjonene som finnes (overløp). Det kan vanligvis antas at magasinet ligger på høyeste regulerte vannstand (HRV) når flommen starter. Da er det ikke noe vannføring i flomløpet. For å illustrere flomforløpet for Baklidammen, er magasininnhold, vannstand, tilløpsflom og avløpsflom plottet som funksjon av tid for en flomhendelse med 10-års returperiode i Figur 2. Etter hvert som innløpsflommen øker mens avløpet i flomløpet er lite, vil

vannmengde og -stand i magasinet øke (Figur 2, høyre kurve). Så lenge vannstanden øker, vil også avløpet øke (den røde kurven i Figur 2, venstre kurve), fordi det er en entydig (men ulinear) sammenheng mellom vannstand og vannføring i flomløpet. Økningen fortsetter til noe forbi toppunktet på tilløpsflommen (ca. 7 m³/s) og noen timer senere er tilløp og avløp blitt like store. Økningen i magasinet stopper da opp, og avløpet kulminerer. Avløpet kulminerer når vannstanden er høyest, her på ca. 6,2 m³/s (0,37 m over HRV), ca. 0,8 m³/s lavere enn maksimalt tilløp.

Dette betyr at avløpsflommen er blitt dempet med 0,8 m³/s ved den midlertidige lagringen av flomtoppen i magasinet. Dette skjer automatisk og uten at en trenger å gjøre noen aktive inngrep i form av regulering. Denne type flomdemping kan være av stor betydning dersom en har et stort magasin og et trangt utløp.

To andre magasiner i Trondheims vannforsyningssystem er gode eksempel på dette: Jonsvatnet og Benna. Under “Gyda-flommen” i januar 2021, ble det observert flomskader i elva Loa nedstrøms magasinet ved vannføring ca. 2 m³/s. En nærmere studie viste at tilløpsflommen da hadde vært 12 m³/s, og at denne var redusert til 1,8 m³/s i utløpet av Benna (Killingtveit, 2022). Dette ble oppnådd bare ved passiv regulering. Ytterligere demping kunne vært mulig ved aktiv regulering, men var ikke nødvendig for denne flomstørrelsen.



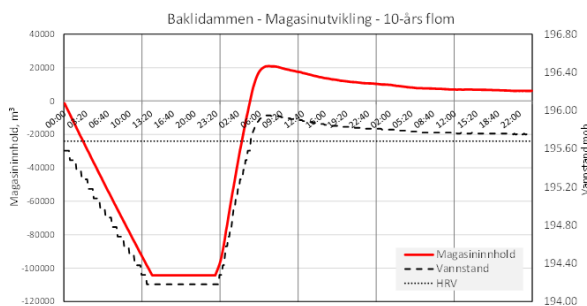
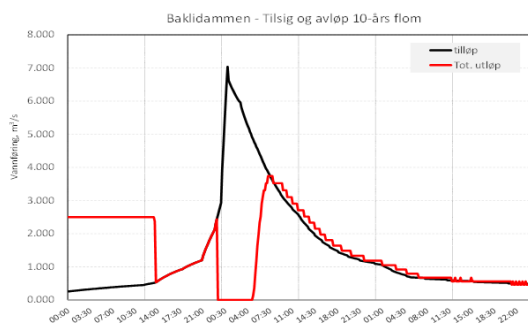
Figur 2. Resultater fra passiv regulering av Baklidammen under en 10-års flomhendelse.

Aktiv regulering

Strategi I: Tapping under en flomhendelse

Figur 3 viser et eksempel på flomforløp i Baklidammen under en 10-års flom der man benytter tapping under hendelsen. Her starter forhåndstapping på 2,5 m³/s (som er mindre enn maksimal tappekapasitet gjennom bunntappeløpet på Baklidammen som er, 4,5 m³/s) umiddelbart ved starten av flomhendelsen. Tappingen varer fram til tilløpsflommen overstiger 2,5 m³/s, men er begrenset til maks 1,5 m ned (til +194,20

moh.). Etter at dette nivået er nådd, tappes bare tilsiget. Når tapping stopper, stiger magasinet hurtig og når HRV etter ca. 5 timer. Så stiger magasinet videre, og avløpet gjennom flomløpet øker inntil kulminasjon ca. tre timer senere. Dette gir en maks avløpsflom på 3,7 m³/s og maks vannstandstigning på 0,27 m ved Baklidammen. Flomtoppen er da dempet fra 6,2 m³/s (passiv regulering) ned til 3,7 m³/s pga. aktiv regulering som tilsvarer 40% demping av flomtoppen med 2,5 m³/s.

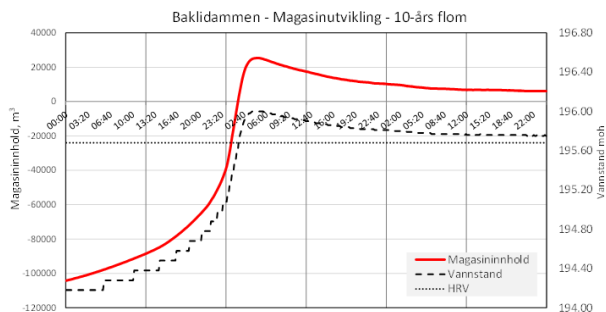
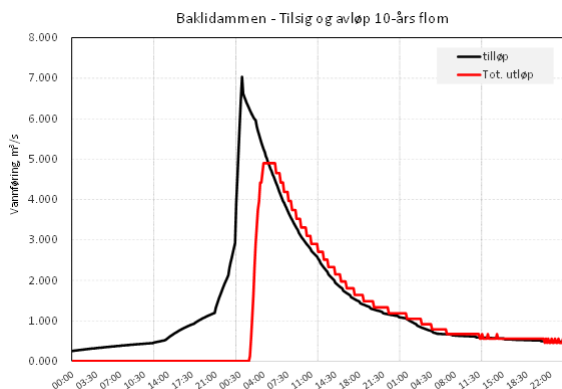


Figur 3. Resultater fra aktiv regulering med strategi I av Baklidammen under en 10-års flomhendelse.

Strategi II: Forhåndstapping

Forhåndstapping er en type regulering der maks tillatt vannstand (HRV) senkes permanent, eller i visse perioder av året, for å skaffe en større flomdempingskapasitet. Figur 4 viser flomforløp i Baklidammen under en 10-års flom der startvannstand på Baklidammen er senket 1,5 m på forhånd. Dette resulterer i at første del av

flommen kan magasineres, noe som gir senket vannstand under flomtoppen og redusert utløpsflom. Maksimal utløpsflom blir da 4,9 m³/s (dempet fra 6,2 m³/s). Dette tilsvarer 21% demping av flomtoppen med 1,5 m³/s, og maksimal vannstand i magasinet blir 0,32 m over HRV.

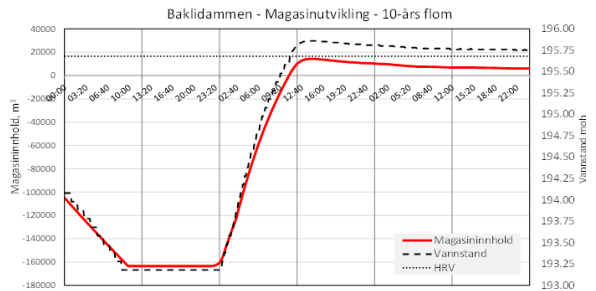
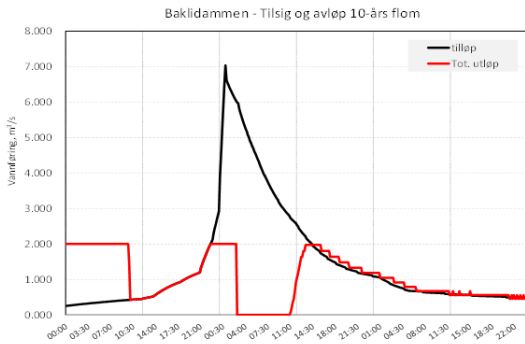


Figur 4. Resultater fra aktiv regulering med strategi II av Baklidammen under en 10-års flom hendelse.

Strategi III: Kombinasjon av tapping under flomhendelse og forhåndstapping

Dette eksemplet viser hvordan en kombinasjon av flere virkemidler kan føre til betydelig reduksjon i flomtoppen. Figur 5 viser flomforløpet for en 10-års flom i Baklidammen, der man har startet med magasinet senket 1,5 m, forhåndstapping på inntil 2,0 m³/s som starter umiddel-

bart ved starten av flomhendelsen for å senke magasinet videre, med noe lengre varighet, og tillatt maksimal vannstandssenkning på hele 2,5 m. Tappingen stanser når HRV nås. Flomtoppen er da dempet fra 7,0 m³/s (passiv regulering) ned til 2,0 m³/s pga. aktiv regulering som tilsvarer 68% demping av flomtoppen med 5,0 m³/s.



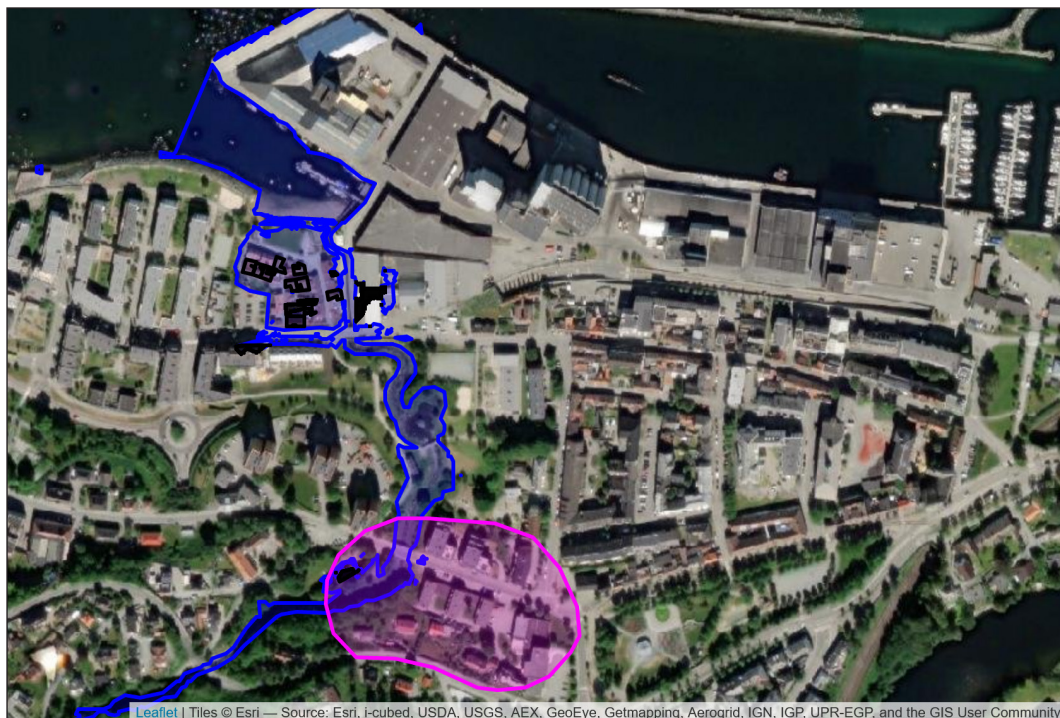
Figur 5. Resultater fra aktiv regulering med strategi III av Baklidammen under en 10-års flom.

Tabell 2. Aktiv flomdempsingsstrategi Ilvassdraget

No.	Parametere	Theisendammen	Baklidammen	Kobberdammen
1	Forhåndsnedtapping (senking av vannstand før en flomhendelse)	0 m (på HRV)	1 m (under HRV)	0 m (på HRV)
2	Maksimal vannføring i bunnappeluken	2 m ³ /s	4,5 m ³ /s	0,5 m ³ /s
3	Maksimal tillatt nedtapping	2 m under HRV	3 m under HRV	3 m under HRV

Tabell 3. Prosentvis reduksjon i maksimalflom og reduksjon av maksimal flomvannstand i magasinene på grunn av aktiv regulering – 7 flomhendelser

Flom	Gjentaksintervall (T)	%vis reduksjon i maksimalflom ved aktiv regulering				Reduksjon i maksimal magasin vannstand (m)		
		Kobberdammen	Baklidammen	Theisendammen	Ila	Kobberdammen	Baklidammen	Theisendammen
1	1000	40%	30%	37%	37%	0.17	0.13	0.29
2	500	44%	35%	42%	43%	0.18	0.15	0.32
3	200	55%	44%	50%	51%	0.21	0.17	0.34
4	100	61%	50%	56%	55%	0.22	0.18	0.35
5	50	54%	54%	62%	54%	0.22	0.20	0.35
6	25	39%	45%	61%	53%	0.22	0.21	0.31
7	10	10%	33%	52%	53%	0.24	0.23	0.27



Figur 6. Flomsone for 1000-års flomhendelse i Ilavassdraget. Kvikkleiresone i rosa, og bygninger med registrert næringsaktivitet i svart.

Aktiv reguleringsstrategi for Ilavassdraget samlet sett

Det er viktig å vurdere det samlede potensialet for flomdemping ved regulering av de tre dammene/magasinerne i vassdraget. Det er også viktig å velge en aktiv reguleringsstrategi som er praktisk gjennomførbar. Vi har valgt følgende strategier for aktiv regulering av forskjellige magasiner i vassdraget:

For å vurdere konsekvensene av de ulike strategiene, er det gjennomført simuleringer av syv flomscenarier med gjentakintervall fra 10 til 1000 år, hver av disse med både passiv regulering og utvalgte tiltak for flomdemping (aktiv regulering iht. Tabell 2). Passiv regulering tilsvarer dagens situasjon. Det er viktig å vurdere effekten av flomdemping nedstrøms Theisendammen for å få et bilde av faktisk påvirkning av tiltaket langs vassdraget i tettbygde strøk. Vi har valgt Ila som et referanseområde (mot utløp i Trondheimsfjorden). Hovedresultater fra analysene er oppsummert i Tabell 3. Beregningene

viser at en aktiv regulering (etter strategien i Tabell 2) vil kunne gi betydelig flomreduksjon langs hele vassdraget, fra 37 til 53 prosent reduksjon for maksimal flomvannføring. I det mest kritiske området ved Ila vil selv en 1000-årsflom reduseres med 37 prosent, mens flommer med gjentakintervall 10-200 år kan reduseres med over 50 prosent.

Samfunnsøkonomiske konsekvenser av aktiv flomdemping

Det er beregnet en total kostnad for skader på bygninger og vei på opptil 91 millioner kroner av en 1000-årsflom i Theisendammen med passiv regulering. Skader påført på veier utgjør 70 prosent av kostnaden. Det er skade på henholdsvis en riksvei, kommunal vei og private veier. 42 bygninger vil bli rammet av flommen, og iblant disse er det boliger, to kontorbygg og en barnehage. Barnehage er regnet som kritisk infrastruktur. Videre har åtte av de berørte bygningene kulturminneverdi. Skader på disse er

vanskelig å reparere. Flommen går gjennom et kvikkleirefelt (Figur 6), men dette området er sikret med plastringsstein. 73 bedrifter (enkeltmannsforetak og aksjeselskap), stiftelser og foreninger har registrert adresse i flomsonen. Bedriftene har til sammen 149 ansatte og hadde et samlet årsresultat i 2021 på 21 millioner kroner.

Diskusjon

Muligheter med aktiv regulering

Aktiv regulering forutsetter tillatelse til forhåndstapping av magasinene kort tid før flommen inntreffer. Dette krever at det finnes nøyaktige prognoser for flomutviklingen minst ett døgn, gjerne flere døgn, før flomtoppen kommer. Det forutsetter også at nødvendige tappeorgan er installerte, fungerer og kan brukes.

På grunn av begrenset reservekapasitet i magasinene, er det enklere å redusere en liten flom enn en stor. Dersom flomvarselet kommer i god tid, vil det være mulig å tappe ned et magasin og skaffe mer reservekapasitet. Dette kan derimot også gi negative konsekvenser hvis det likevel ikke kommer så mye vann at magasinet fylles opp igjen i løpet av flomepisoden. Det kan for eksempel redusere rekreasjonsverdien til dammen, eller gi økonomiske tap for kraftprodusenter, dersom det gjelder et reservoar for vannkraftverk. For de aktuelle magasinene i Ila-vassdraget er det hovedsakelig miljømessige virkninger som er aktuelle. Det er derfor nødvendig med avveininger der hydrologiske og tekniske forhold setter rammene. Avveiningene må gjøres ut fra miljøhensyn og samfunnsnyttens av å redusere flommer. Analysen kan gjennomføres ved å simulere og analysere historiske flommer i vassdraget, eller flommer beregnet ut fra opplysninger om ekstreme nedbørstilfeller. Flomdempning skjer først når det kommer en potensiell skadeflom, og da må dameier ha beredskap for å iverksette de beste strategiene til riktig tid. Med små magasiner, som de i Ila-vassdraget, er tidsfaktoren enda viktigere.

Modellsystemet som er utviklet, inkludert hydrologiske og hydrauliske data, er ment å legge grunnlag for verktøyutvikling for å plan-

legge, prioritere og formulere søknader om aktiv flomdempning. I dette arbeidet er flomdemping eksemplifisert gjennom tre ulike strategier, men det finnes alternative strategier. Det er nødvendig å studere nærmere balanse og finjustering mellom ulike strategier, oppnådd flomreduksjon og miljømessige virkninger i magasinene og resten av vassdraget. Strategier avhenger av årstid og de hydrologiske forholdene i vassdraget. En kortvarig, men svært intens sommerflom, slik en har sett mange eksempler på i de siste årene, krever andre strategier enn ved en mer langvarig flom, kombinert med snøsmelting (Flom i Tyskland, 2021: [Enorme ødeleggelser etter flomkatastrofen i Europa. Kan det samme skje i Norge? \(aftenposten.no\)](#)). Dette bør analyseres før en velger strategi.

Selv om det kan være dyrekjøpt, kan mye læres gjennom faktiske hendelser. Aktiv flomdempingsstrategi (forhåndstapping + regulering under en flomhendelse) ble gjennomført i Ila-vassdraget i januar 2022 under uværhendelsen «Gyda», etter at Trondheim kommune mottok ekstremvårvarsel fra NVE/meteorologisk institutt. Baklidammen ble nedtappet 1,5 m i forkant av hendelsen, og bunntappelukene ble styrt under flomhendelsen. Gjennom dette oppnådde Trondheim kommune betydelig demping av flomtoppen. I tillegg ble det samlet inn nyttig informasjon om gjennomførbarhet av aktiv regulering.

Et annet eksempel, i mye større målestokk, er erfaringer fra «Petra-flommen» i 2015 i Telemark. I likhet med «Gyda-flommen» i 2021, var dette et resultat av at restene av en tropisk storm (Petra) kom inn over Norge og skapte store problemer. Under Petra-flommen falt mellom 320 og 780 mm nedbør over store områder i Øst-Telemark. Det skapte den nest største flommen i Skiensvassdraget siden 1950. Flommen ble derimot betydelig redusert gjennom aktiv manøvrering av kraftverksmagasin i vassdraget. Et programsystem av samme type som det som ble brukt i Ila-vassdraget (men langt mer omfattende), var sentralt i arbeidet med å finne optimal tapping i magasinene (Rinde & al, 2023).

Vurdering av samfunnsøkonomiske konsekvenser

En viktig del av metodeutviklingen er å forbedre kostnadsestimatene. Detaljerte erfaringsdata gir mer nøyaktige kostnadsestimater enn byggekostnader (Deniz et al., 2017). Når vi vet eksakt tid og sted for skaden og har mer detaljinformasjon om bygningen som er skadet i en faktisk flom, kan vi koble til informasjon om terrenget rundt bygningen, vegetasjon og nedbør, som kan ha betydning for skadeomfanget. Det er også potensial for å forbedre flommodellering og inkludere flomparametere som dybde, hastighet og varighet på flommen, som også har betydning for skadeomfanget. Data for skadeutbetalinger fra forsikringsselskapene etter flomhendelser er gitt på adressenivå, men dette er personvernssensitive data. Det samme gjelder skadetakstrapporter etter flomhendelser, som kan inneholde relevante skadeparametere, men som også inneholder personopplysninger. Data på naturskadeforsikringsutbetalinger på adresse-nivå er tilgjengelige for kommuner og NVE gjennom Kunnskapsbanken (Lovdata, 2022). Forskningsinstitusjoner må også søke Justisdepartementet om opphevelse av taustauskshetsplikten for å få tilgang til disse dataene, som kan ta tid. Videre gir tilgjengelighet og kvaliteten på forsikringsdataene i dag begrenset mulighet til å benytte dataene til risikovurderinger (Thomassen og Hague, 2022), men det er kommet en ny forskrift, som også gir rammer for formatet på forsikringsdataene, som på sikt vil gi bedre analyser (Sintef, 2022).

Indirekte og ikke-prissatte virkninger utgjør en stor del av kostnadsbildet (Carrera, 2015). Avbrudd som følge av flom vil føre til indirekte kostnader, som gir konsekvenser for næringer som forsyner eller mottar produkter fra de rammede bedriftene. Indirekte kostnader knyttet til avbrudd i økonomisk aktivitet kan beregnes med flere tilnærminger, som kryssløpsmodeller og generelle likevektsmodeller. Ikke-prissatte konsekvenser, som innvirkning på landskapsbildet, friluftsliv, kulturmiljø, lokalsamfunn, og naturmangfold, er vanskelige å verdsette, men bør inngå i kostnadsestimeringen. Kostnads-

estimatene for bygninger med status som kulturminner og kritiske samfunnsfunksjoner benytter samme verdi som den generelle bygningstypen, som gir et mindre nøyaktig kostnadsestimat. Enkeltmannsforetak uten ansatte har ikke regnskapsplikt, og er ikke inkludert i beregningen av total omsetning hos berørte bedrifter. Tilgang til SSBs inntektsstatistikk, som har fulltelling, ville gitt et mer nøyaktig estimat.

Konklusjoner og veien videre

Aktiv regulering kan bidra betydelig til å redusere skadeflokker. Vi anbefaler derfor alle kommunale dameiere å vurdere om det er mulighet for å bruke bynære dammer for å oppnå flomdemping. Dette har stor betydning for å minimere negative samfunnsøkonomiske konsekvenser av flommer i byer, gi bedre dam-sikkerhet og gi bedre utnyttelse av "friluftsdammer" forvaltet av kommuner.

Modellsystemet vil også danne grunnlaget for en senere operativ modell, der flomvarsel kan beregnes ut fra kvantitative værvarsler, eventuelt supplert med radarmålinger. Det vil også gi grunnlag for å øke beredskapen, og eventuelt starte opp forhåndstapping og senkning av magasin kort tid før en større flom inn-treffer. Dette kan om ønskelig legges opp som et nærmest automatisk system, som bare slår alarm når det er fare på ferde, og virke som et mer presist supplement til NVE sine mer generelle farevarsler. I dag er slike systemer i operativ drift for store kraftverkssystemer der det er døgnbemanning (Rinde & al, 2023).

Klimaendringer gir mindre forutsigbare flomforløp. Det er derfor behov for oppdatert kunnskap om kostnadsdrivere ved flommer, som flomparameterne flomtopp, hastighet og varighet på vannføringen. Mer tilgjengelig og bedre kvalitet på forsikringsdata vil gi bedre kostnadsfunksjoner, som gir bedre nytteberegninger og beslutningsgrunnlag for investering i tappeorgan og flomregulering.

Anerkjennelse av bidragsyttere

Dette arbeidet er finansiert av Trondheim kommune, og delfinansiert av Forskningsrådet

gjennom henholdsvis forskningscenteret Klima 2050 (med prosjektnummer 237859) og innovasjonsprosjektet SamVann (med prosjektnummer 327753).

Referanser

Carrera, L. (2015). *Assessing direct and indirect economic impacts of a flood event through the integration of spatial and computable general equilibrium modeling*, Environmental Modelling & Software, 2015. 63: p. 109-122.

Deniz, D., Arneson, E., Liel, AB., Dashti, S., Javernick-Will, AN (2017). *Flood loss models for residential buildings, based on the 2013 Colorado floods*. Natural hazards (2017); 85(2): 977-1003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2615-3>.

Geonorg (2022). <https://nedlasting.geonorge.no/geonorge/Samferdsel/Banenettnetk/>.

Glover, B., N. Sælthun, and K. Lilleeng Walløe (2018). *Verdien av vassdragsreguleringer for reduksjon av flomskader*. Multiconsult: Oslo, Norway, 2018: p. 50.

Killingtveit, Å., Rinde, T., Alfredsen, K., Østhus, N., Røhr, P.C. (2021), *Flood-Forecasting and Flood Management for the Skienselva River System in Norway*, International Journal on Hydropower and Dams. 2021, 28 (2).

Killingtveit, Å. (2021), *Flomvarsling og flomkontroll i Ilavassdraget, Trondheim*. Rapport fra Trinn 2: Flomdemping ved aktiv bruk av reguleringsmagasin. Notat fra Hydroinformatikk AS datert 22/01-2021

Killingtveit, Å. (2022), *Flomforhold i Benna. Strategi for manøvrering av Benna-magasinet under flom*. Notat fra Hydroinformatikk AS datert 30/05-2022

Komolafe, A., Herath A., Avtar R (2018), *Sensitivity of flood damage estimation to spatial resolution*. Journal of Flood Risk Management (2018); 11: 370-381. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12224>.

Lovdata (2022), *Forskrift om behandling av opplysninger om natur- og vannskader i kunnskapsbanken*, https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2022-06-01-954/KAPITTEL_4#%C2%A77.

Multiconsult (2016). *DAMBRUDDSBØLGEBEREGNINGSRAPPORT. Klassifisering av dammer i Ilavassdraget*, DOKUMENTKODE: 418550-02-RIVASS-RAP-002.

Multiconsult (2018). *Flomberegning Kobberdammen, Baklidammen og Theisendammen*. Dokumentkode 418550-RIVass-RAP-001.

OED (2009). *Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften)*, Olje og Energidepartementet, Publisert i 2009.

NVE (2016). *Klimaendring og framtidige flommer i Norge*, vitenskapelig rapport publisert av Norges vassdrags- og Energidirektoratet.

NVE (2016a). *Nytte/kostverktøy NKA-2016 v. 1.33c - Brukerveiledning*.

NOU (2015). *Overvann i byer og tettsteder- som problemer og ressurs*, Utredning fra et utvalg nedsatt ved kongelig resolusjon i 2014, Klima- og miljødepartementet, Regjeringen.no.

NOU (2015a). *Overvann i byer og tettsteder- som problemer og ressurs*. Del 2 gjeldende håndtering av overvann og anbefalt tilnærming, Klima- og miljødepartementet, Regjeringen.no.

NVE (2000). *Flommen kommer*, Sluttrapport fra HYDRA Et forskningsprosjekt om flom <https://publikasjoner.nve.no/hydra/diverse/flommenkommer.pdf>

NVE (1983). *Hydrologisk modell for flomberegninger*. Rapport nr. 2-83, vitenskapelig rapport publisert av Norges vassdrags- og Energidirektoratet.

Rinde, T., Killingtveit, Å., Alfredsen, K., Østhus, N., Røhr, P.C. (2023). *FLOOD RISK MANAGEMENT – A CASE STUDY FROM TELEMARKE RIVER, NORWAY, Flood Risk Assessment, ICOLD-Bulletin no. XXX (Under preparation)*

Sintef (2022). *Insurance loss data for improved climate change adaptation- conditions for data sharing and utilization*, Sintef technical report nr. 34 – 2022. https://www.sintefbok.no/book/download/1330/klima2050_report_34pdf.

Thieken, A. H., Ackermann, V., Elmer, F., Kreibich, H., Kuhlmann, B., Kunert, U., Maiwald, H., Merz, B., Müller, M., Piroth, K., Schwarz, J., Schwarze, R., Seifert, I., Seifert, J. (2009 online). *Methods for the evaluation of direct and indirect flood losses*, RIMAX Contributions at the 4th International Symposium on Flood Defence (ISFD4) (Toronto 2009), 10 p.

Thomassen, M. & Hauge, Å. L. (2022). *Klima 2050 Report 33. Insurance loss data for improved climate change adaptation*.