

flomdemping

flomvern og

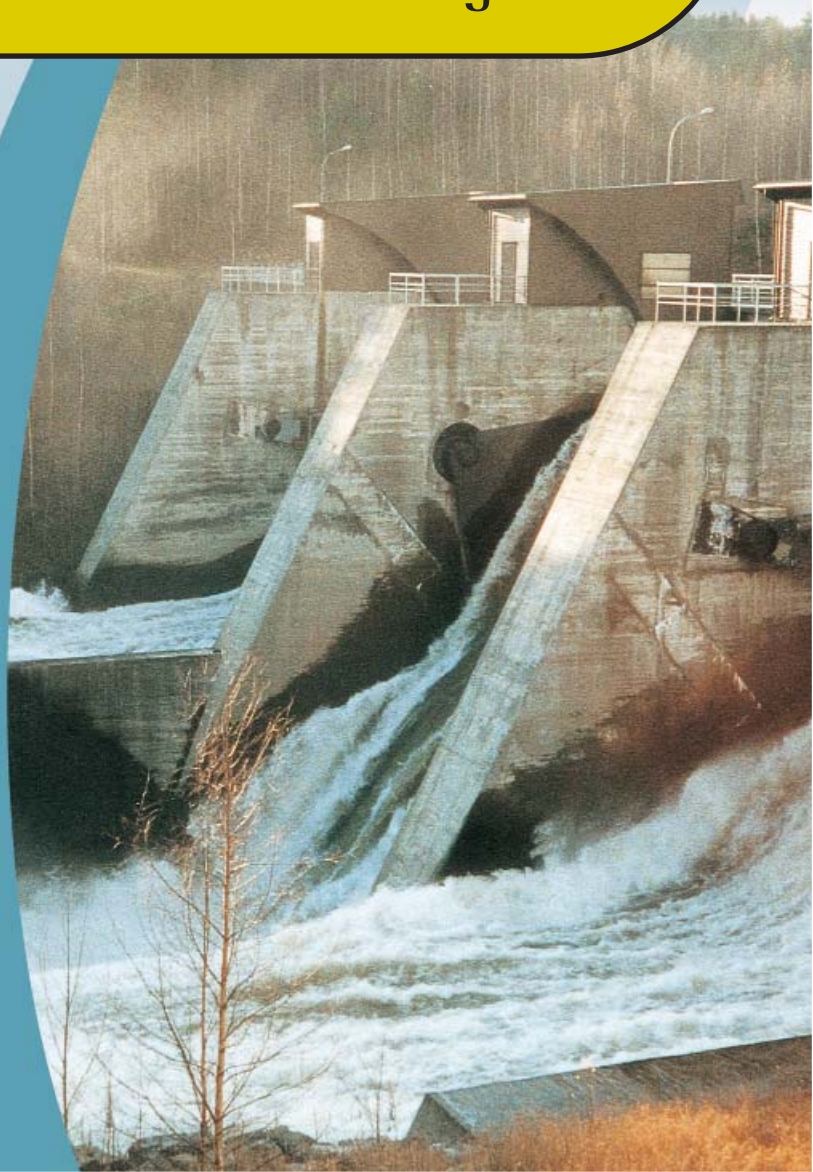
flomhandtering



Magne Wathne og Knut Alfredsen

SINTEF

## Effekten av regulering på flomdemping i Gudbrandsdalslågen



## HYDRA - et forskningsprogram om flom

HYDRA er et forskningsprogram om flom initiert av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) i 1995. Programmet har en tidsramme på 3 år, med avslutning medio 1999, og en kostnadsramme på ca. 18 mill. kroner. HYDRA er i hovedsak finansiert av Olje- og energidepartementet.

Arbeidshypotesen til HYDRA er at summen av alle menneskelige påvirkninger i form av arealbruk, reguleringer, forbygningsarbeider m.m. kan ha økt risikoen for flom.

Målgruppen for HYDRA er statlige og kommunale myndigheter, forsikringsbransjen, utdannings- og forskningsinstitusjoner og andre institusjoner. Nedenfor gis en oversikt over fagfelt/tema som blir berørt i HYDRA:

- Naturgrunnlag og arealbruk
- Skaderisikoanalyse
- Tettsteder
- Miljøvirkninger av flom og flomforebyggende tiltak
- Flomdemping, flomvern og flomhandtering
- Databaser og GIS
- Modellutvikling

Sentrale aktører i HYDRA er; Det norske meteorologiske institutt (DNMI), Glommens og Laagens Brukseierforening (GLB), Jordforsk, Norges geologiske undersøkelse (NGU), Norges Landbruks-høgskole (NLH), Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), Norsk institutt for jord- og skogkartlegging (NIJOS), Norsk institutt for vannforskning (NIVA), SINTEF, Stiftelsen for Naturforskning og Kulturminneforskning (NINA/NIKU) og universitetene i Oslo og Bergen. HYDRA is a research programme on floods initi-

## HYDRA - a research programme on floods

ated by the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) in 1995. The programme has a time frame of 3 years, terminating in 1999, and with an economic framework of NOK 18 million. HYDRA is largely financed by the Ministry of Petroleum and Energy.

The working hypothesis for HYDRA is that the sum of all human impacts in the form of land use, regulation, flood protection etc., can have increased the risk of floods.

HYDRA is aimed at state and municipal authorities, insurance companies, educational and research institutions, and other organization.

An overview of the scientific content in HYDRA is:

- Natural resources and land use
- Risk analysis
- Urban areas
- Flood reduction, flood protection and flood management
- Databases and GIS
- Environmental consequences of floods and flood prevention measures
- Modelling

Central institutions in the HYDRA programme are; The Norwegian Meteorological Institute (DNMI), The Glommens and Laagens Water Management Association (GLB), Centre of Soil and Environmental Research (Jordforsk), The Norwegian Geological Survey (NGU), The Agriculture University of Norway (NLH), The Norwegian University of Science and Technology (NTNU), The Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE), The Norwegian Institute of Land Inventory (NIJOS), The Norwegian Institute for Water Research (NIVA), The Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology (SINTEF), The Norwegian Institute for Nature and Cultural Heritage Research (NINA/NIKU) and the Universities of Oslo and Bergen.

HYDRA-rapport nr. F03

# Modellstudie av reguleringens flomdempende effekt i Gudbrandsdalslågen

av

Magne Wathne og Knut Alfredsen  
SINTEF

# Forord

"Flomdempning i regulerte vassdrag" inngår som delprosjekt F03 i det overordnede prosjekt "Flomdempning, flomvern og flomhandtering" under HYDRA-programmet.

Delprosjektet ble startet i september 1996. Modellstrukturen er beskrevet i en tidligere rapport (Wathne og Alfredsen 1997), også utgitt som notat nr 7/97 i HYDRAs egen publikasjonsserie.

Dan Lundquist har vært kontaktperson i faglige spørsmål om delprosjektet både som leder for F-gruppa og som ansatt ved Glommens og Laagens Brukseierforening (GLB). Dessuten har J.K. Tingvold fra GLB vært behjelpelig med å skaffe supplerende informasjon, spesielt om kraftverkssystemet. HYDRA-programmets modellgruppe har levert nødvendige hydrologiske data.

Knut Alfredsen har stått for programutviklingen. Han har gjort dette i forbindelse med arbeidet på sin doktorgrad ved Institutt for vassbygging, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Avhandlingen omhandler objekt-orientert modellering av vassdragsproblemer, og dette HYDRA-prosjektet vil være et av eksemplene på utprøving av modellen og metodikken.

Kjetil Arne Vaskinn har lest gjennom rapporten som en del av SINTEFs kvalitetssikring.

Trondheim, desember 1998

Magne Wathne  
prosjektleder

# Innhold

Side

	Sammendrag .....	5
	Summary .....	6
1	Innledning.....	7
1.1	Formål.....	7
1.2	Bakgrunn .....	7
2	Simuleringsmodellen .....	8
2.1	Generelt.....	8
2.2	Vassdragets struktur og topologi.....	8
2.3	Beregningsmetoder .....	9
2.4	Data .....	9
2.5	Bruk .....	9
3	Data om Gudbrandsdalslågen .....	11
3.1	Elementene i vassdraget.....	11
3.2	Utløpskapasitet fra magasinene .....	11
3.2.1	Med regulering.....	11
3.2.2	Uten regulering.....	11
3.3	Andre forutsetninger .....	24
3.3.1	Med regulering.....	24
3.3.2	Uten regulering.....	24
4	Resultater.....	26
4.1	Flommen i 1995 .....	26
4.2	Effekt av regulering.....	26
4.3	Konklusjoner.....	26
	Referanser .....	30
	Tidligere utgitte i HYDRA-serien .....	31

## Liste over figurer

Figur 1	Skjematisk oversikt over Gudbrandsdalslågen .....	12
Figur 2	Utløpskarakteristikk Aursjøen.....	17
Figur 3	Utløpskarakteristikk Breidalsvatn .....	18
Figur 4	Utløpskarakteristikk Bygdin.....	18
Figur 5	Utløpskarakteristikk Heimdalsvatn.....	19
Figur 6	Utløpskarakteristikk Kaldfjorden.....	19
Figur 7	Utløpskarakteristikk Olstappen .....	20
Figur 8	Utløpskarakteristikk Raudalsvatn .....	20
Figur 9	Utløpskarakteristikk Tesse .....	21
Figur 10	Utløpskarakteristikk Vinsteren .....	21
Figur 11	Utløpskarakteristikk Øyangen.....	22
Figur 12	Utløpskarakteristikk Losna.....	23
Figur 13	Utløpskarakteristikk Vågåvatn .....	23
Figur 14	Flommen i 1995 - vannstand ved Losna.....	27
Figur 15	Flommen i 1995 - vannføring ved Losna .....	27
Figur 16	Effekt av regulering - vannstand ved Losna.....	28
Figur 17	Effekt av regulering - vannføring ved Losna .....	28

## Liste over tabeller

Tabell 1	Delfelter i simuleringen.....	13
Tabell 2	Målestasjoner for overføring av tilsigsdata.....	14
Tabell 3	Magasinstørrelse .....	14
Tabell 4	Tilsgit til magasinene.....	15
Tabell 5	Startverdier for simulering - uregulert tilstand.....	15
Tabell 6	Kraftverk .....	16
Tabell 7	Tunneler .....	16
Tabell 8	Tappeorganer fra magasinene.....	16

# Sammendrag

Rapporten gjelder delprosjekt F3, "Flomdempning i regulerte vassdrag", som inngår i det overordnede prosjekt "Flomdempning, flomvern og flomhandtering" under HYDRA-programmet. Målet med delprosjektet har vært å finne effekten av regulering på flommer i Gudbrandsdalslågen.

Det er utviklet en ny vassdragsmodell for å simulere flommer, inklusive rutiner for endringer i magasinnivå og for enkel ruting av flomtopper. Rapporten omhandler en systembeskrivelse av regnemodellen og av vassdraget slik det blir representert i beregningene. Modellen er utviklet som en objektorientert modell med fire uavhengige hoveddeler:

- Vassdragets struktur (klasser av objekter)
- Beregningsmetoder (hydrologiske og hydrauliske simuleringer)
- Data (faste parametre, tidsserier, magasinkurver, etc)
- Prosedyrer for styring av beregningene

Første fase i anvendelsen av modellen har vært å foreta en simulering av den store flommen som forekom sommeren 1995 i Gudbrandsdalslågen og ellers på Østlandet. Neste fase har vært en lignende simulering gjort av den samme flommen men med den endring at vassdraget er modellert som om det var uregulert. Hensikten har vært å sammenligne de to simuleringene av den samme flommen for å finne betydningen av at magasinene er regulerte.

Det foreligger et godt sett med målinger fra flommen i 1995. Tidsserien av vannstanden ved Losna i Gudbrandsdalen er benyttet til å vise at modellen gjengir flommen på en svært akseptabel måte.

For å kunne simulere Gudbrandsdalslågen som et uregulert vassdrag har det vært nødvendig å generere utløpskarakteristikk for samtlige magasin. For magasinene i Gudbrandsdalslågen er det benyttet en hydraulisk metode til å bestemme vannføringen ut av hver uregulert innsjø som en funksjon av vannstanden. Metoden går ut fra at utløpet kan beregnes som et såkalt bredkantet overløp der det forekommer kritisk strømning.

# Summary

The report concerns the project "Flood reduction in regulated rivers" under the HYDRA research programme. The purpose of the project has been to determine the effects of the regulation on floods in the river Gudbrandsdalslågen in Norway.

A new model has been developed for the purpose of simulating the progress of a flood down the river. It includes separate routines for varying the storage in the reservoirs and for a simple routing of the flood peaks through the channels. A schematic description of the computer program is provided along with the abstract representation of the river. The model is object-oriented with four independent modules:

- Schematic structure of the river (classes of objects)
- Computational routines (hydrologic or hydraulic simulations)
- Data (parameters, time series, reservoir curves, etc.)
- Routines for administration of the computations

The first phase in the model application has been to reproduce the major flood which took place in Eastern Norway in 1995. The subsequent phase was to determine how the same flood would have proceeded if the river had not been regulated. The purpose has been to compare the two simulations in order to determine the consequences of the dams and spillways on the flood attenuation and travel time.

A time series of the 1995 flood at the gauging station Losna has shown that the model reproduces the flood event in a very satisfactory way.

The simulation of the unregulated case requires a different set of input parameters for the reservoirs. The absence of regulation assumes the reservoirs to be natural lakes without dams or spillways. A hydraulic method has been employed to generate the discharge characteristics as a function of the water level in the respective lakes. The method assumes that the discharge can be estimated as an overflow over a broad-crested weir where critical flow occurs.



# 1. Innledning

## 1.1 Formål

Målet med prosjektet er å finne hvor stor virkning vassdragsreguleringen har på flomforholdene i Gudbrandsdalslågen. Det er ved hjelp av en ny vassdrags-modell foretatt en analyse av flommen som forekom på Østlandet i 1995. Modellen er benyttet til å sammenligne forløpet av denne flommen slik den faktisk var med slik den ville ha vært i det samme vassdraget men uten reguleringene.

Modellen er objekt-orientert. Den er basert på nye prinsipper for å knytte sammen forskjellige hydrologiske og hydrauliske beregningsmetoder og så anvende disse beregningene på de forskjellige fysiske komponentene i vassdraget. Intensjonen er å bidra til den generelle forståelse av sammenhengen mellom regulering og flomdempning.

Simuleringen tar utgangspunkt i realistiske magasin-nivå ved start av flom-episoden. For flommen i 1995 er disse dataene kjent. I uregulert tilstand er det foretatt to simuleringer, en med samme utgangsnivå som i 1995 samt en som starter på et høyere nivå tilsvarende naturlig vannstand.

## 1.2 Bakgrunn

Det er tidligere utført et forprosjekt som munnet ut i anbefalinger om et større prosjekt for å studere flomdempning i regulerte vassdrag (Sand et al 1987). Gudbrandsdalslågen var et av de vassdrag som det ble foreslått å undersøke. Den foreløpige konklusjonen fra dette forprosjektet er at reguleringene i vassdraget har virket flomdempende.

I forbindelse med vannbruksplan for Gudbrandsdalslågen, (Oppland fylkeskommune 1987), utførte SINTEF beregninger av regulert og uregulert vassføring en rekke steder i vassdraget, ved simulering med ENMAG-modellen som brukes på kraftverksystem med et enkelt magasin (Sæther 1985). Disse dataene er også brukt for analyse av flomforhold i vassdraget, og er videre kombinert med en modell for stasjonær strømning i vassdrag (HEC-2) til å finne vannstand og oversvømmet areal.

I følge en foreløpig undersøkelse etter flommen i 1995, (Tingvold 1996), var det en ubetydelig forhåndstapping i magasinene i Otta og Vinstra. Flomvannstanden i Losnavatn er antatt å ha blitt redusert med 325 m<sup>3</sup>/s eller 12 %. Når det gjelder vannstanden i Mjøsa, påvirkes den også av oppstrøms magasiner men også av tappingen nedstrøms ved Svanfoss. Den totale effekten av disse tiltakene har medført en reduksjon av flomvannstanden på 0,5–0,75 m.

Et litteratursøk utført i regi av HYDRA-programmet har vist at det ligger en del relevant informasjon i de undersøkelser som ble iverksatt i USA etter den store flommen i Mississippi i 1993 (Wathne 1997). Dette omfatter erfaringer med regulering ved hjelp av magasiner bygd for flere formål, inklusive navigasjon og flomdempning (US Army Corps of Engineers 1994). Det er først og fremst slått fast at de store magasinene langs Mississippi har fungert bra. På den andre siden kan disse ferske erfaringene bare i begrenset grad overføres til Norge på grunn av at Mississippi avviker så sterkt fra norske vassdrag både med hensyn på størrelse og form (Perry 1994). Reguleringen og dermed flomsikringen i Mississippi foregår i vesentlig grad i selve elveleiet og ikke i oppstrøms magasiner.

En av konklusjonene fra USA er at det er viktig å kunne foreta en god ruting ved hjelp av hydrauliske (ikke-stasjonære) beregninger. Analyser av kritiske strekninger langs vassdraget må være spesielt detaljerte. Dette fordrer pålitelige og detaljerte måledata. Gode data er også nødvendige å ha for å kunne analysere utviklingen av flommen og mulige mottiltak.

Flomtiltaksutvalget som ble nedsatt av Nærings- og energidepartementet i 1995, har sett ganske inngående på muligheten for vassdragsregulering som et tiltak mot flom (NOU 1996:16 1996). Rapporten aktualiserer spørsmålet om ytterligere regulering i vassdrag med lav reguleringsgrad, inkludert Glomma og Lågen. Et av virkemidlene er å la flomdempning inngå som et formål i tillegg til kraftproduksjon ved planlegging og prosjektering av et magasin. Dette delprosjektet under HYDRA-programmet vil likevel begrense seg til å se på mulighetene for flomdempning ved hjelp av eksisterende magasiner som er bygd for kraftverk alene.

# 2. Simuleringsmodellen

## 2.1 Generelt

Vassdragsmodellen simulerer transporten av vann i et regulert vassdrag som består av elver, tunneler, kraftverk og magasin. Modellen tillater stor fleksibilitet for å kunne analysere et vilkårlig vassdrag. Oppbyggingen av en objekt-orientert modell innebærer at det må spesifiseres hvilke hydrauliske eller hydrologiske beregninger som skal utføres for hver enkelt del av vassdraget. Generelt vil ulike metoder være relevante for ulike deler av vassdraget og kraftverksystemet. I denne sammenhengen der formålet er å se på regulering og flomdemping, er modellen først og fremst utstyrt med metoder for hydrologisk ruting. Andre beregnings-metoder skal kunne legges inn dersom det er nødvendig, og uten at det krever en omfattende endring i selv programvaren.

Ordrbruken i denne rapporten er influert av moderne teknologi på utvikling av programvare. Såkalt objekt-orientert programmering ligger til grunn for det regneverktøyet som i dette delprosjektet blir tilrettelagt for Gudbrandsdalslågen (Alfredsen 1999). En del av de ord som benyttes i rapporten er tillagt en spesiell mening:

### Komponent

Et element eller avgrenset del av et reelt vassdrag og kraftverksystem, så som elvestrekning, tunnel, nedslagsfelt, kraftverk, magasin eller sjø, luke eller overløp.

### Objekt

Abstrakt representasjon av en fysisk komponent.

### Modell eller program

Det overordnede regneverktøyet som blir benyttet i simuleringen og som er tilkopleet flere uavhengige beregningsrutiner.

### Struktur eller topologi

Abstrakt representasjon av hele vassdraget slik at det lar seg analysere ved hjelp av programmet. (Det er på dette punkt at det kan oppstå forvirring da det i mange andre sammenhenger er nærliggende å bruke ordet "modell" med referanse til den matematiske framstilling av selve vassdraget.) Strukturen består av et sett med objekter samt en innbyrdes avhengighet mellom objektene. Koplingen mellom to objekter samsvarer med grensen mellom de to fysiske komponentene i vassdraget.

## 2.2 Vassdragets struktur og topologi

Elementene i strukturen er de fysiske komponentene som vi finner i et regulert vassdrag. Modellen har komponenter som representerer de mest vanlige delene av et vassdrag. Følgende typer er definert i sammenheng med HYDRA-prosjektet:

- Elvestrekninger
- Tunneler
- Nedslagsfelt
- Kraftverk
- Magasin og sjøer
- Luker og overløp

Dersom problemstillingen er en annen enn å analysere effekt av regulering på flomdemping, kan det være aktuelt å inkludere andre typer av komponenter i simuleringen. I så fall kan disse defineres og føyes inn i systemet ved behov. Eksempelvis kan det være aktuelt å definere noen andre typer av komponenter for bedre å kunne simulere flomsituasjoner, blant annet flomsletter. Dette prinsippet forenkler eventuelle utvidelser eller endringer og tillater en større detaljeringsgrad i den skjematisk framstilling av vassdraget.

Uttrykket topologi kommer fra matematikk og refererer til den skjematisk formen på en geometrisk figur. Vassdragsmodellen som skal benyttes i simuleringen er basert på at vassdraget er representert av et nettverk med knutepunkt og linjer. Topologien av vassdraget er en beskrivelse av hvordan knutepunktene er plassert i forhold til hverandre og forbundet ved hjelp av linjer.

Et vassdrag med sideelver og et tilhørende kraftverksystem vil som regel framstå med en tilnærmet trestruktur der grenene i treet tilsvarer sideelvene. Den samme strukturen vil bevares når de fysiske komponentene i vassdraget representeres av knutepunkter i den skjematisk figuren. Bevegelsen av vannet må være entydig spesifisert med hensyn på hva som er oppstrøms og hva som er nedstrøms. To elvestrekninger på rad vil dermed framstå som to knutepunkter med en forbindelseslinje mellom seg. Eventuelle hydrologiske eller hydrauliske beregninger er knyttet til de to knutepunktene. Linjen mellom dem har ingen fysisk tolkning og markerer bare at det finnes en fysisk eller logisk kopling mellom de to objektene. Hvis de to knutepunktene er tilstøtende elvestrekninger, vil forbindelsen bestå i at data om vannføringen blir overført fra den øvre av de to strekningene til den nedre.

Elvestrengen kan om ønskelig deles opp i flere strekninger, dermed flere knutepunkter og flere linjer i den skjematiske framstillingen. Detaljeringsgraden på dette nivå er bestemt av hydrologiske betraktninger ved at hver strekning har tilsig fra et lokalfelt. Jo flere knutepunkter det er i strukturen, jo mer nøyaktig vil beregningene av tilsiget bli, men jo større vil også behovet for data bli.

Hvis det skal foretas hydrauliske analyser i enkelte strekninger, eksempelvis vannlinje-beregning eller dynamisk ruting, vil det vil bli spørsmål om detaljeringsgrad på et lavere nivå. Antallet tverrprofiler langs en strekning øker nøyaktigheten i beregningene for vedkommende strekning.

Topologidelen av modellen inneholder rutiner for å bygge strukturen i vassdraget og definere koplinger mellom modulene. Her bestemmes også rekkefølgen av beregninger blant komponentene slik at dette er logisk og fysisk riktig. Beregningene må samsvare med vannets bevegelse fra de mindre sideelver til de større og endelig inn i hovedløpet. Modellen har en begrensning ved at den ikke kan simulere et system der vannet kunne gå i ring og komme tilbake til utgangspunktet. Parallele transportveier fra et magasin er derimot fullt mulig, eksempelvis gjennom et kraftverk samt gjennom et overløp.

## 2.3 Beregningsmetoder

Det må legges inn et sett med beregningsmetoder i programmet for å kunne foreta tekniske, økonomiske eller andre analyser på de ulike fysiske komponentene. Hvilke beregningsmetoder som anvendes i en gitt modell, avhenger av det problemet som foreligger. Følgende beregningsrutiner er tatt med for å simulere flom i Gudbrandsdalslågen:

- Tapping fra magasiner (manøvreringsreglement, overløpsformel).
- Ruting av flomtopper gjennom magasin og innsjøer (level pool ruting).
- Ruting av flomtopper i elver (Muskingum-metode).
- Hydrauliske beregninger av tunneler (Mannings formel).

Beregningsmetodene som ligger inne i en modell, kan anses som verktøy til bruk på de delene av vassdraget der vedkommende beregning er aktuell. Det foretas en kontroll av at komponenten har de rette egenskaper og at alle nødvendige data er tilgjengelige, f.eks. at en tunnel har de data som gjør det mulig å beregne strømning i fylte tverrsnitt.

En HBV-modell kunne ha vært benyttet til å prognosere tilsig fra nedslagsfelt, men er i denne anvendelsen erstattet av tidsserier med de målte tilsig.

Det vil være fullt mulig å legge inn mer avanserte beregningsrutiner enn de som er nevnt ovenfor. Spesielt aktuelt kan det være å benytte en dynamisk ruting på elvestrekningene (f.eks. DAMBRK) i stedet for Muskingum-metoden.

## 2.4 Data

Data er delt inn i to kategorier som internt i programmet behandles hver for seg:

### Faste data

Dette er konstanter som vanligvis vil være en del av inngangsdata. Det omfatter egenskapsdata, dvs den nødvendige beskrivelsen av vedkommende komponent ved hjelp av parametre så som størrelse, geometri og andre fysiske karakteristika. Noen av disse er målte verdier, f. eks. tverrprofiler i ei elv, areal av et nedslagsfelt. Andre parametre er avledet, f.eks. Mannings faktor for tunnel og elv.

### Variable data

Den andre kategorien er de variable som generelt endrer seg fra et tidsskritt til det neste. Noen av disse variable er resultatene av simuleringen, så som vannstand og vassføring. Startverdier må angis for disse variable, enten som standardverdier eller som inngangsdata.

Data kan koples til komponentene i et fritt format. Data kan spenne fra enkle verdier (eksempelvis en startvannstand) til sammensatte datasett. Eksempler på det siste er magasincurver for vannstand-areal eller tidsserier.

## 2.5 Bruk

Prosedyren for bruk av modellen er som følger:

### 1 Inndeling av systemet og oppsett av modellkomponenter.

Systemet må deles inn i høvelige komponenter, kalt objekter. Spesielt ved inndeling av elvestrekningene må det utvises et visst skjønn. Inndeling av lange strekninger vil være styrt både av hvilke beregningsmetoder som skal anvendes samt av hydrauliske forhold. Samløpet av to elver vil bli definert som to komponenter.

### 2 Valg av metoder for komponentene.

Det må være angitt en form for databehandling til hver enkel komponent. Dette spenner fra simulering av hydrologiske eller hydrauliske prosesser til håndtering av eksterne data.

### 3 Tilrettelegging av data.

Mengden av data som skal inn i hver komponent, er direkte styrt av den typen databehandling som skal utføres for vedkommende komponent. Det er ikke noe problem å legge inn mer data, men dersom ikke alle nødvendige data er tilgjengelige vil ikke modellen kunne kjøre. Data blir tatt inn via tekstfiler.

### 4 Oppsett av simuleringsvariable.

Modellen kan ha et vilkårlig antall variable i simuleringen av vassdraget. I forbindelse med flomberegning vil vannføring eller vannstand være de mest aktuelle, men modellstrukturen gjør det mulig å ta med andre tidsvarierende variable som inngår i flere komponenter. Brukeren må derfor definere de variable som skal transporteres mellom komponentene og hvordan disse skal bli overført. Brukeren kan dessuten definere hvilke parametre som skal lagres eksternt under simuleringen.

### 5 Valg av numeriske parametre.

Periode og tidssteg for simuleringen må spesifiseres for å oppnå sikre og nyttige resultater.

# 3. Data om Gudbrandsdalslågen

## 3.1 Elementene i vassdraget

De komponentene som er inkludert i simuleringen av vassdraget er: nedslagsfelt, magasin, kraftverk og elvestrekninger. Nødvendige data omfatter: tilsigsserier, magasin (areal, dybde), tappeorganer (kapasitet), Muskingum-parametre. Til sammenligning er det i 1995 målt vannføring i flere punkter, men disse data inngår ikke i simuleringen.

En skematisk oversikt over det fysiske systemet er vist i Figur 1. Nedstrøms avgrensning for analysen settes til utløpet av Mjøsa.

En serie med punkter som vist i Tabell 1 er definert langs vassdraget. Hvert punkt markerer nedstrøms ende av et delfelt som er et objekt i modellen. Punktene blir dermed også grensen mellom to komponenter eller objekter.

Tabell 2 er de målestasjonene som det er innhentet tilsigsdata fra. Tilsiget til hvert av feltene i Tabell 1 er beregnet ved en skalering av dataene fra de valgte målestasjonene. 27 målestasjoner har vært vurdert, men de 8 i Tabell 2 er blitt benyttet i simuleringen på grunn av tre forhold:

- Representativitet med hensyn på høydeforskjell
- Om data har vært tilgjengelige i 1995
- Om stasjonen er upåvirket av regulering

Tabell 3, 4 og 5 har en del informasjon om magasinene som inngår i simuleringen. Tabell 3 angir reguleringsgrenser samt volumet. Tabell 4 viser hvor stort midlere tilsig er, både i absolutte tall og som en reguleringsprosent. Tabell 5 har starttilstanden i reguleringsmagasinene. Den mest realistiske startverdien for nivåene i de uregulerte innsjøene er den naturlige vannstand. Det er resultatene fra denne simuleringen som i neste kapittel sammenlignes med flommen i 1995. Det er dessuten som vist i Tabell 5 tilrettelagt et datasett med samme startnivå for magasinene som forut for flommen i 1995, dvs nær LRV.

Losna og Vågåvatn er de to eneste naturlige innsjøene som er tatt med i beregningen. En del andre mindre magasiner i nedslagsfeltet er utelatt. Summen av de regulerte magasinene oppstrøms Mjøsa er 994 million m<sup>3</sup>. Kapasiteten regnes som volumet mellom HRV og LRV.

Tabell 6 har de aktuelle kraftverkene. En del mindre kraftverk er utelatt, deriblant Mesna og Moksa. Den totale installerte effekten som inngår i modelleringen er 764 MW av en total kapasitet på 817 MW for alle Gudbrandsdalsverkene.

Tabell 7 viser bare de store tunnelene i systemet. To av dem er overføringstunneler og de to andre er driftstunneler.

## 3.2 Utløpskapasitet fra magasinene

### 3.2.1 Med regulering

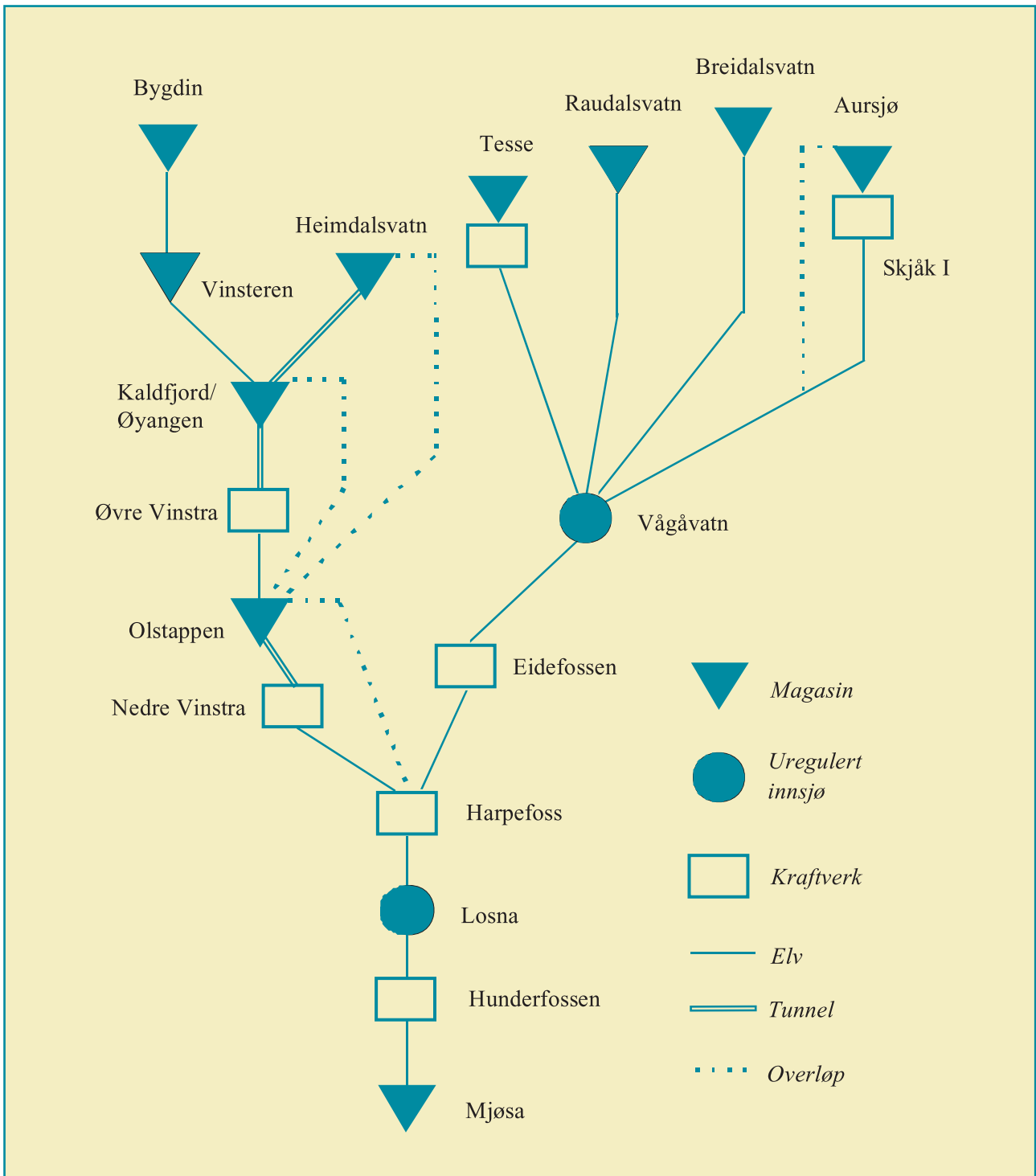
Utløpskurvene for reguleringsmagasinene er innhentet fra GLB. Kurvene er basert på de tappeorganene som er angitt i Tabell 8. Det er antatt at samtlige tappeorganer ble benyttet til full kapasitet under flommen i 1995. Kapasiteten er gitt som data til modellen i form av tabeller.

### 3.2.2 Uten regulering

Forskjellen i simulering av regulert og uregulert tilstand har vært utløpskapasiteten for magasinene i tillegg til initialvannstanden. Utløpskurver er bestemt for hvert av reguleringsmagasinene slik de er antatt å ha vært før dammer og tappeorganer ble bygd. Dette er gjort på basis av tilgjengelig materiale, i alt vesentlig den siste av GLBs egne oversiktsbøker (Rognlien 1995). For flere magasin er det dokumentert at flomavledning skal være tilnærmet lik de naturlige forhold, uten at en nærmere spesifisering foreligger for hvordan dette kravet er tilfredsstilt.

I fravær av reelle data er utløpskarakteristikken for reguleringsmagasinene, unntatt Bygdin og Heimdalsvatnet, bestemt ved hjelp av hydrauliske betraktninger. For Heimdalsvatnet er utløpet likt det som brukes for regulert magasin. For Bygdin er naturkurven framskaffet av GLB.

Kurvene er basert på en antakelse om at utløpet fra et magasin fungerer tilnærmet som et såkalt bredkantet overløp. Dette er egentlig en konstruksjon i form av en terskel der utstrekningen i strømnings-retningen er relativt stor. Det forutsettes kritisk strømning på overløpet, en forutsetning som sannsynligvis ikke passer med de faktiske forhold ved utløpet av et naturlig magasin men som gjør det mulig å uttrykke vannføringen på en enkel måte. I teorien er strømmingen ut av et magasin med et bredkantet overløp helt og holdent styrt av magasindybden og ikke av forholdene i kanalen nedstrøms magasinet. Det vanlige i mange innsjøer er i stedet en gradvis overgang fra et magasin med tilnærmet null vannhastighet til underkritisk normalstrømning i elveleiet. Det vil være underkritisk strømning i hele denne overgangen. Oppstuvning fra elva vil normalt ha en effekt opp til utløpet fra innsjøen.



Figur 1 Skjematisk oversikt over Gudbrandsdalslågen

Figure 1 Schematic presentation of the river Gudbrandsdalslågen

Tabell 1 Delfelter i simuleringen

Table 1 Drainage areas

REGINE nr	Sted	Høyde- differanse (moh)	Feltareal (km <sup>2</sup> )	Spes. avløp (l/s/km <sup>2</sup> )	Målestasjon for tilsigsdata
002.DC	Mjøsa	123-1060	3809.04	11.56	2.28
002.DD5A	Mesna	123-1089	251.27	19.62	2.205
002.DDA	Gausa	139-1517	944.70	14.75	2.28
002.DE	Fåberg	137-1080	65.92	13.10	2.28
002.DE3	Øyer	172	99.73	11.57	2.28
002.DE31	Hunderfossen	164-1071	93.38	16.64	2.28
002.DE3A	Moksa	192-1160	94.17	17.51	2.205
002.DE5	Losna	181-1400	953.32	14.79	2.28
002.DF3	Ringebu	188-1640	619.92	14.87	2.28
002.DF71	Harpefossen	210-1000	6.70	10.56	2.28
002.DF73	Utløp Vinstra kv	220-1400	56.58	13.81	2.28
002.DFA	Utløp Vinstra	240-1740	289.21	16.31	2.28
002.DFB5	Olstappen	662-1820	558.49	18.32	2.13
002.DFBE	Heimdalsvatn	1053-1843	129.93	27.42	2.13
002.DFCB	Øyangen	998-1550	44.07	20.86	2.13
002.DFE	Kaldfjorden	1019-1779	105.28	20.84	2.13
002.DFG	Vinsteren	1031-1760	159.69	26.07	2.13
002.DFJ	Bygdin	1058-2250	305.98	42.60	2.13
002.DG1	Utløp Vinstra	240-1640	232.07	16.07	2.28
002.DGA	Sjoa	280-2450	1529.61	25.32	2.614
002.DH	Utløp Sjoa	280-1366	56.61	13.88	2.28
002.DHA	Otta	300-1340	69.12	12.25	2.28
002.DHAA	Finna	362-1867	463.61	16.90	2,284
002.DHA32	Eidefossen	354-1600	115.99	11.59	2,284
002.DHB	Vågåmo	362-2040	392.74	12.97	2,284
002.DHB2A	Utløp Tesse	362-1370	47.77	13.98	2.415
002.DHB2C	Tessevatn	855-2060	85.12	16.46	2,291
002.DHB2D	Smådøla	856-2198	139.30	18.72	2,291
002.DHBA	Bøvra	363-2448	838.64	29.97	2.268
002.DHCA	Aura	380-1832	25.37	15.25	2,284
002.DHCC	Aursjøen	1098-1832	104.68	18.11	2,291
002.DHD	Storøya	380-2172	940.65	27.06	2.268
002.DHFB	Raudalsvatn	913-1949	146.74	46.91	2,291
002.DHG1	Pollfoss	580-1980	568.05	36.92	2,291
002.DHL	Breidalsvatn	898-1840	126.97	46.59	2,291
002.DJ1	Utløp Otta	294-2149	265.25	20.14	2.614
002.DJ3	Sel	300-2209	1831.03	18.60	2.614

Tabell 2 Målestasjoner for overføring av tilsigsdata

Table 2 Gaging stations

NVE stasjonsnummer	NVE stasjonsnavn	REGINE nr	Høyde- differanse (moh)	Feltareal (km <sup>2</sup> )	Spes. avløp (l/s/km <sup>2</sup> )
2.13	Sjodalsvatn	002.DGF3	940-2341	478.85	37.0
2.205	Mesna ndf	002.DD5B	520-1089	218.62	19.5
2.268	Akslen	002.DHBA1	480-2460	633.69	30.0
2.28	Aulestad	002.DDA	200-1517	872.4	16.1
2.284	Sælatunga	002.DHAA	440-1867	453.3	17.9
2.291	Tora	002.DHGA	700-1980	261.84	43.5
2.415	Espedalsvatn	002.DFB6C	720-1446	94.7	20.1
2.614	Rosten	002.DJ3	320-2209	1823.7	18.4

Tabell 3 Magasinstørrelse

Table 3 Reservoir data

Magasin	Reguleringsgrenser			Ledig kapasitet		Overflate
	HRV (moh)	LRV (moh)	Naturlig vannstand (moh)	Ved LRV (mill.m <sup>3</sup> )	Ved nat.vst. (mill.m <sup>3</sup> )	Ved nat.vst. (km <sup>2</sup> )
Aursjø	1,097.50	1,085.00	1,094.00	60.0	23.9	6.3
Breidalsvatn	908.00	895.00	905.50	70.0	15.5	5.7
Bygdin	1,057.40	1,048.25	1,056.50	336.0	35.0	38.5
Heimdalsv.	1,052.20	1,050.00	1,052.20	15.0	15.0	7.3
Kaldfjorden	1,019.00	1,013.10	1,013.50	76.0	73.2	7.0
Olstappen	668.00	655.00	655.00	31.0	31.0	1.5
Raudalsvatn	916.30	886.00	886.00	166.0	166.0	3.3
Tesse	853.90	841.50	853.10	130.0	9.1	11.4
Vinsteren	1,031.50	1,027.50	1,030.50	102.0	27.0	26.7
Øyangen	998.00	996.00	996.00	8.0	8.0	3.2



Tabell 4 Tilsig til magasinene

Table 4 Reservoir yield

Magasin	Nedbørfelt		Midlere årsavløp		Reguleringsprosent (%)
	Lokalt (km <sup>2</sup> )	Totalt (km <sup>2</sup> )	Lokalt (m <sup>3</sup> /s)	Totalt (m <sup>3</sup> /s)	
Aursjø		109		2.6	73.0
Breidalsvatn		137		5.7	39.1
Bygdin		308		12.5	85.1
Heimdalsvatn		128		3.2	14.7
Kaldfjorden	104	702	3.1	21.9	76.7
Olstappen	635	1380	1.8	34.2	54.9
Raudalsvatn		160		7.6	69.2
Tesse	225	380	4.1	7.3	56.5
Vinsteren	162	470	3.9	17.3	82.0
Øyangen	42	744	1.2	23.7	75.1

Tabell 5 Startverdier for simulering - uregulert tilstand

Table 5 Initial conditions - unregulated reservoirs

Magasin	Startvannstand (moh)		Ledig magasinivolum (mill.m <sup>3</sup> )		Initialvannføring (m <sup>3</sup> /s)	
	Ved naturlig vannstand	Nær LRV	Ved naturlig vannstand	Nær LRV	Ved naturlig vannstand	Nær LRV
Aursjø	1,094.00	1085.56	0.0	30.0	20	0
Breidalsvatn	905.50	895.00	0.0	42.0	34	0
Bygdin	1,056.50	1048.64	0.0	262.5	720	0
Heimdalsv.	1,052.20	1049.98	0.0	14.7	0	0
Kaldfjorden	1,013.50	1013.30	0.0	15.6	441	390
Olstappen	655.00	656.72	13.2	13.2	0	0
Raudalsvatn	886.00	886.00	0.0	6.7	18	18
Tesse	853.10	841.66	0.0	101.4	60	0
Vinsteren	1,030.50	1027.51	0.0	93.4	950	296
Øyangen	996.00	997.62	0.0	3.2	17	105

Tabell 6 Kraftverk

Table 6 Hydropower plants

Kraftverk	Fall (meter)	Installert effekt (MW)	Slukeevne (m <sup>3</sup> /s)	Midlere årsproduksjon (GWh)
Skjåk 1	684,8	33	6	105
Tesse	309,8	46	11	253
Eidefossen	16,0	33	6	75
Øvre Vinstra	329,8	140	49	522
Nedre Vinstra	446,0	310	84	1070
Harpefoss	34,5	90	320	433
Hunderfossen	46,7	112	320	595

Tabell 7 Tunneler

Table 7 Tunnels

Strekning	Type	Lengde (km)	Tverrsnittsareal (m <sup>2</sup> )
Heimdalsvatn-Kaldfjorden	Overføring	5,8	9 - 7
Kaldfjorden-Øyangen	Overføring	2,7	22
Øyangen-ØvreVinstra	Drift	7,5	32
Olstappen-NedreVinstra	Drift	24,0	to løp

Tabell 8 Tappeorganer fra magasinene

Table 8 Reservoir gates

Magasin	Tappeorganer
Aursjø	Flomluke, damkrone
Bygdin	Flomluker, tappeluke, overløp til kanalen, overløp via terrenget
Breidalsvatn	Overløp, damkrone
Heimdalsvatn	Egen utløpskurve (Tingvold 1998).
Kaldfjorden	Overløp, damkrone, segmentluker
Olstappen	Overløp, sektorluke, segmentluke, 2 damkroner
Raudalsvatn	2 overløp, damkrone
Tesse	2 nåleløp, flomluke, damkrone
Vinsteren	7 nåleløp, segmentluker
Øyangen	Overløp

Når metoden likevel tas i bruk i denne sammenheng, er det på grunn av manglende data til å foreta en mer nøyaktig analyse. Hensikten er dermed å etablere en utløpskurve som er representativ for det opprinnelige elveprofil. For enkelhets skyld antas det at tverrprofilen i utløpet har form som et trapes.

Formelen for et bredkantet overløp med et trapesformet profil er (Chow 1959):

$$Q = \sqrt{g} \frac{[(B + zy)y]^{\frac{3}{2}}}{(B + 2zy)^{\frac{1}{2}}}$$

der

Q = vannføring (m<sup>3</sup>/s)

g = tyngdens gravitasjon (9,81 m/s<sup>2</sup>)

B = bunnbredden av overløpsprofilen på tvers av strømningsretningen (m)

z = skråningsvinkelen av sidene til trapeset (m bredde/m stigning)

y = kritisk dybde på overløpet (m)

Denne formelen er basert på at det er kritisk strømming på overløpet. Den kritiske dybden (y) er generelt mindre enn nivåforskjellen mellom magasinet og toppen av overløpet (H-H<sub>0</sub>). Sammenhengen mellom disse to størrelsene er gitt av følgende uttrykk:

$$H - H_0 = y \frac{3B + 5zy}{2B + 4zy}$$

der

H = variabel vannstand i magasinet (moh)

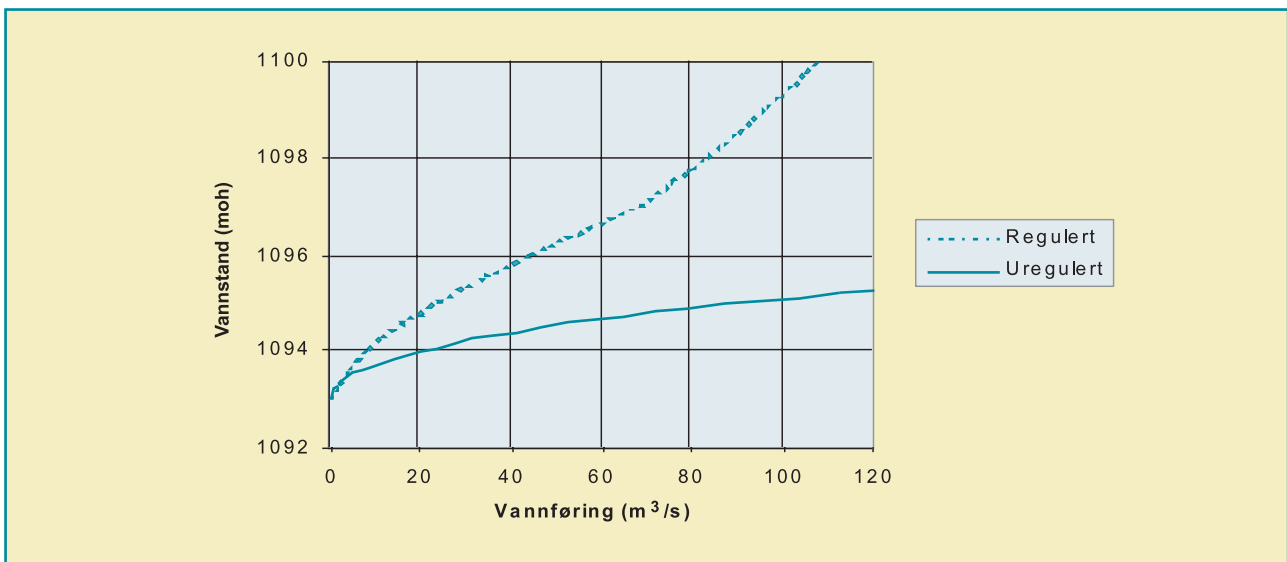
H<sub>0</sub> = terskelnivå, topp av overløpet (moh)

For de fleste magasinene er det her antatt at H<sub>0</sub> er det laveste nivået som det er rensket ned til før dam og tappeorganer er blitt konstruert. Dette nivået er vist på tilgjengelige tegninger og kart. Det samme gjelder bredden B. Skråningsvinkelen, z, angir formen på utløpets tverrprofil og bestemmes skjønsmessig fra kart eller tegninger.

De enkelte magasin er vurdert som følger:

### Aursjøen

Den opprinnelige terskelen antas å ha vært ved 1093 moh. Bunnbredden er anslått til 5 m. Trapeset i utløpet antas å være 45 m bredt ved kote 1095 moh.

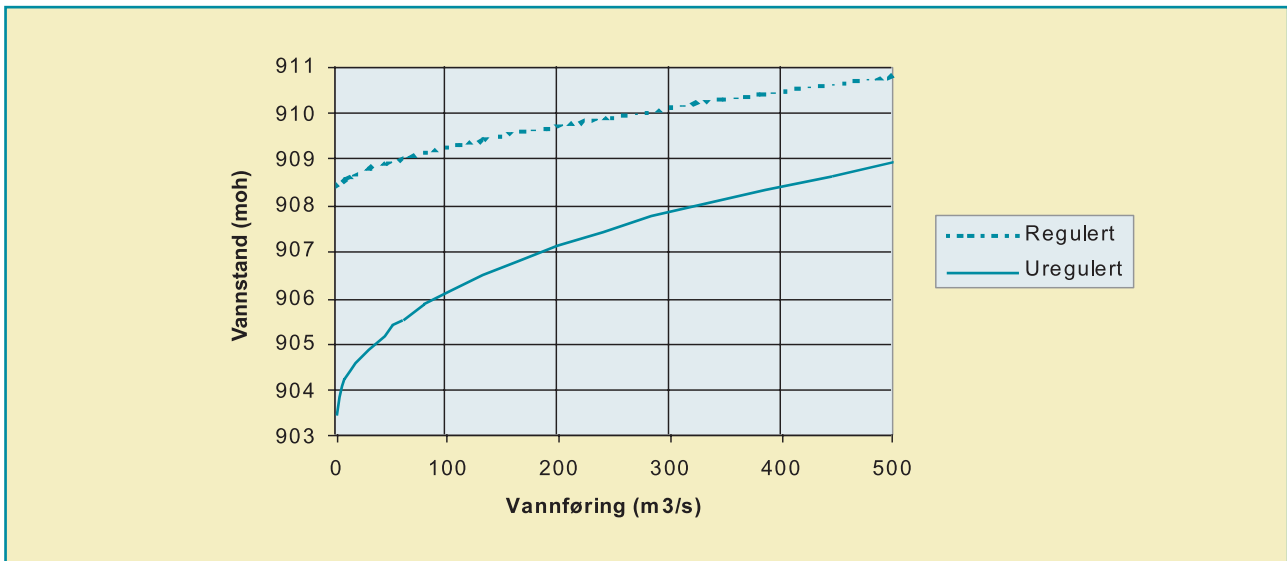


Figur 2 Utløpskarakteristikk Aursjøen

Figure 2 Discharge curve for Aursjøen

### Breidalsvatn

Fra tegninger antas det at terskelen under overløp og bro tilsvarer den opprinnelige terskel i utløpet. Den ligger på 903,41 moh. Det er ikke funnet holdepunkter for en nærmere angivelse av geometrien til utløpsprofilen bortsett fra at det synes å være smalere enn bro lengden. Ved høyere vannstander er bredden derimot stor. En terskelbredde på 5 m og en bredde på 45 m ved dagens LRV er valgt.

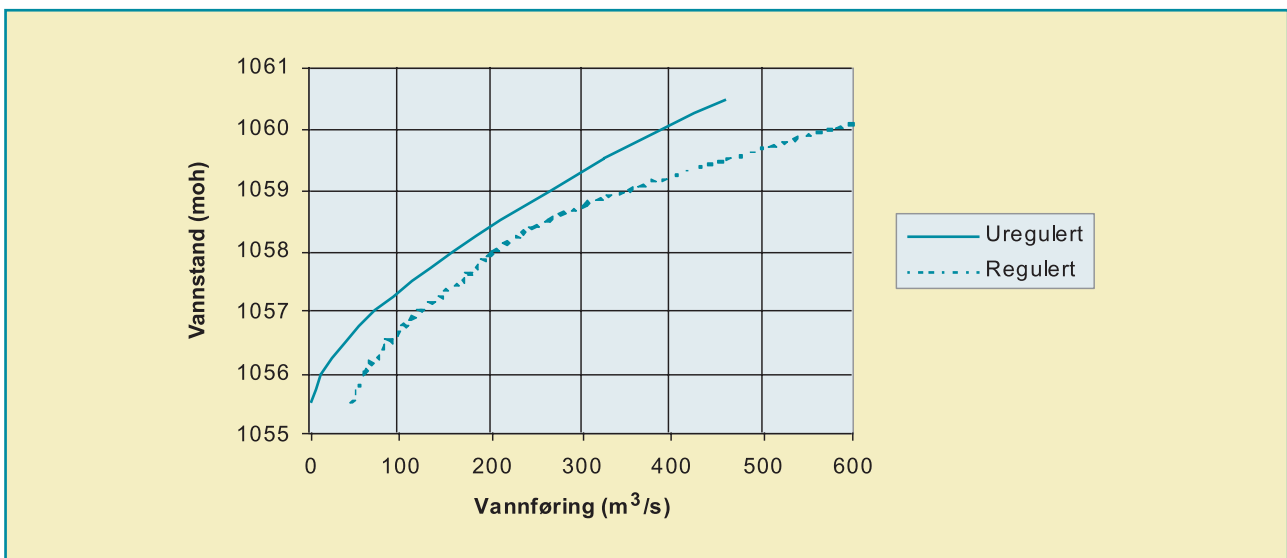


Figur 3 Utløpskarakteristikk Breidalsvatn

Figure 3 Discharge curve for Breidalsvatn

### Bygdin

Ved ombygging av dammen i 1982 ble lukeløpene dimensjonert slik at flom-avløpet skulle være tilnærmet lik naturlige forhold (Rognlien 1995). Det er godtgjort av GLB at tapping uten regulering i Bygdin er tilnærmet lik tapping fra flomluker (Tingvold 1998). Naturkurven er supplert fra GLB.

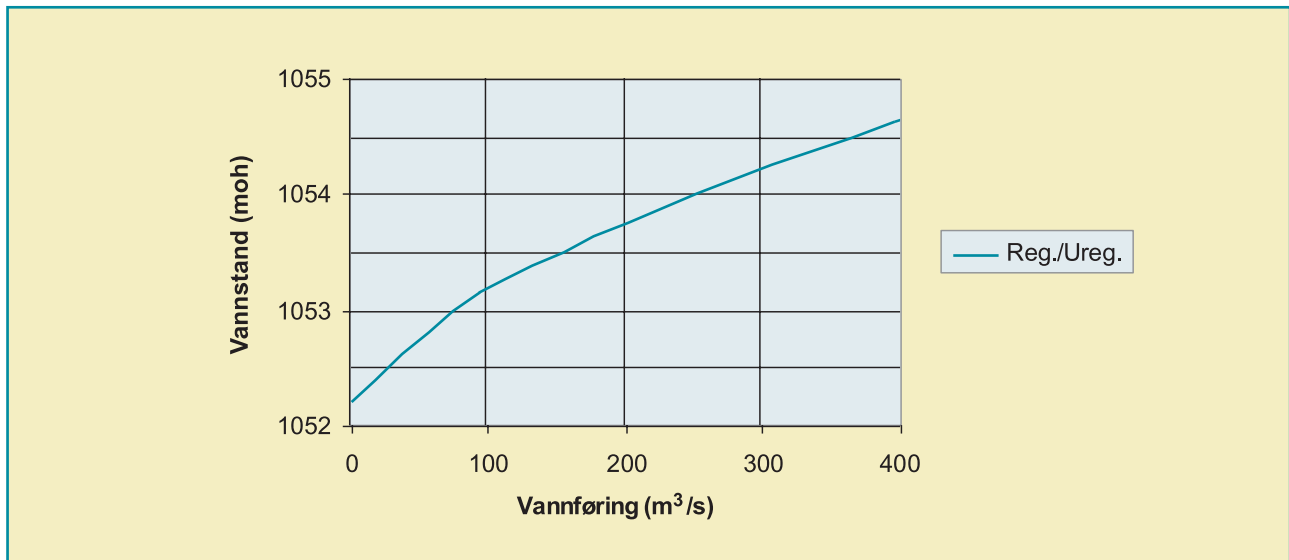


Figur 4 Utløpskarakteristikk Bygdin

Figure 4 Discharge curve for Bygdin

### Heimdalsvatn

Samme utløpskurve er brukt for uregulert som for regulert magasin etter forslag fra GLB (Tingvold 1998).



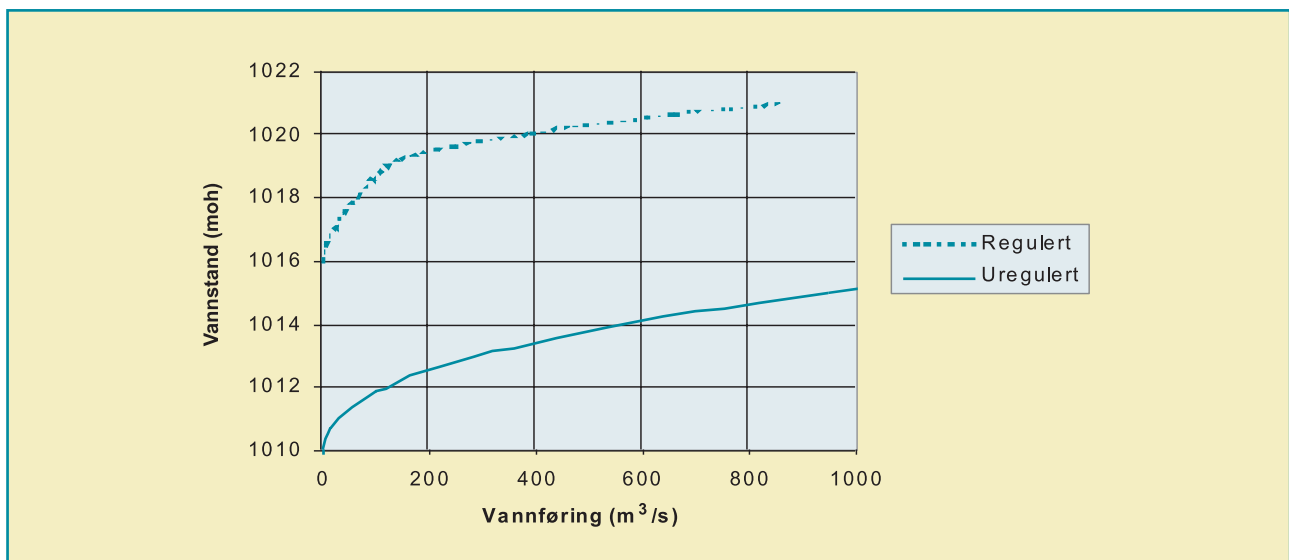
Figur 5 Utløpskarakteristikk Heimdalsvatn

Figure 5 Discharge curve for Heimdalsvatn

### Kaldfjorden

Tegningene viser fjell på 1010 moh på bunnen av dypløp. Ved kote 1014 moh har utløpet en bredde på 100 m.

Magasinkurven er ekstrapolert ned til 1010 moh fra 1013 moh i forhold til de tilsendte data der nullpunktet lå på 1013 moh.



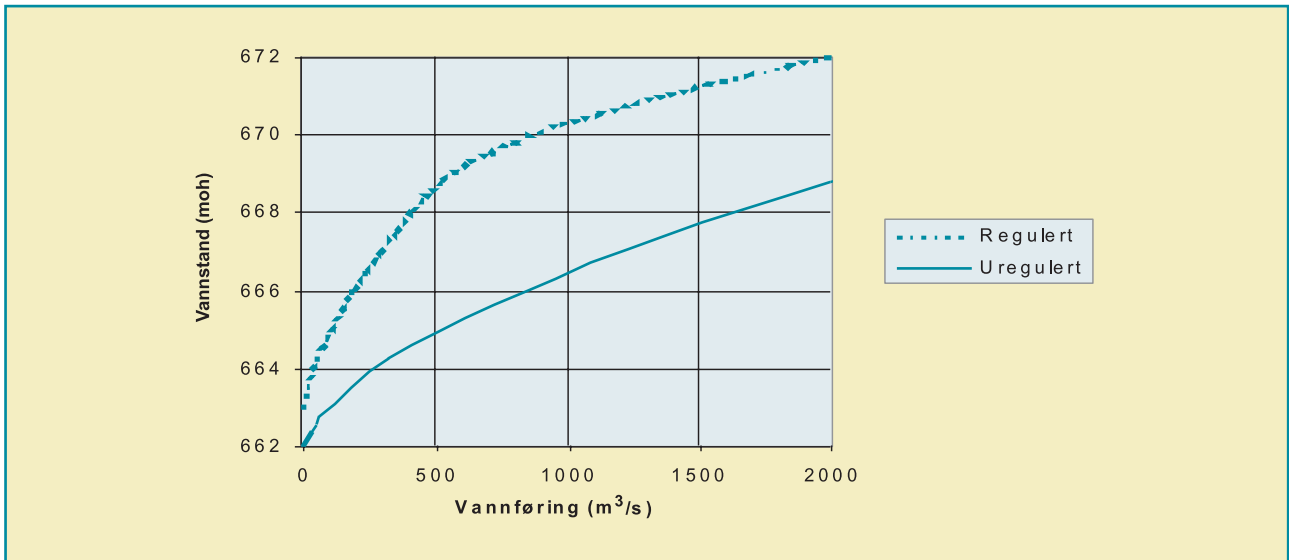
Figur 6 Utløpskarakteristikk Kaldfjorden

Figure 6 Discharge curve for Kaldfjorden

### Olstappen

Bestemmende snitt er sannsynligvis lenger oppstrøms enn dagens dam, i følge damvokteren. Ved en gammel fløtningsdam er det påvist en terskel ved 662 moh som er antatt å ha bestemt utløpet. Ved HRV er bredden 85 m i henhold til oppmåling. Kantene er steile, henimot rasvinkel, med en antatt stigning på 1:2,5.

En naturlig vannstand ved 655 moh er ikke konsistent med en terskel ved 662 moh, med mindre den naturlige vannstand er relatert til et punkt lenger nedstrøms, så som ved dagens dam.



Figur 7 Utløpskarakteristikk Olstappen

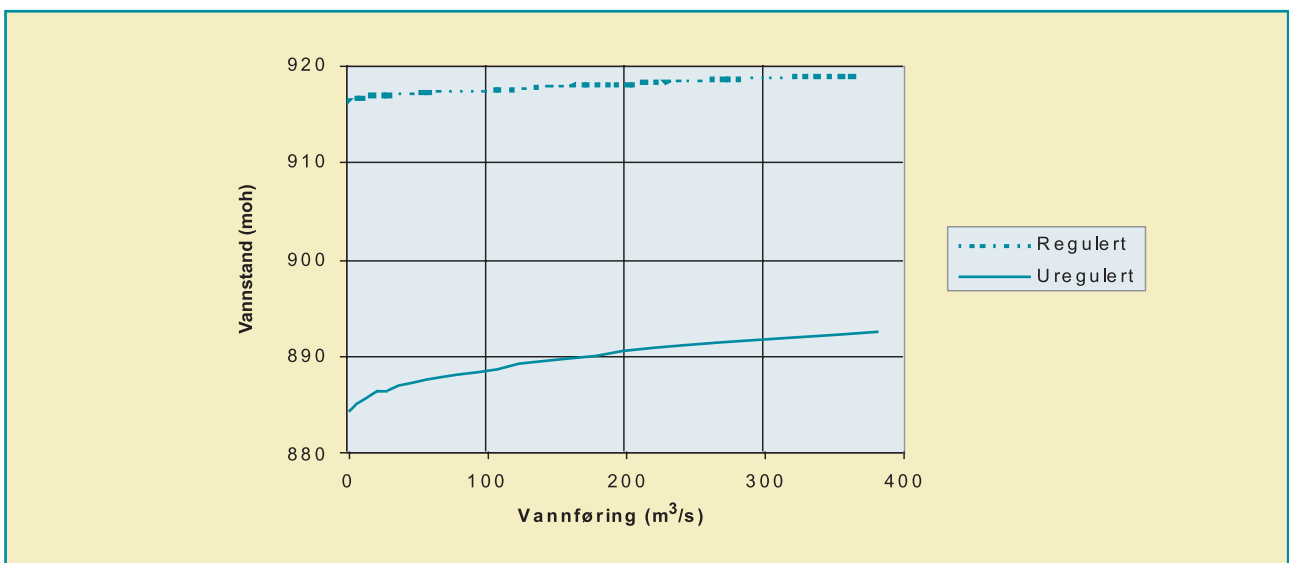
Figure 7 Discharge curve for Olstappen

### Raudalsvatn

Opprisset av dammen viser at det er rensket ned til 877 moh. Kanalbredde er 90 m ved kote 920 moh.

Magasinkurven er ekstrapolert ned til 884 moh fra 886 moh som er nullpunkt i de tilsendte data.

Et alternativ ville være å betrakte det uregulerte Raudalsvatn som en elvestrekning slik det kan ha fortonet seg.

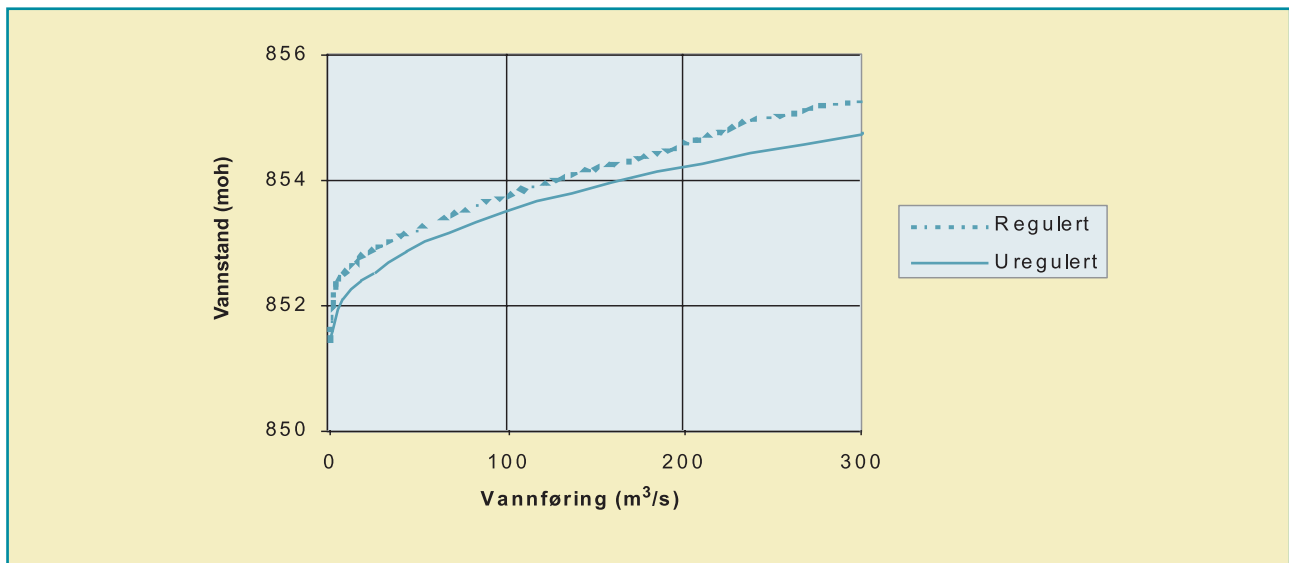


Figur 8 Utløpskarakteristikk Raudalsvatn

Figure 8 Discharge curve for Raudalsvatn

### Tessevatn

Det er antatt et opprinnelig utløp tilnærmet lik en trapesformet kanal som har en 4 m bred terskel ved 851,4 moh og 470 m bredde ved kote 853.5 moh.



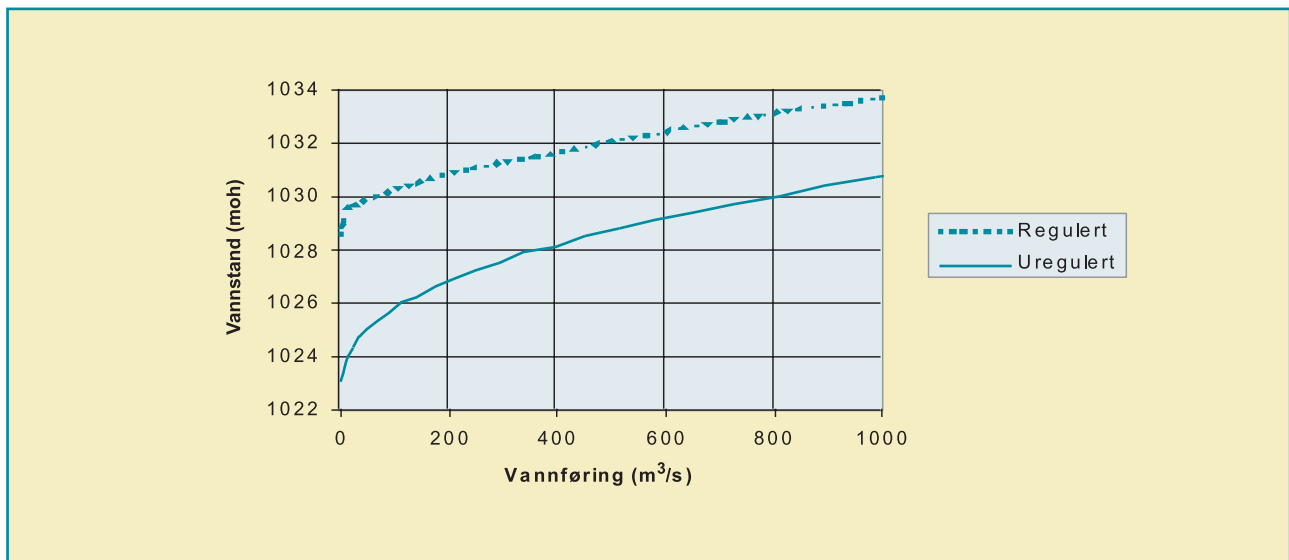
Figur 9 Utløpskarakteristikk Tesse

Figure 9 Discharge curve for Tesse

### Vinsteren

Fra tegningen er det uregulerte utløpet antatt å være gitt av terskelen i dagens dypløp (1023 moh, bredde 5m) og en bredde på 45 m ved kote 1028 moh.

Den tilsendte magasinkurven er ekstrapolert ned til 1023 moh fra 1027,50 moh.



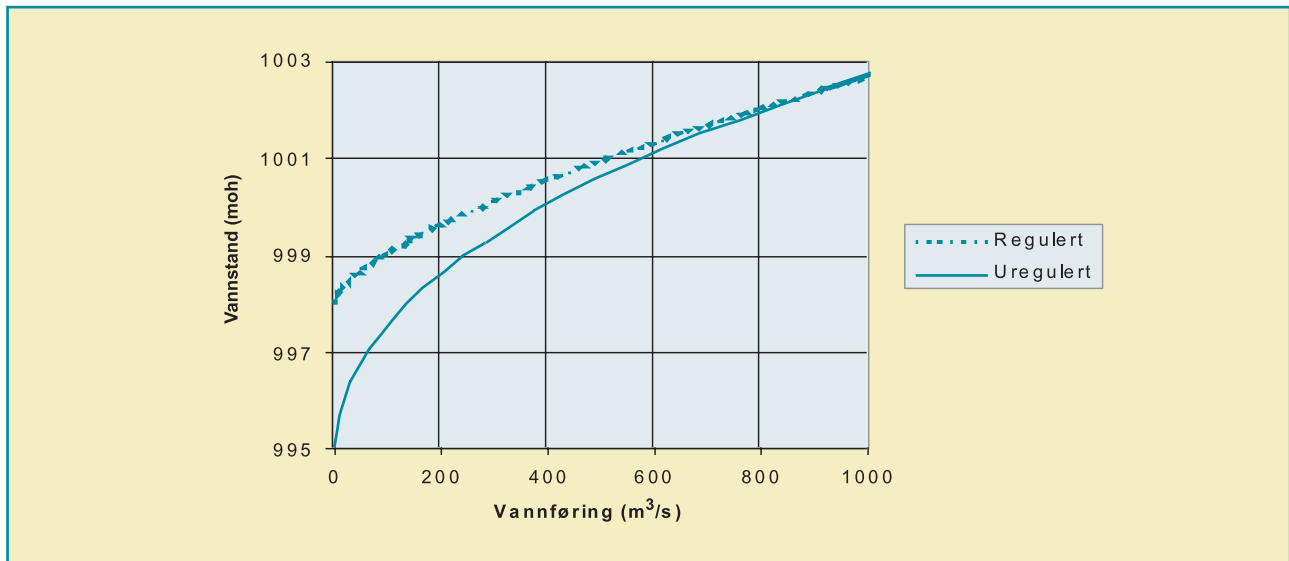
Figur 10 Utløpskarakteristikk Vinsteren

Figure 10 Discharge curve for Vinsteren

## Øyangen

Et bredkantet overløp er antatt å ha hatt et tverrprofil med en 9 m bredde ved terskelen på 995 moh og en 15 m bredde ved kote 996 moh. Ved høye vannføringer blir utløpskurven tilnærmet lik den regulerte tappekurven.

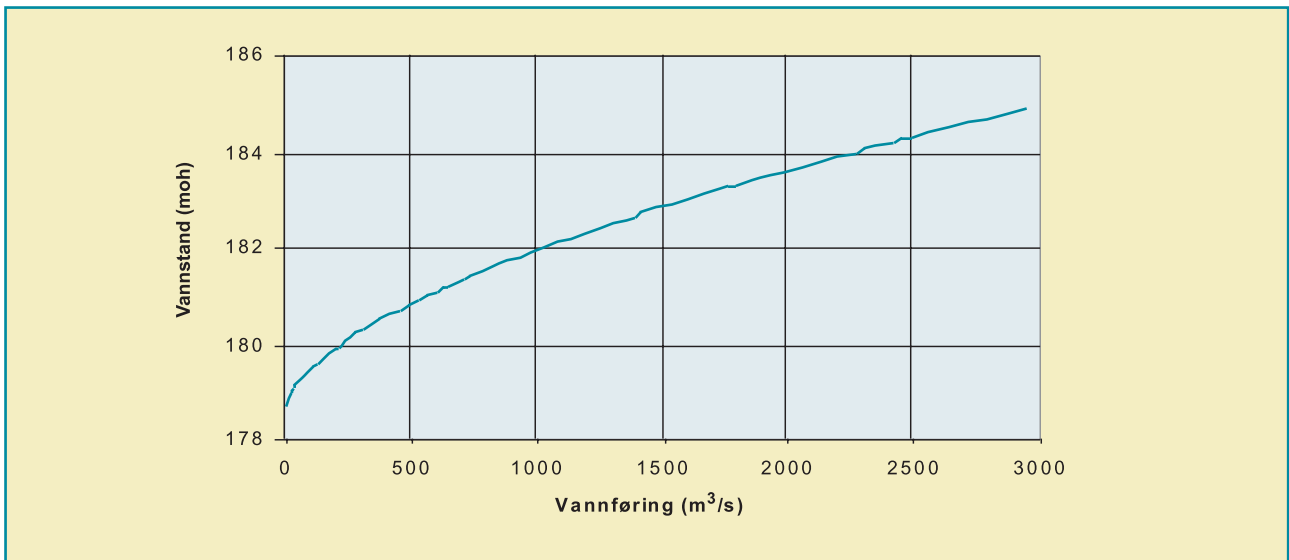
Magasinkurven er ekstrapolert ned til 995 moh fra 996 moh i de tilsendte data.



Figur 11 Utløpskarakteristikk Øyangen

Figure 11 Discharge curve for Øyangen





Figur 12 Utløpskarakteristikk Losna

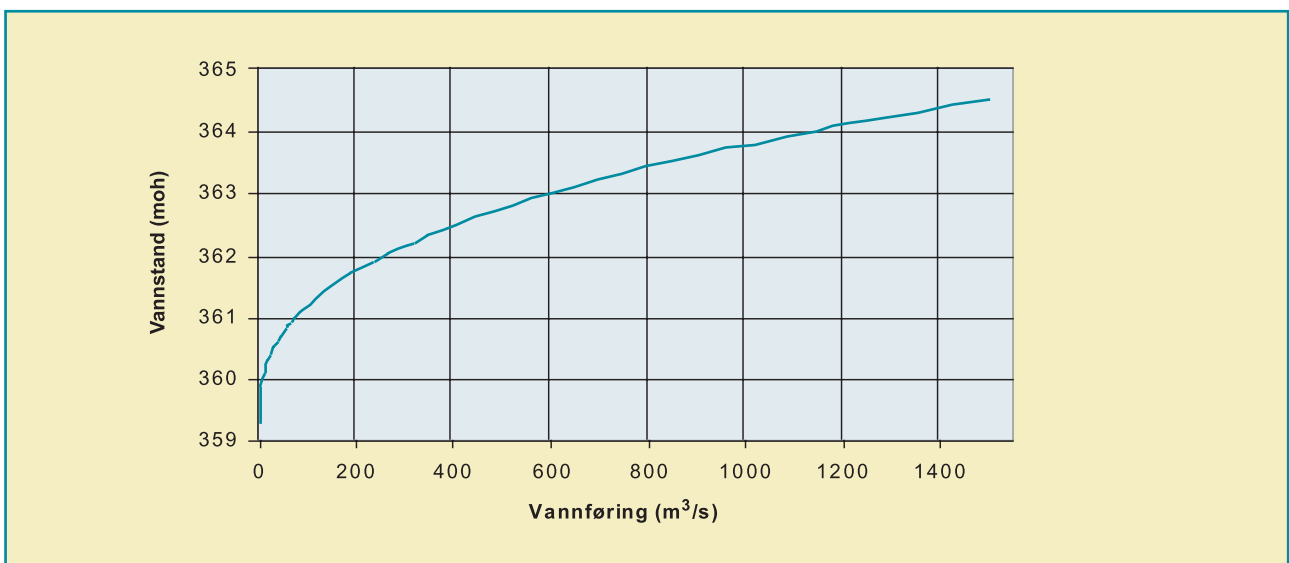
Figure 12 Discharge curve for Losna

### Losna, Vågåvatn

GLB har foreslått en enkel overslagsmetode i stedet for magasinkurver for de to uregulerte innsjøene i Lågen. For å beregne volumendringer i de to innsjøene kan det antas at overflatearealet er henimot konstant og lik den som finnes ved normal vannstand. Feilen som begås ved denne forenklingen er antakelig kommensurabel med andre feilkilder i simuleringen. Som uregulerte innsjøer er utløpskurvene fra Losna og Vågåvatn de samme enten det simuleres med eller uten regulering i resten av vassdraget.

Ved normal vannstand i Losna vil overflaten være på 12,2 km². Under flomforhold vil dette være noe større slik at det i simuleringen kan antas et areal på 13 km².

Overflaten i Vågåvatn er omtrent 17 km². Det kommuniserer med Ottavatn. Disse to kan av praktiske hensyn slås sammen spesielt under flomforhold med et totalt areal på 25 km².



Figur 13 Utløpskarakteristikk Vågåvatn

Figure 13 Discharge curve for Vågåvatn

Som en kontroll av de hydraulisk baserte utløpskurvene er det forsøkt å bestemme hvordan de uregulerte utløp ville være ut fra mer hydrologiske betraktninger. Denne alternative metoden forutsetter at utløpskarakteristikken fra alle uregulerte innsjøer innen et område har samme generelle form. For Lågens vedkommende er utløpsfunksjonen fra Vågåvatn kjent og derfor lagt til grunn som en mal.

Utløpskurven har følgende generelle formel:

$$Q = C (H - H_0)^n$$

der

C = koeffisient

n = eksponent

Formen er gitt av eksponenten n som for Vågåvatn har verdien 2,7. Dette antas å gjelde for andre uregulerte innsjøer i Lågen-vassdraget. Terskelverdien,  $H_0$ , er den samme som for et bredkantet overløp. Dessuten må det foreligge ett punkt på kurven, dvs en vannføring Q og den tilhørende vannstand H. Ett slikt datapar vil være tilstrekkelig til å bestemme koeffisienten C som er spesifikk for hvert enkelt magasin.

De eneste tilgjengelige data for å bestemme en standardkurve har vært den naturlige vannstand og den midlere vannføring. Den naturlige vannstand foreligger for hvert reguleringsmagasin, se Tabell 3. Den regulerte heving og senking av et magasin er differansen mellom den naturlige vannstand og reguleringsgrensene HRV og LRV henholdsvis. Midlere vannføring er likedan kjent for lokalfeltet, enten direkte fra målinger eller som spesifikk avrenning, se Tabell 4. Hvis naturlig vannstand i magasinet og midlere vannføring opptrer med samme sannsynlighet eller gjentakintervall, tilsvarer det at de danner et punkt på den uregulerte utløpskurven.

Metoden er svært følsom for differansen mellom antatt terskelnivå og naturlig vannstand, dvs den eneste antatt kjente dybden på vannføringskurven. Denne dybden er for de fleste magasinene i Lågen for stor til å være realistisk ved en midlere vannføring. Dette medfører at den framkomne standardkurven vil underestimere vannføringen ved en vilkårlig vannstand. Denne hydrologiske metoden har ikke for noe magasin gitt en uregulert utløpskurve som er mer plausibel enn den hydrauliske metoden som er nevnt ovenfor og som har vært benyttet i simuleringen.

### 3.3 Andre forutsetninger

#### 3.3.1 Med regulering

Simuleringsperioden er fra 1 mai til 30 juni 1995. Denne to-måneders perioden er lang nok til å inkludere flombølgen fra en tilnærmet konstant vannføring før flommen og til flomtoppen har forflyttet seg ut av Gudbrandsdalen.

Startverdiene for magasinene er slik som angitt av GLB. Nivåene er tilnærmet lik LRV, bortsett fra Øyangen der startverdien er 1,62 m over LRV.

Modellen har en egen algoritme til å beregne tapping og overføring til kraftverk basert på vannstanden i magasinene. I løpet av hele perioden før, under og etter flommen i 1995 er overføringene registrert. Disse tilgjengelige måledataene er benyttet i simuleringen i stedet for algoritmen.

#### 3.3.2 Uten regulering

Simuleringsperioden er den samme som for situasjonen med regulering, dvs tilsvarende flommen i 1995.

Det foretas ingen tappinger fra magasinene annet enn de naturlige utløp. Det er heller ingen overføringer ut av feltet.

To forskjellige startverdier for magasinene er vurdert:

1. Startverdi lik naturlig vannstand.

Naturlig vannstand er normalt høyere enn LRV, spesielt for senkningsmagasiner. For Olstappen, Raudalsvatn, Øyangen er de to nivåene de samme.

Denne initialbetingelsen er konsistent mellom magasinene forutsatt at den naturlige vannstand er bestemt for alle innsjøene på en enhetlig måte. Naturlig vannstand er et rimelig anslag for det nivået som magasinene ville ha hatt i begynnelsen av mai. Det er en ugunstig antakelse med hensyn på flomdempning siden de fleste innsjøene vil ha et høyt magasininnhold når flommen inntre. (Unntakene er Heimdalsvatn der naturlig vannstand er lik utløpsterskelen, og Olstappen der naturlig vannstand er 7 m lavere enn terskelnivået.) Denne startverdien representerer dermed det scenario som har størst kontrast med flommen i 1995.

2. Startverdi tilnærmet lik LRV.

Dette er den samme startbetingelsen som er benyttet for simuleringen av regulert vassdrag, dvs tilsvarende situasjonen før flommen i 1995.

Denne forutsetningen er urealistisk for noen av magasinene der LRV er betydelig lavere enn den antatte terskel som styrer utløpet ved de naturlige uregulerte innsjøene. Dette gjelder Aursjø, Breidalsvatn, Bygdin, Heimdalsvatn, Olstappen, Tesse. Et slikt lavt start-nivå betinger at disse uregulerte innsjøene måtte være kunstig nedtappet på forhånd, i beste fall en uvanlig praksis og i realiteten vanskelig å gjennomføre.

Sammenligningen med regulerte forhold i neste kapittel er derfor basert på at de uregulerte innsjøene i vassdraget har et startnivå lik den naturlige vannstand idet flommen inntreffer. Dette er den mest konservative antagelsen i den forstand at forskjellen mellom regulert og uregulert flomforløp er størst.

# 4. Resultater

## 4.1 Flommen i 1995

Figur 14 viser vannstanden ved NVEs målestasjon ved Losna i Gudbrandsdalen i løpet av flommen i 1995. De simulerte og de observerte verdiene samsvarer meget godt med hverandre. Den observerte flomtoppen ved Losna nådde 185,05 moh den 3 juni. Resultatet fra modellen gir en flomtopp på 184,96 moh, et avvik på 9 cm.

Figur 15 viser vannføringen ved Losna i Gudbrandsdalen i den samme perioden i 1995. Flomtoppen ved Losna den 3 juni var 2497 m<sup>3</sup>/s. Denne tidsserien er ikke observert direkte men er framkommet fra vannstands-vannførings-kurven som NVE har framstilt for målestasjonen. Målte vannstander er omgjort til vannføring. Til sammenligning gir simuleringen en flomtopp på 2415 m<sup>3</sup>/s, bare 82 m<sup>3</sup>/s mindre enn observert.

Resultatene i Figur 14 og 15 viser at simuleringsmodellen har gjenkapt flomforløpet fra 1995 på en meget akseptabel måte. Forskjellene mellom observerte og simulerte verdier, særlig for flomtoppen, er innenfor den feilmargen som må aksepteres både ved feltmåling og ved estimat basert på bruk av programvare.

## 4.2 Effekt av regulering

Den troverdige gjengivelse av flommen i 1995 som vist i Figur 14 og 15 er en vesentlig forutsetning for å kunne bruke modellen til å produsere den tenkte situasjon med den samme flommen men uten regulering av magasinene.

Også for det uregulerte flomforløpet er det hydrogrammet ved Losna som benyttes til vurderingsgrunnlag. Data fra andre punkter i vassdraget er tilgjengelige i beregningsresultatene, og kan brukes til en nærmere analyse av hvordan de enkelte magasin og tappeorgan fungerer.

Forskjellen mellom flommen i Gudbrandsdalslågen med og uten regulering er illustrert i de to neste figurene. Kurvene merket "Regulert" er de samme som er gjengitt i Figur 14 og 15 merket "Simulert". Vurderingen av reguleringseffekten er med andre ord basert på simuleringer heller enn på observerte data. Eventuelle systematiske feil i modellen vil dermed være de samme for regulert som for uregulert tilstand.

Den faktiske flomtoppen den 3 juni var på 184,96 moh og 2415 m<sup>3</sup>/s i henhold til simuleringsmodellen. Den tilsvarende flomtoppen uten regulering ville ved Losna ha

vært 185,38 moh og 2707 m<sup>3</sup>/s i følge modellberegningen. Nivåforskjellen på de to situasjonene er dermed 0,42 m, og dette svarer til en forskjell i vannføring på 292 m<sup>3</sup>/s.

De to kurvene for uregulert vassdrag i Figur 16 og 17 viser begge en topp umiddelbart etter at simuleringen er begynt. Dette er et numerisk problem som skyldes en feil i inngangsdata, enten terskelnivåene eller de antatte startverdiene i magasinene, den såkalte naturlige vannstand. Høy vannstand sammenlignet med terskelnivået innebærer at utløpet til å begynne med vil være relativt høyt. Dette gjelder spesielt for Bygdin og Vinsteren med henholdsvis 720 m<sup>3</sup>/s og 950 m<sup>3</sup>/s, se Tabell 5. Med overflateareal på henholdsvis 38,5 km<sup>2</sup> og 26,7 km<sup>2</sup> for de to magasinene er det store volumer som rent numerisk skal "tømmes" fra magasinene.

Flomvannføringen begynner ved Losna omtrent 26 mai, etter en simuleringsperiode på vel tre uker. Innen denne datoen har uregulert vannstand og vannføring ved Losna konverget til omtrent de samme verdier som flommen i 1995. Eventuelle feil i initialtilstanden vil dermed ikke ha noen effekt i den videre simulering av selve flombølgen.

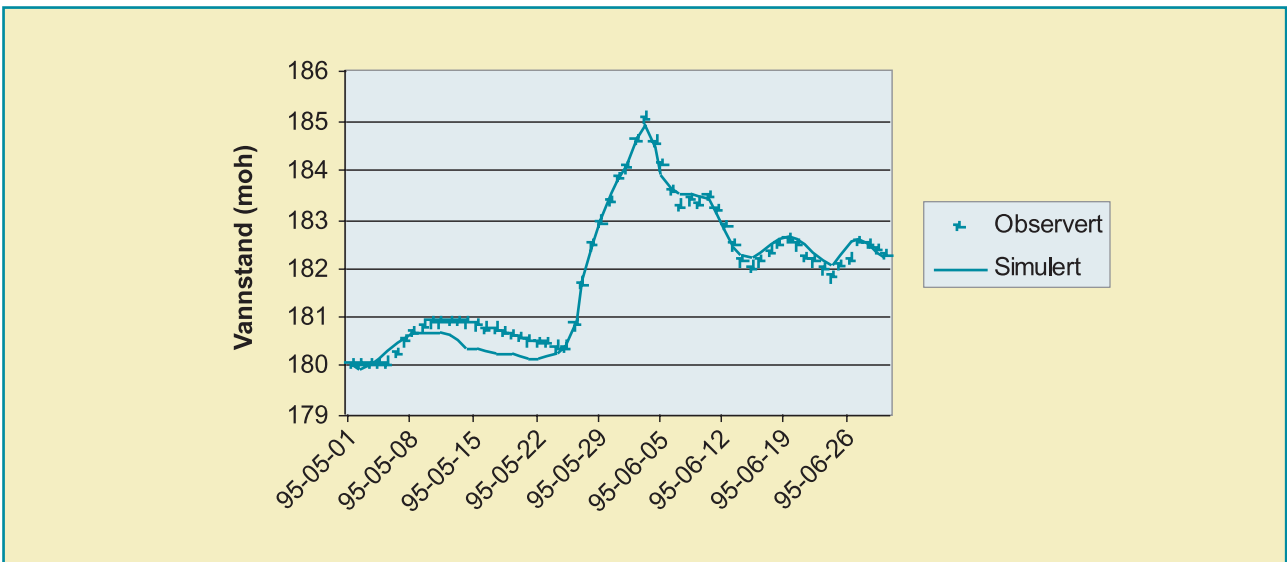
## 4.3 Konklusjoner

I grove trekk er flommen og dermed flomdempningen avhengig av følgende forhold:

- Størrelsen av magasinene og tappeorganene
- Tilsiget til magasinene
- Manøvreringen av magasinene, tappeorganer og overføringer
- Ruting av flomtopper gjennom elvestrekninger

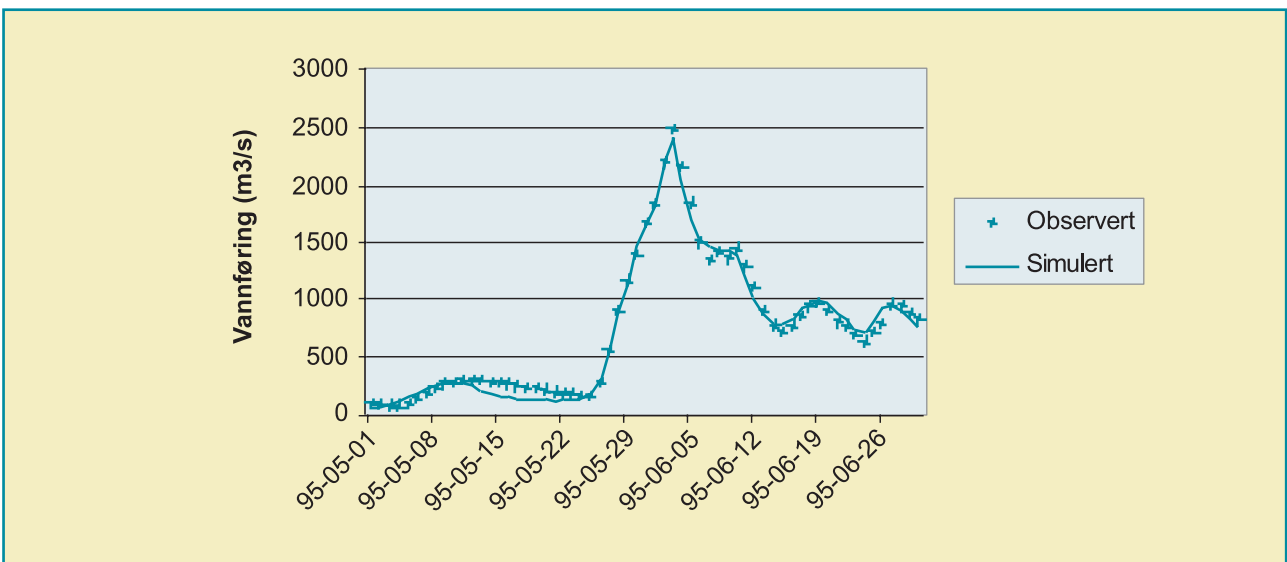
*Modellen som er utviklet, er et velegnet verktøy til å simulere en flomepisode i et vassdrag. Flommen i Gudbrandsdalslågen i 1995 er svært godt gjengitt, spesielt med hensyn på flomtoppen. Både vannstand/vannføring og ankomsttid stemmer bra med observasjoner fra 1995. Modellen er tilstrekkelig detaljert og nøyaktig til å vise effekten av tiltak så som regulering.*

*Reguleringen i Gudbrandsdalslågen har hatt en effekt på dempningen av flommen i 1995. Startnivået i magasinene er ikke alene tilstrekkelig til å oppnå flomdempning. Størst effekt vil det ha om en lav vannstand i magasinene er tilgjengelig idet flommen tar til, noe som er avhengig av gode prognoser.*



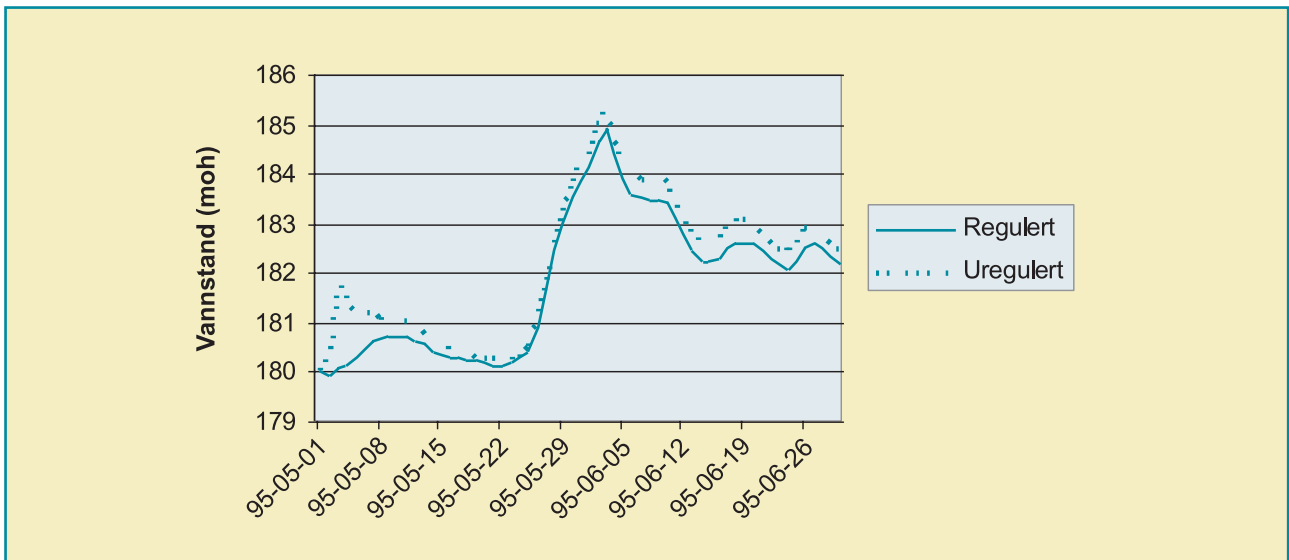
Figur 14 Flommen i 1995 - vannstand ved Losna

Figure 14 The 1995 flood: stage time series at Losna



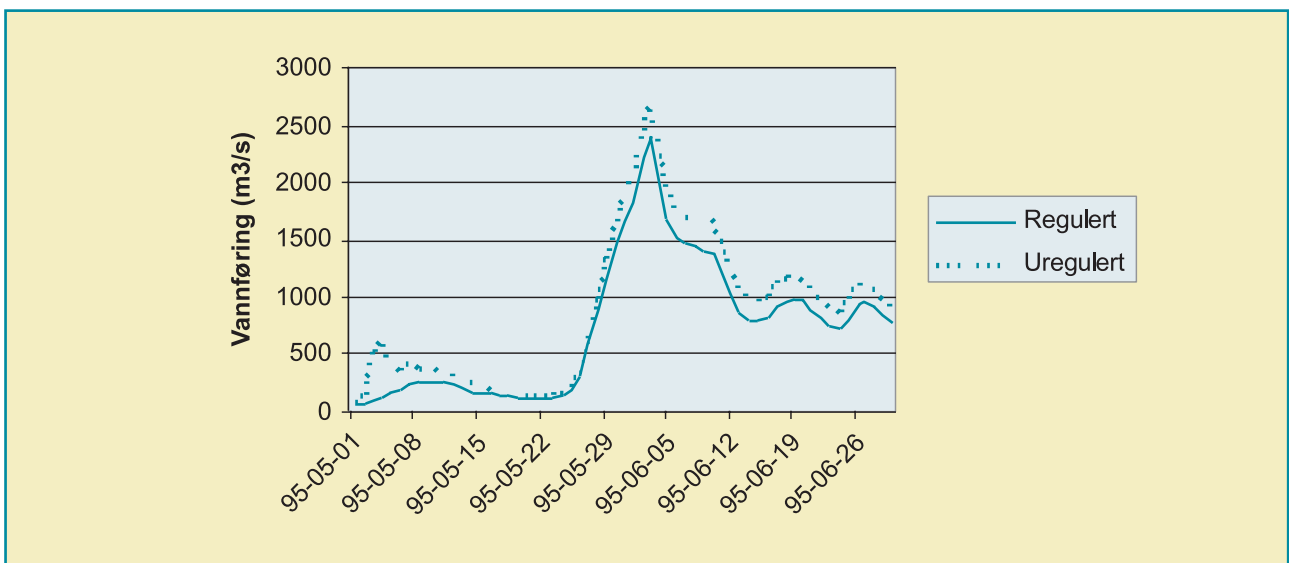
Figur 15 Flommen i 1995 - vannføring ved Losna

Figure 15 The 1995 flood: discharge time series at Losna



Figur 16 Effekt av regulering – vannstand ved Losna

Figure 16 The effect of regulation: stage time series at Losna



Figur 17 Effekt av regulering – vannføring ved Losna

Figure 17 The effect of regulation: discharge time series at Losna

*Med de magasin og tappeorgan som finnes i Lågen er det lite rom for å forsinke flommen utover det som ble gjort i 1995. Magasinene var forut for flommen i 1995 relativt sterkt nedtappet, de fleste ned til LRV. Ekstraordinær tapping under LRV er en mulighet, men i så fall må konsesjonsbetingelsene endres.*

*Beregninger av flomforhold bør knyttes sammen med vurderinger av manøvreringsreglement for magasiner. Foruten en gjennomregning basert på dagens normale manøvrering innenfor eksisterende reglement, må det lages forslag til endringer i magasinmanøvreringen for å forbedre flomdempningen i vassdraget. I Lågen var tappingen maksimal i løpet av flommen. Effekten av redusert tapping under magasinifyllingen bør vurderes.*

*Måleserier av tilsig til delfeltene bør benyttes hvis de er tilgjengelige ved simulering av faktiske hendelser. Et alternativ er å finne tilsiget til delfeltene ved hjelp av HBV-modellen. i første omgang. Dette kan bli aktuelt hvis modellen skal kjøres for hypotetiske og idealiserte flommer.*

*Simulering av uregulerte forhold avhenger av å ha utløpsfunksjoner for innsjøene slik de vil ha fungert uten kunstige dammer og tappeorganer. På dette punkt vil det sannsynligvis være mangel på data. Det er foreslått to metoder for å framskaffe slike funksjoner. Den ene er en hydrologisk metode basert på overføring av utløpskarakteristikk fra en nærliggende innsjø. Den andre metoden er hydraulisk ut fra en antakelse at utløpet kan beregnes som et såkalt bredkantet overløp der det forekommer kritisk strømning. For magasinene i Gudbrandsdalslågen er den hydrauliske metoden funnet å gi de mest plausible utløpsdataene.*

*Muskingum-metoden har vært akseptabel til å beregne rutingen av flomtoppen nedover Gudbrandsdalslågen. Den overordnede modellen er objektorientert slik at Muskingum-metoden kan erstattes av andre ruting-metoder, f.eks. hydraulisk ruting som kan være aktuell for en nøyaktig analyse av flate strekninger helt nederst i et vassdrag.*

*Det vil være naturlig med en oppfølging av prosjektet. Dette arbeidet bør blant annet omfatte en vurdering av alternative forslag til driftsrutiner med sikte på flomdempning. Det bør undersøkes hvordan flomdempningen er ved forskjellige flommer fra de ordinære til de ekstreme, med 10 års gjentaksinterval og oppover. Dessuten bør det gjennomføres en følsomhetsanalyse av utløpsfunksjonene for de uregulerte innsjøene, for Lågens tilfelle de som er generert ved den hydrauliske metode.*

## Referanser

Alfredsen, K.: "An object-oriented framework for application development and integration in hydroinformatics". Dr.ing.-avhandling, Institutt for vassbygging, NTNU. 1999.

Chow, V.T.: "Open Channel Hydraulics", McGraw Hill Book Company, New York, 1959.

NOU 1996: 16: "Tiltak mot flom". Norges offentlige utredninger. Statens forvaltningstjeneste. 1996.

Oppland fylkeskommune, Plan- og utbyggingsetaten: "Vannkraft og vassdrag". Flerbruksplan for vassdrag i Gudbrandsdalen, Del 1. 1987.

Perry, C.A.: "Effects of reservoirs on flood discharges in the Kansas and the Missouri river basins, 1993". Circular 1120-E. U.S. Geological Survey. 1994.

Rognlien, S. m.fl.: "Glommens og Laagens Brukseierforening. Bind III. 1968-93". GLB. 1995.

Sand, K., Å. Killingtveit og O. Guttormsen: "Flomdempning i regulerte vassdrag. Forprosjekt". Rapport nr. STF60 A87089. SINTEF NHL. 1987.

Sæther, B.: "Oppdatering av ENMAG for Lågen". Rapport nr. STF60 A85138. SINTEF NHL. 1985.

Tingvold, J.K.: "Effekt av vassdragsreguleringene i Glomma og Lågen på flommen i 1995 (1996)". HYDRA-rapport 1998, under trykking.

Tingvold, J.K.: "Effekt av ytterligere vassdragsregulering i Glomma og Lågen på stor flom". HYDRA-rapport 1998, under trykking.

US Army Corps of Engineers: "The Great Flood of 1993 Post-flood Report". 1994.

Wathne, M. og K. Alfredsen: "Flomdempning i Gudbrandsdalslågen. Programstruktur og systembeskrivelse". Rapport nr. STF22 A97410. SINTEF. 1997. (HYDRA-notat 7/97.)

Wathne, M.: "Effekter av flomsikringstiltak. En gjennomgang av litteraturen". Rapport nr. STF22 A97400. SINTEF. 1997. (HYDRA-notat 2/97.)



## Tidligere utgitt i HYDRA-serien

### Flomdemping, flomvern og flomhandtering (F)

- F02 Estimating the mean areal snow water equivalent from satellite images and snow pillows.  
Thomas Skaugen, NVE.

### Miljøvirkninger av flom og flomforebyggende tiltak (Mi)

- Mi01 Miljøkonsekvenser av flom - flom og vannkvalitet  
Bjørn Faafeng, Espen Lydersen, Gøsta Kjellberg, Vilhelm Bjerknes, NIVA
- Mi02 Virkning av flom på vannlevende organismer.  
Åge Brabrand, John E. Brittain, Ketil Sand, Per Aass, UiO  
Gunnar Halvorsen, Kjetil Hindar, Arne Jensen, Bjørn Ove Johnsen, NINA  
Jo Vegar Arnekleiv, Dag Dolmen, NTNU  
Bjørn Rørslett, NIVA  
Jan Henning L'Abée-Lund, NVE
- Mi03 Miljøeffekter av flomforebyggende tiltak - en litteraturstudie.  
Torbjørn Østdahl, Trond Taugbøl og Børre Dervo, Østlandsforskning.
- Mi04 Miljøtilpasninger ved eksisterende og nye flomsikringstiltak - en litteraturstudie.  
Torbjørn Østdahl og Trond Taugbøl, Østlandsforskning.

### Naturgrunnlag og arealbruk (N)

- N01 Naturlige magasineringsområder  
Bjørn Follestad, Norges geologiske undersøkelse  
Noralf Rye, Geologisk institutt, UiB

### Tettsteder (T)

- T01 Betydningen av lokal-/total overvannsdiskonering (LOD/TOD) på flommer.  
Svein Endresen, Siv.ing. Svein Endresen AS.
- T03 Lokal og total overvannsdiskonering (LOD/TOD) - Beskrivelser av anlegg, erfaringer mm.  
Svein Endresen, Siv.ing. Svein Endresen AS.



# Kontaktpersoner

- formann i styringsgruppen:** Ola Skauge  
Tlf. 73 58 05 00  
E-post: ola.skauge@dirnat.no
- programleder:** Arnor Njøs  
Jordforsk  
Tlf. 64 94 81 70 (Jordforsk)  
Tlf. 22 95 90 98 (NVE)  
E-post: arnor.njos@jordforsk.nlh.no  
E-post: xarn@nve.no.
- naturgrunnlag og arealbruk:** Arne Grønlund  
Jordforsk  
Tlf. 64 94 81 09  
E-post: arne.gronlund@jordforsk.nlh.no
- Noralf Rye  
Universitetet i Bergen  
Tlf. 55 58 34 98  
E-post: noralf.rye@geol.uib.no
- tettsteder:** Oddvar Lindholm  
Norges Landbrukshøgskole  
Tlf. 64 94 87 08  
E-post: oddvar.lindholm@itf.nlh.no
- flomdemping, flomvern og flomhandtering:** Dan Lundquist  
Glommens og Laagens  
Brukseierforening  
Tlf. 22 54 96 00  
E-post: post@glb.no  
E-post: danlund@sn.no
- skaderisikoanalyse:** Nils Roar Sælthun  
Norsk institutt for vannforskning  
Tlf. 22 18 51 21  
E-post: nils.saelthun@niva.no
- miljøvirkninger av flom og flomforebyggende tiltak:** Olianne Eikenæs  
Norges vassdrags- og energidirektorat  
Tlf. 22 95 92 24  
E-post: oli@nve.no
- databaser og GIS:** Lars Andreas Roald  
Norges vassdrags- og energidirektorat  
Tlf. 22 95 92 40  
E-post: lars.roald@nve.no
- modellarbeid:** Ånund Killingtveit  
Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet  
Tlf. 73 59 47 47  
E-post: aanund.killingtveit@bygg.ntnu.no
- programadministrasjon:** Olianne Eikenæs  
Norges vassdrags- og energidirektorat  
Tlf. 22 95 92 24  
E-post: oli@nve.no  
Hjemmeside: <http://www.nve.no>
- Per Einar Faugli  
Norges vassdrags- og energidirektorat  
Tlf. 22 95 90 85  
E-post: pef@nve.no



**Norges  
vassdrags- og  
energidirektorat**

Kontoradresse: Middelthuns gt. 29  
Postadresse: Postboks 5091 Maj. 0301 Oslo